

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP KETAHANAN
OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI PADUAN Ti-6Al-5Nb-3Sn-
1Zr-0.5Si UNTUK APLIKASI *HIGH PRESSURE COMPRESSOR*
BLADE DALAM *JET ENGINE TURBINE***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Zaidan Ilhami
3334200101

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP KETAHANAN
OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI PADUAN Ti-6Al-5Nb-3Sn-
1Zr-0.5Si UNTUK APLIKASI *HIGH PRESSURE COMPRESSOR*
BLADE DALAM *JET ENGINE TURBINE***

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 197406292003121001

Pembimbing II



Galih Senopati, S.T., M.T.

NIP. 198907012014011001

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP KETAHANAN
OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI PADUAN Ti-6Al-5Nb-3Sn-
1Zr-0.5Si UNTUK APLIKASI *HIGH PRESSURE COMPRESSOR*
*BLADE DALAM JET ENGINE TURBINE***

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Zaidan Ilhami

3334200101

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

11 Oktober 2024

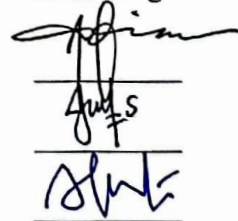
Susunan Dewan Penguji

Penguji I : Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji II : Galih Senopati, S.T., M.T.

Penguji III : Prof. Agus Pramono, ST., MT., Ph.D Tech.

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Dr. Eng. Abdul Aziz, S.T., M.T.
NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut :

Judul : Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0.5Si Untuk Aplikasi *High Pressure Compressor Blade* Dalam *Jet Engine Turbine*

Nama Mahasiswa : Zaidan Ilhami

NIM : 3334200101

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 23 Oktober 2024



Zaidan Ilhami

NIM.3334200101

ABSTRAK

Material yang digunakan dalam mesin jet tentunya harus memiliki sifat mekanik yang baik dan ketahanan oksidasi yang baik pada saat terkena temperatur tinggi. Paduan komersial seperti Ti-6Al-4V memiliki keterbatasan, yakni ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi yang buruk. Temperatur maksimum pada paduan titanium Ti-6Al-4V hanya dapat dibawah 350°C. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si merupakan paduan yang ada dalam penelitian ini sebagai solusi atas permasalahan tersebut. Paduan ini merupakan paduan *near- α* titanium yang mengandung unsur seperti Al, Nb, Sn, Zr, dan Si yang diketahui dapat meningkatkan ketahanan oksidasi dan sifat mekanik. Selain itu, perlakuan panas dapat mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan oksidasi melalui perubahan struktur mikro. Tujuan penelitian pada kali ini adalah mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro, kekerasan paduan dan ketahanan oksidasi. Pembuatan sampel dilakukan dengan menggunakan alat *VAR Furnace* dengan *vacuum* argon. Kemudian, dilakukan perlakuan panas yaitu *solution treatment* dan *aging treatment*. Untuk mengetahui nilai kekerasan menggunakan mesin uji kekerasan *vickers*. Terakhir untuk mengetahui ketahanan oksidasi menggunakan *furnace* dengan temperatur yang berbeda yaitu 600°C, 650°C, dan 700°C selama 50 jam setiap masing-masing temperatur. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si menunjukkan nilai kekerasan dan ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan komersial Ti-6Al-4V. Nilai kekerasan tertinggi terdapa pada sampel *aging treatment* sebesar 447,63 HVN. Untuk ketahanan oksidasi, pada temperatur 700°C pertambahan berat oksida pada sampel *aging treatment* sebesar 1,9 mg/cm², lebih rendah dibandingkan dengan *as-cast* sebesar 2,6 mg/cm² dan *solution treatment* sebesar 3,4 mg/cm² dan Ti-6Al-4V sebesar 10,7 mg/cm².

Kata Kunci: Kekerasan, Oksidasi, Perlakuan panas, Temperatur Tinggi, Ti-6Al-4V.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas keberadaan Allah SWT karena atas berkat rahmat, hidayah, dan karunia-Nya kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir berupa skripsi dengan judul “Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0.5Si Untuk Aplikasi *High Pressure Compressor Blade* Dalam *Jet Engine Turbine*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan kelulusan yang nantinya untuk kelulusan pada program Strata-1 (S-1) di Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Penyusunan laporan skripsi tentunya penulis tidak bekerja secara sendiri, akan tetapi penulis mendapat bantuan serta dukungan dari orang-orang secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada pihak-pihak terkait, antara lain ialah:

1. Bapak Dr. Eng. Abdul Aziz, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, ST., MT. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph. D., selaku Dosen Pembimbing I pada Skripsi ini yang senantiasa membimbing, memberikan masukan, kritik, saran dan motivasi yang berguna bagi penulis.
4. Bapak Galih Senopati, S.T., M.T., selaku pembimbing II yang telah membimbing, mengajarkan, dan mengarahkan banyak hal dalam proses penelitian selama di BRIN dan penyusunan laporan skripsi ini.
5. Ibu Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T. sebagai dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan motivasi kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Keluarga yang senantiasa memberikan dukungan moril, semangat, dan motivasi selama penyusunan proposal skripsi ini berlangsung. Kontribusi

dan doa menjadi pendorong utama penulis dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.

7. Methalia Novrindah sebagai rekan penelitian selama di BRIN yang berjuang bersama dan saling membantu dalam penelitian.
8. Rekan-rekan BRIN lainnya yang penulis tidak dapat sebutkan satu per satu yang membantu penulis selama penelitian di BRIN dan membantu penulis dalam penyusunan laporan skripsi ini.
9. Teman-teman lain seperti pada Kang Mujaer, Serojo, BBS, dan lainnya yang membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
10. Keluarga Besar Teknik Metalurgi 2020 Universitas Sultan Ageng Tirtayasa serta para staf dan pegawai di lingkungan Pusat Riset Metalurgi -BRIN Serpong.
11. Pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang membantu penulis dalam penyusunan laporan skripsi ini.

Penulis menyadari adanya kekurangan pada pembuatan laporan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar kesalahan yang sama tidak terulang di masa yang akan datang. Semoga penyusunan laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kemajuan bagi bidang pendidikan dan dapat diterapkan di lapangan serta bisa dikembangkan lebih lanjut menjadi penelitian yang lebih sempurna. Kritik serta saran yang membangun dari pembaca, dapat disampaikan melalui alamat surat elektronik (email) penulis, zaidanilhami@gmail.com. Terimakasih.

Cilegon, 23 Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	9
1.6 Sistematika Penulisan	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Titanium.....	11
2.1.1 Titanium Murni.....	11
2.1.2 Titanium Paduan	12
2.2 Fasa Titanium	14

2.2.1	<i>Alpha (α) Alloys</i>	15
2.2.2	<i>Near-Alpha (α) Alloys</i>	16
2.2.3	<i>Alpha-Betha ($\alpha+\beta$) Alloys</i>	17
2.2.4	<i>Betha (β) Alloys</i>	17
2.3	Titanium Temperatur Tinggi	18
2.4	<i>Turbine Jet Engine</i>	19
2.4.1	<i>Compressor</i>	20
2.5	Oksidasi	21
2.6	Pengaruh <i>Solution Treatment</i> Terhadap Struktur Mikro.....	24
2.7	Pengaruh <i>Solution Treatment</i> Terhadap Nilai Kekerasan	25
2.8	Pengaruh <i>Aging Treatment</i> Terhadap Struktur Mikro.....	26
2.9	Pengaruh <i>Aging Treatment</i> Terhadap Nilai Kekerasan.....	27
2.10	Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi	28
2.11	Laju dan Kinetika Oksidasi	30
2.12	Ti-6Al-4V	32
2.13	Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si	35

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir	37
3.2	Alat dan Bahan	38
3.2.1	Alat	38
3.2.2	Bahan	39
3.3	Prosedur Penelitian	40
3.3.1	Pembuatan Sampel Dengan Pengecoran	40

3.3.2	Karakterisasi Komposisi Sampel Dengan EDS	41
3.3.3	Proses Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>)	42
3.3.4	Pemotongan Sampel Dengan <i>Wirecut</i>	43
3.3.5	Pengamatan dan Analisa Metalografi	44
3.3.6	Karakterisasi Fasa Sampel Dengan XRD	45
3.3.7	Pengujian Kekerasan	46
3.3.8	Pengujian Oksidasi	49

BAB IV PEMBAHASAN

4.1	Data Komposisi Hasil Pengecoran	52
4.2	Pengamatan Struktur Mikro.....	53
4.2.1	Pengamatan Struktur Mikro Hasil <i>As-Cast</i>	54
4.2.2	Pengamatan Struktur Mikro Hasil Perlakuan Panas	55
4.2.3	Pengamatan Struktur Mikro Ti-6Al-4V	58
4.3	Hasil Pengujian XRD Sebelum Perlakuan Oksidasi	59
4.4	Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik	63
4.5	Hasil Perlakuan Oksidasi Temperatur Tinggi	66
4.5.1	Hasil Kinetika Oksidasi	67
4.5.2	Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi	73
4.5.3	Pengamatan Visual Hasil Pengujian Oksidasi	75
4.5.4	Ketebalan Lapisan Oksida	78
4.6	Hasil Pengujian XRD Setelah Perlakuan Oksidasi.....	80
4.7	Pengaruh Perlakuan Oksidasi Terhadap Sifat Kekerasan	83

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan.....	86
5.2 Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN A. CONTOH PERHITUNGAN	96
LAMPIRAN B. DATA PENELITIAN.....	105
LAMPIRAN C. GAMBAR ALAT DAN BAHAN	117

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat Dari Titanium Paduan α , $\alpha+\beta$, dan β [37].....	22
Tabel 2.2 Eksponen Laju n dan K_p Ti-6Al-4V [44].....	31
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Paduan <i>As-Cast</i> Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si	53
Tabel 4.2 Hasil Analisis XRD Parameter Kisi Paduan	60
Tabel 4.3 Eksponen Laju (n) dan Konstanta Laju (K_p) Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si	70
Tabel 4.4 Eksponen Laju (n) dan Konstanta Laju (K_p) Paduan Ti-6Al-4V	70
Tabel A.1 Data Diameter Preparasi Sampel Untuk Uji Oksidasi	98
Tabel A.2 Data Sudut 2θ ($^\circ$) XRD Paduan	98
Tabel A.3 Data Jarak Antarplanar (d) Paduan	99
Tabel A.4 Data Nilai Parameter Kisi Paduan.....	101
Tabel A.5 Data Nilai Kekerasan Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>As-Cast</i> ..	101
Tabel A.6 Data Nilai Pertambahan Berat Oksida Sampel Ti-6Al-4V	102
Tabel A.7 Data Nilai <i>Slope</i> (Kemiringan) Setiap Sampel.....	103
Tabel B.1 Data Nilai Kekerasan Paduan <i>As-Cast</i>	111
Tabel B.2 Data Nilai Kekerasan <i>Solution Treatment</i>	112
Tabel B.3 Data Nilai Kekerasan <i>Aging Treatment</i>	112
Tabel B.4 Data Nilai Kekerasan Paduan Ti-6Al-4V	113

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Struktur Kristal Titanium	12
Gambar 2.2 Pengaruh Unsur Paduan Pada Titanium.....	14
Gambar 2.3 Peningkatan Temperatur Titanium Paduan	18
Gambar 2.4 Mesin Turbin Jet.....	19
Gambar 2.5 <i>Compressor in Turbine Jet Engine</i>	21
Gambar 2.6 Skematik Proses Oksidasi Titanium.....	23
Gambar 2.7 Struktur Mikro Hasil <i>Solution Treatment + Quenching</i>	25
Gambar 2.8 Perbedaan Nilai Kekerasan Setiap Sampel	26
Gambar 2.9 Struktur Mikro Hasil <i>Aging Treatment</i>	27
Gambar 2.10 Nilai Kekerasan Dengan Perbedaan Perlakuan Panas.....	28
Gambar 2.11 Perbandingan Berbagai Sampel Dengan Pertambahan Berat	29
Gambar 2.12 Variasi laju reaksi oksidasi.....	30
Gambar 2.13 Kurva Arrhenius Konstanta Laju Parabola K_p Ti-6Al-4V.....	32
Gambar 2.14 Uji Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V	33
Gambar 2.15 Hasil Uji XRD Setelah Uji Oksidasi Siklik	34
Gambar 2.16 Diagram Fasa Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (<i>FactSage</i>)	36
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3.2 a) <i>As-Cast</i> , b) <i>Vacuum Arc Remelting (VAR) Furnace</i>	41
Gambar 3.3 EDS (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>).....	42
Gambar 3.4 a) <i>Tube Furnace</i> , b) Skema Perlakuan Panas.....	42

Gambar 3.5 a) Komputer <i>Wire-Cut</i> , b) Mesin <i>Wire-Cut</i> , c) Sampel	43
Gambar 3.6 Mikroskop Optik OLYMPUS	44
Gambar 3.7 a) Mesin Kekerasan <i>Vickers</i> , b) Area Pembebanan	48
Gambar 3.8 a) <i>Muffle Furnace</i> , b) Pengujian Oksidasi, c) Skema Pengujian	50
Gambar 4.1 Struktur Mikro <i>As-Cast</i> Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si.....	54
Gambar 4.2 Struktur Mikro Paduan : a) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>Solution Treatment</i> , b) Ti-6Al-4V <i>Solution Treatment</i>	55
Gambar 4.3 Struktur MikroP Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>Aging Treatment</i>	56
Gambar 4.4 Struktur Mikro <i>As-Cast</i> Paduan Ti-6Al-4V	58
Gambar 4.5 Data XRD Sampel <i>As-Cast</i> Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si	60
Gambar 4.6 Hasil Analisis XRD Dengan Perbedaan Sampel.....	61
Gambar 4.7 Nilai Kekerasan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan Ti-6Al-4V	64
Gambar 4.8 Grafik Kinetika Oksidasi : a) Temperatur 600°C, b) Temperatur 650°C, c) Temperatur 700°C.....	67
Gambar 4.9 Plot Arrhenius Oksidasi	72
Gambar 4.10 Mekanisme Oksidasi Pada Batas Butir	74
Gambar 4.11 Sampel Pengujian Oksidasi. (a) Sampel Sebelum Pengujian Oksidasi, (b) – (c) Sampel Setelah Pengujian Oksidasi 700°C. (b) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>as-cast, solution treatment, aging treatment</i> , (c) Ti-6Al-4V.	76
Gambar 4.12 Pengamatan Mikroskop Optik Setelah Pengujian Oksidasi. (a)-(c) <i>As-Cast</i> , (d)-(f) <i>Solution Treatment</i> , (g)-(i) <i>Aging Treatment</i> , (j)-(l) Ti-6Al-4V.....	78
Gambar 4.13 Grafik Ketebalan Lapisan Oksida Setiap Sampel	79
Gambar 4.14 Data XRD Setelah Pengujian Oksidasi 700°C.....	80

Gambar 4.15 Grafik Nilai Kekerasan Setelah Pengujian Oksidasi. (a) Temperatur 600°C, (b) Temperatur 650°C, (c) Temperatur 700°C...	84
Gambar B.1 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 1.....	106
Gambar B.2 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 2.....	106
Gambar B.3 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 3.....	107
Gambar B.4 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 4.....	107
Gambar B.5 Data XRD Paduan <i>As-Cast</i>	108
Gambar B.6 Data XRD Paduan Perlakuan <i>Solution Treatment</i>	109
Gambar B.7 Data XRD Paduan Perlakuan <i>Aging Treatment</i>	110
Gambar B.8 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 600°C	113
Gambar B.9 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 650°C	114
Gambar B.10 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 700°C	114
Gambar B.11 Data Hasil Nilai n dan K_p Semua Sampel	114
Gambar B.12 Data Hasil Plot Arrhenius Oksidasi	115
Gambar B.13 XRD Sampel <i>As-Cast</i> Setelah Uji Oksidasi	115
Gambar B.14 XRD Sampel <i>Solution Treatment</i> Setelah Uji Oksidasi	116
Gambar B.15 XRD Sampel <i>Aging Treatment</i> Setelah Uji Oksidasi.....	116
Gambar C.1 Air Dingin.....	118
Gambar C.2 <i>As-Cast</i> Paduan Utama	118
Gambar C.3 <i>As-Cast</i> Ti-6Al-4V	118
Gambar C.4 Aquades	118
Gambar C.5 Cawan <i>Crusible</i>	118
Gambar C.6 Cawan Petri.....	118
Gambar C.7 Cetakan <i>Mounting</i>	118

Gambar C.8 <i>Colloidal Silica</i>	118
Gambar C.9 <i>Dryer</i>	119
Gambar C.10 Etanol.....	119
Gambar C.11 Gas Argon.....	119
Gambar C.12 Gelas Kimia	119
Gambar C.13 <i>Hardener</i>	119
Gambar C.14 Jangka Sorong.....	119
Gambar C.15 Kertas Ampelas.....	119
Gambar C.16 Larutan Kroll	119
Gambar C.17 Mesin Bubut	120
Gambar C.18 Mesin <i>Grinding-Polishing</i>	120
Gambar C.19 Mikroskop Optik	120
Gambar C.20 <i>Muffle Furnace</i>	120
Gambar C.21 Neraca Digital.....	120
Gambar C.22 Resin Bening.....	120
Gambar C.23 Sampel Al Murni	120
Gambar C.24 Sampel Nb Murni	120
Gambar C.25 Sampel Si Murni.....	121
Gambar C.26 Sampel Sn Murni	121
Gambar C.27 Sampel Ti Murni.....	121
Gambar C.28 Sampel Zr Murni	121
Gambar C.29 SEM-EDS	121
Gambar C.30 Tang Penjepit.....	121

Gambar C.31 <i>Tube Furnace</i>	121
Gambar C.32 <i>VAR Furnace</i>	121
Gambar C.33 <i>Vicker's Microhardness</i>	122
Gambar C.34 <i>Wire-Cut</i>	122
Gambar C.35 <i>Woll Polish</i>	122
Gambar C.36 <i>XRD</i>	122

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Titanium murni dan paduan titanium komersial banyak digunakan untuk keperluan industri seperti dalam industri *aerospace*. Industri *aerospace* sendiri ialah industri yang bergerak dalam perancangan, produksi, dan pengembangan pesawat terbang, roket, satelit, dan sistem antariksa lainnya. Industri ini mencakup semua aspek dari perancangan dan konstruksi hingga pengujian dan pemeliharaan pesawat dan sistem antariksa. Titanium biasa digunakan pada dunia *aerospace* dikarenakan titanium dikenal sebagai material yang memiliki bobot ringan (densitas 60% dari baja), kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang sangat baik, tahan oksidasi dan kerapuhan pada temperatur tinggi, kekuatan tarik, ketahanan panas, dan sifat mekanik yang baik [1]. Hal ini lah yang menjadikan titanium sebagai opsi yang sangat sesuai untuk aplikasi dalam industri *aerospace* seperti dalam pesawat terbang modern. Saat ini titanium dan titanium paduan mewakili sepertiga (30%) berat mesin pada pesawat modern. Titanium murni dan titanium paduan ini merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan pada komponen mesin pesawat terbang modern setelah *superalloy* berbasis nikel (*nikel superalloy*) [2]. Mesin turbin gas merupakan mesin pembakaran dalam yang terdiri dari lima bagian utama yaitu *fan* (kipas), kompresor, *combustion chamber* (ruang pembakaran), turbin, dan *exhaust nozzle* (nosel pembuangan). Mesin tersebut dibagi menjadi mesin bagian depan dan mesin bagian belakang. Pada bagian depan

mesin yaitu pada komponen *fan* dan juga kompresor sedangkan dibagian belakang mesin yaitu pada komponen *combustion chamber*, turbin, dan *exhaust nozzle*. Pembagian ini bukan tanpa alasan, karena bagian depan mesin dan bagian belakang mesin terdapat perbedaan temperatur operasionalnya. Titanium dan titanium paduan biasanya berada pada mesin bagian depan terutama pada komponen kompresor baik itu bertekanan rendah ataupun tinggi. Itu dikarenakan temperatur operasional kompresor sekitar 300-650°C. Sedangkan pada mesin bagian belakang temperatur operasionalnya lebih tinggi yaitu sekitar 900-2000°C [3].

Titanium dalam mesin jet harus memiliki ketahanan oksidasi saat terpapar pada temperatur tinggi [4]. Ketahanan oksidasi disini merujuk pada kemampuan titanium paduan untuk tetap mempertahankan keutuhan strukturalnya ketika terpapar oksigen pada temperatur tinggi. Oksidasi pada dasarnya dapat mempengaruhi kinerja dan umur material. Pada temperatur diatas 500°C dan di lingkungan yang mengandung banyak oksigen, titanium paduan dapat teroksidasi dengan cepat. Pada temperatur tinggi, laju penyerapan dan difusi oksigen menjadi cukup tinggi, sehingga sifat mekanik permukaan akan berubah dan hal ini sering disebut dengan '*alpha case*' [5]. Oksidasi biasanya melibatkan pembentukan lapisan oksida diatas logam dan lapisan keras dan rapuh [6]. Pada aplikasi *high pressure compressor*, ketahanan oksidasi yang baik sangatlah penting, karena sifat ini melibatkan kemampuan titanium untuk membentuk lapisan oksida yang melindungi ataupun mencegah material dari kerusakan akibat reaksi oksidasi seperti korosi dan penggetasan (kerapuhan) yang berakibat fatal apabila terjadi kegagalan.

Perkembangan riset titanium paduan untuk material yang tahan terhadap oksidasi terus-menerus terjadi, hal ini disebabkan karena masih adanya kekurangan dari riset-riset sebelumnya. Terdapat salah satu paduan titanium yang sudah digunakan sebagai aplikasi *high pressure compressor* ini seperti paduan Ti-6Al-4V [7]. Ti-6Al-4V adalah paduan *alpha-beta* yang sangat populer dan banyak digunakan diberbagai industri dunia. Paduan ini adalah paduan titanium yang paling umum digunakan secara komersial. Produksinya mencakup lebih dari 50% total produksi paduan titanium di seluruh dunia. Paduan Ti-6Al-4V sangat populer karena paduan ini memiliki kekuatan, keuletan, ketangguhan patah, kekuatan temperatur tinggi, karakteristik mulur, kemampuan las yang baik [8]. Oleh karena itu paduan ini digunakan untuk banyak badan pesawat dan bagian mesin. Temperatur operasional maksimum pada paduan titanium Ti-6Al-4V dibawah 350°C karena paduan ini jika terkena temperatur tinggi akan mengalami oksidasi yang sangat buruk. Keterbatasan temperatur dari paduan Ti-6Al-4V inilah yang berkaitan erat dengan oksidasi ketika paduan terpapar pada temperatur tinggi di lingkungan yang mengandung oksigen [9].

Oleh karena itu, dengan adanya kekurangan pada paduan komersial Ti-6Al-4V maka dunia merancang dan mengembangkan paduan lain. Pengembangan paduan *near-α* titanium pun disebut sebagai bidang utama pengembangan [5]. Paduan ini diyakini memiliki ketahanan temperatur tinggi yang sangat bagus. Paduan *near-α* terdiri dari unsur penstabil α , namun mempertahankan sejumlah kecil penstabil β . Paduan titanium *near-α* memiliki kekuatan tinggi dari paduan $\alpha+\beta$ dan ketahanan mulur yang unggul dari paduan α . Oleh karena itu, jenis paduan ini

terutama dikembangkan untuk aplikasi pada temperatur tinggi hingga diatas 500°C [10]. Paduan *near- α* ini biasanya disebut sebagai paduan temperatur tinggi [11].

Terdapat banyak unsur penstabil α dan unsur penstabil β yang diketahui sangat bagus untuk ketahanan oksidasi temperatur tinggi. Unsur-unsur tersebut seperti aluminium (Al), timah (Sn), zirkonium (Zr), silikon (Si), dan niobium (Nb). Aluminium merupakan salah satu unsur yang sangat penting dalam paduan titanium utamanya ialah pada aplikasi temperatur tinggi. Aluminium diketahui memiliki lapisan oksida berupa Al_2O_3 . Al_2O_3 adalah oksida yang sangat sesuai untuk keperluan lapisan oksida sebagai pelindung karena sangat padat (tersusun), kecepatan pertumbuhan yang rendah, dan memiliki daya rekat yang baik. Namun, kandungan aluminium dibatasi hingga maksimum 6% berat [12]. Unsur Sn menunjukkan efek penguatan larutan padat yang signifikan pada paduan Ti-Al [13]. Unsur Sn juga diketahui mampu meningkatkan ketahanan pengelupasan lapisan oksida [14]. Unsur Zr dapat meningkatkan karakteristik lapisan oksida yang terbentuk dan menghaluskan partikel oksida yang dapat menghambat difusi oksigen [2]. Unsur Si dapat membentuk partikel lapisan oksida berupa SiO_2 yang dapat berefek pada penguatan lapisan oksida R- TiO_2 dalam hal mengurangi porositas dan stratifikasi (kelemahan struktural karena lapisan-lapisan oksida yang tidak homogen) [15]. Niobium juga merupakan salah satu unsur penstabil β yang dapat menyerap atom oksigen untuk menahan difusi internal atom oksigen [16].

Selain penambahan atau pencampuran unsur-unsur tersebut yang dapat meningkatkan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi, perlakuan panas juga diketahui memiliki peran penting dalam meningkatkan sifat-sifat material.

Perlakuan panas adalah suatu proses merekayasa sifat logam dengan cara mengubah struktur mikro melalui proses pemanasan dan pengaturan kecepatan pendinginannya. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Sharifi tahun 2019 [17] melakukan pengujian oksidasi menggunakan sampel Ti-6Al-4V dengan dilakukannya juga perlakuan panas berupa *solution treatment* dan *aging treatment*, hasilnya menunjukkan bahwa perlakuan panas mempengaruhi pertambahan berat oksidanya. Pertambahan berat terkecil (terbaik) didapatkan oleh sampel yang dilakukannya *aging treatment*. Dalam penelitian lain, seperti pada penelitian Sai [18] melakukan pengujian oksidasi menggunakan sampel IMI-834 dengan dilakukannya juga perlakuan panas berupa *aging treatment* juga menjelaskan bahwa perlakuan panas mempengaruhi hasil dari oksidasi. Di dalam jurnalnya menjelaskan bahwa ukuran butiran akan mempengaruhi oksidasi.

Selain mempengaruhi pada oksidasi, perlakuan panas juga mempengaruhi pada sifat mekanik material seperti pada sifat kekerasannya. Kekerasan adalah kemampuan suatu material untuk menahan pembebanan atau penetrasi (penekanan) yang tetap (konstan). Dalam penelitian Amalina tahun 2024 [19], menjelaskan bahwa *solution treatment* secara umum akan mengalami peningkatan nilai kekerasan dikarenakan adanya struktur martensit yang terbentuk pada struktur mikro karena adanya *quenching*. Dalam penelitian Pinke [20], menjelaskan bahwa material yang mengalami *solution treatment* dan *aging treatment* akan mengalami peningkatan nilai kekerasan dikarenakan terdapatnya presipitat fasa α halus didalam matriks β . Perlakuan panas juga akan mempengaruhi ukuran butir yang terbentuk, apakah akan semakin halus (kecil) atau akan semakin kasar (besar).

Ukuran butir ini juga mempengaruhi sifat kekerasan materialnya. Dalam penelitian Sutowo tahun 2017 [21], menjelaskan bahwa semakin halus butir maka semakin besar nilai kekerasannya. Hal ini dikarenakan ukuran butir yang lebih halus atau kecil itu akan mempersulit terjadinya dislokasi sehingga meningkatkan nilai kekerasannya.

Semakin berkembang ilmu pengetahuan, maka diperlukannya riset untuk mengembangkan paduan titanium yang memiliki ketahanan oksidasi pada temperatur yang tinggi dan memiliki nilai kekerasan yang baik. Salah satu caranya ialah dengan memadukan beberapa unsur menjadi sebuah paduan dan juga dengan dilakukannya perlakuan panas. Oleh karena itu, permasalahan penelitian ini adalah bagaimana mengembangkan paduan titanium baru yang dapat memenuhi persyaratan ketahanan temperatur tinggi. Penelitian ini menggunakan sampel paduan baru Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si sebagai aplikasi *high pressure compressor blade* dalam mesin turbin. Penelitian ini juga akan melakukan perlakuan panas berupa *solution treatment* dan *aging treatment* dengan tujuan untuk memperbaiki struktur mikro yang nantinya akan mempengaruhi sifat mekanik dan juga sifat ketahanan oksidasinya. Dalam kata lain, penelitian ini akan mengamati serta mempelajari perilaku oksidasi temperatur tinggi Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan sifat mekaniknya yang nantinya didalamnya akan terdapat struktur mikro yang terbentuk, nilai kekerasannya, nilai pertambahan berat oksidanya, dan lapisan oksida apa yang terbentuk. Penelitian ini diharapkan tidak hanya mengembangkan pemahaman tentang material baru, tetapi juga memberikan kontribusi dalam teknologi *aerospace* untuk masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang ada pada penelitian ini ialah sebagai berikut.

- a. Bagaimana pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro yang terbentuk pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si?
- b. Bagaimana pengaruh perlakuan panas terhadap nilai kekerasan temperatur tinggi paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si?
- c. Bagaimana pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut.

- a. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro yang terbentuk pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si ;
- b. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si ;
- c. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian dengan judul “Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Ketahanan Oksidasi Temperatur Tinggi Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0.5Si Untuk Aplikasi *High Pressure Compressor Blade* Dalam *Jet Engine Turbine*” dapat dilihat sebagai berikut.

- a. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si sebagai hasil pembuatan menggunakan *Vacuum Arc Remelting (VAR) Furnace*
- b. Karakterisasi sampel terlebih dahulu dengan menggunakan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)* untuk mengetahui kandungan unsur yang ada pada paduan
- c. Pemotongan sampel dengan menggunakan *wire cut* dengan dimensi 10 x 10 x 2 mm³
- d. Variabel bebas
 1. Variasi temperatur uji oksidasi = 600°C, 650°C, dan 700°C
 2. Variasi perlakuan panas = *As-cast*, *Solution treatment*, dan *Aging treatment*
- e. Variabel terikat :
 1. Struktur Mikro
 2. Lapisan Oksida
 3. Pertambahan Berat Oksida
 4. Kekerasan.
- f. Pengujian yang akan dilakukan :
 1. Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik
 2. Pengujian *X-Ray Diffraction (XRD)* untuk melihat besarnya fasa yang terbentuk
 3. Pengujian kekerasan menggunakan *Vicker's Microhardness*

4. Pengujian *cyclic oxidation* selama beberapa siklus, dimana per siklusnya ialah selama 5 jam dan total jumlah jamnya ialah selama 50 jam, pada setiap siklusnya sampel akan ditimbang perubahan massanya dan kemudian setelah 50 jam maka sampel akan dianalisis;
 5. Pengujian *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) untuk mengetahui jumlah kandungan unsur dalam paduan.
- g. Pengujian dilakukan di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Pusat Riset Metalurgi (PRM) – Serpong, Tangerang Selatan.

1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dan membuka peluang dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan juga dunia manufaktur khususnya pada industri *aerospace*. Dengan adanya pengembangan titanium paduan baru diharapkan mampu meningkatkan ketahanan temperatur tinggi pada aplikasi *aerospace* khususnya ialah pada komponen *high-pressure compressor* pada pesawat terbang.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini diawali dengan Bab I yaitu pendahuluan yang berisikan adanya latar belakang diadakannya penelitian, adanya rumusan masalah penelitian, adanya tujuan penelitian, adanya ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisannya. Lalu, dilanjut dengan Bab II yaitu tinjauan pustaka yang membahas tentang tinjauan mengenai teori-teori pendukung. Selanjutnya ialah Bab

III yaitu metode penelitian yang berisikan bagaimana prosedur penelitian tersebut akan dilakukan dengan alat dan bahan yang sudah direncanakan. Kemudian adanya Bab IV yang berisikan hasil dan pembahasan penelitian. Selanjutnya, Bab V yang berisikan kesimpulan dan saran. Lalu, diakhiri dengan adanya daftar pustaka yang berisikan kutipan jurnal atau buku yang digunakan selama menyusun proposal skripsi ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

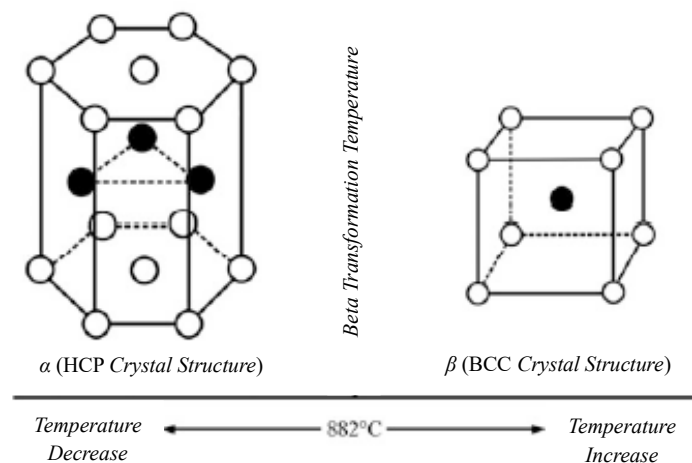
2.1 Titanium

Titanium (Ti) adalah unsur kimia yang terletak di golongan 4, periode IVA dengan nomor atom 22. Titanium merupakan logam transisi yang memiliki tampilan putih kelabu yang berkilau. Titanium memiliki sifat mekanik yang unik yaitu memiliki kekuatan yang setara dengan baja, namun bobotnya jauh lebih ringan sekitar 45-60%. Selain itu, titanium memiliki ketahanan korosi yang tinggi, ketahanan oksidasi dan juga memiliki densitas sebesar $\pm 4,5 \text{ gr/cm}^3$. Secara termal, titanium dapat tetap stabil pada temperatur antara 350-400°C dan memiliki titik lebur sekitar 1660°C [22].

2.1.1 Titanium Murni

Titanium murni komersial (>99% Ti) adalah logam yang berkekuatan rendah hingga sedang yang tidak cocok untuk struktur atau mesin pesawat terbang. Kekuatan leleh titanium dengan kemurnian tinggi berada dalam kisaran 170–480 MPa terlalu rendah untuk struktur pesawat terbang. titanium murni komersial diklasifikasikan menurut standar ASTM. Titanium mengandung sejumlah kecil pengotor seperti besi dan oksigen, dan mereka memiliki efek menguntungkan sekaligus merugikan. Menguntungkan dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasannya melalui pengerasan larutan padat dan merugikan dalam menurunkan keuletan, stabilitas termal, dan ketahanan mulur [23].

Titanium bersifat *allotropy* karena memiliki dua bentuk kristalografi, yaitu struktur kristal *hexagonal close packed* (HCP) dan *body centered cubic* (BCC) yang dapat dilihat pada gambar 2.1. Pada struktur kristal Titanium murni, pada temperatur kamar membentuk struktur kristal HCP yang disebut sebagai fase alfa (α) yang stabil hingga temperatur $\pm 882^{\circ}\text{C}$ sebelum, apabila diberi temperatur $> 882^{\circ}\text{C}$ sampai batas titik lelehnya ($\pm 1660^{\circ}\text{C}$) berubah menjadi struktur kristal BCC yang dikenal sebagai fase beta (β) [24].



Gambar 2.1 Struktur Kristal Titanium [24].

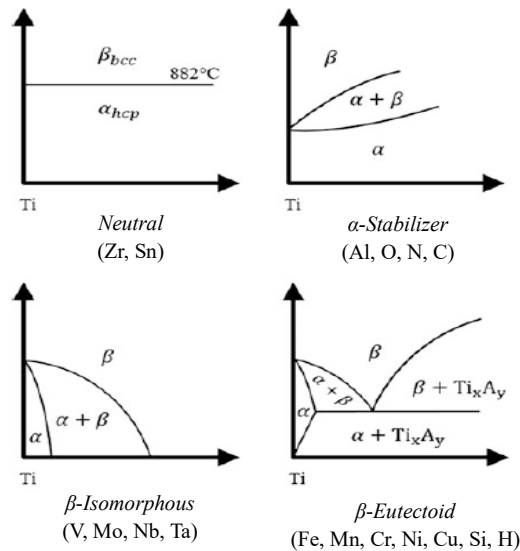
2.1.2 Titanium Paduan

Paduan titanium adalah paduan yang terutama terdiri dari titanium murni dengan berbagai logam atau unsur kimia lainnya yang tersebar di seluruh bagiannya. Ini diproduksi dengan mencampurkan titanium dalam perbandingan tertentu dengan logam dan unsur kimia lainnya. Paduan ini dibuat untuk meningkatkan sifat-sifat logam titanium dan menyediakan

berbagai kombinasi sifat yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi. Paduan titanium memiliki keunggulan tertentu seperti kekuatan tinggi, kepadatan rendah, ketahanan terhadap korosi, dan ketahanan terhadap temperatur tinggi. Titanium paduan komersial memiliki beberapa unsur paduan yang efek gabungannya pada stabilitas fasa (dalam hal perluasan bidang α , $\alpha+\beta$, dan β untuk memberikan waktu yang cukup untuk pemrosesan dan kemampuan untuk mengontrol jumlah fasa primer) yang sama pentingnya [25].

Beberapa contoh unsur yang sering dipadukan kedalam paduan titanium antara lain aluminium (Al), vanadium (V), molybdenum (Mo), chromium (Cr), nikel (Ni), dan lainnya. Kombinasi unsur ini dapat memberikan sifat-sifat tertentu sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Paduan titanium digunakan secara luas dalam industri penerbangan, kedokteran, industri kelautan, dan industri lainnya dimana kekuatan tinggi, kepadatan rendah, dan ketahanan terhadap korosi sangat dihargai. Contoh paduan titanium yang terkenal ialah Ti-6Al-4V (6% aluminium, 4% vanadium),

2.2 Fasa Titanium



Gambar 2.2 Pengaruh Unsur Paduan Pada Titanium [26].

Unsur paduan dapat memiliki efek penstabilan pada temperatur transformasi dan terbagi menjadi dua yaitu penstabil α dan penstabil β [26]. Fase α dapat diperkuat dengan menambahkan unsur seperti aluminium (Al), galium (Ga), oksigen (O), nitrogen (N), dan karbon (C). Penambahan aluminium pada fase α menjadi pilihan umum karena kepadatan dan penguatannya yang rendah [27]. Penambahan unsur-unsur ini dapat meningkatkan temperatur transformasi, menjaga fase α tetap stabil pada temperatur yang lebih tinggi dan disebut sebagai penstabil α . Contohnya, paduan Ti-Al menunjukkan sifat mekanik yang baik dalam hal kekuatan tarik dan stabilitas mulur dalam rentang temperatur kamar hingga 300 °C [27]. Penambahan unsur seperti timah (Sn) dan zirkonium (Zr) meskipun memiliki kelarutannya yang tinggi dalam fase α dan β cenderung memiliki dampak yang lebih kecil pada temperatur transformasi. Sn dan Zr biasa disebut sebagai unsur

netral. Walaupun bersifat netral, namun sedikit penambahan unsur Sn dan Zr dengan kadar 1-5% dapat menguatkan stabilitas fasa α [27].

Disisi lain, temperatur transformasi dapat diturunkan dengan menambahkan unsur seperti vanadium (V), molibdenum (Mo), niobium (Nb), besi (Fe), kromium (Cr), nikel (Ni), mangan (Mn), dan kobalt (Co) yang dikenal sebagai penstabil beta atau β -*stabilizer*. Artinya, ketika titanium murni membutuhkan temperatur pemanasan yang tinggi untuk mencapai fasa β , penambahan unsur penstabil fasa β dapat mengurangi temperatur β transus. Dengan demikian, pada temperatur yang lebih rendah, material tersebut dapat membentuk fasa β . Penstabil beta sendiri dapat dibagi menjadi β -eutektoid dan β -isomorf [28]. Paduan titanium biasanya dikategorikan berdasarkan fase kristalografinya pada temperatur kamar kedalam kategori utama berikut :

2.2.1 *Alpha (α) Alloys*

Fasa ini umumnya terdiri dari beberapa tingkatan titanium murni komersial (CP-Ti). Fasa ini adalah paduan fase tunggal dengan kekuatan yang relatif rendah tetapi sifat ketahanan mulur yang cukup baik pada temperatur yang lebih tinggi karena stabilitas termalnya yang tinggi. Fasa ini biasanya hanya diperkaya oleh unsur-unsur seperti oksigen (O), nitrogen (N), dan karbon (C). Karakteristik CP-Ti dipengaruhi oleh kandungan oksigen yang memiliki dampak signifikan pada kekuatan dan juga keuletan. Kandungan oksigen yang tinggi dapat meningkatkan kekuatan tetapi juga mengurangi keuletan (penggetasan). Pengotor seperti besi dan karbon, yang biasanya diperoleh selama proses pembuatan, dianggap memengaruhi

kualitas paduan [6]. Paduan ini mempunyai karakteristik ketahanan terhadap korosi dan deformabilitas yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri kimia dan rekayasa proses.

Pada paduan ini juga fase β mengalami transformasi sepenuhnya menjadi fase α selama proses pendinginan, ini tergantung pada temperatur transformasi yang digunakan. Proses ini menghasilkan pembentukan fasa α dengan struktur martensit. Alpha primer (α') adalah jenis struktur martensit yang terbentuk sebagai respons terhadap pendinginan cepat, di mana fasa α muncul sebagai bentuk untuk menjaga kesetimbangan komposisi akibat perlakuan panas tersebut. Dalam konteks ini, struktur alpha primer (α') terbentuk karena pendinginan yang cepat pada temperatur di atas β transus, mengakibatkan fasa α menjadi dominan dan fasa lainnya tidak memiliki waktu untuk berdifusi atau merespons perlakuan panas yang diberikan [29].

2.2.2 Near-Alpha (α) Alloys

Paduan ini mengandung fraksi kecil dari unsur paduan penstabil β dan biasanya disebut sebagai paduan temperatur tinggi. Paduan *near- α* terutama terdiri dari α , namun mengandung sejumlah kecil *stabilizer* β (3-5%) [30]. Paduan ini menunjukkan kekuatan temperatur ruangan yang lebih tinggi dibandingkan paduan *full- α* , paduan ini digunakan pada aplikasi temperatur tinggi (500-600°C) karena memiliki perilaku mulur (*creep*) yang sangat baik dan kekuatan tinggi. Sifat mulur yang sangat baik pada temperatur tinggi ini dapat disebabkan oleh adanya penambahan sedikit unsur Si.

2.2.3 *Alpha-Betha ($\alpha+\beta$) Alloys*

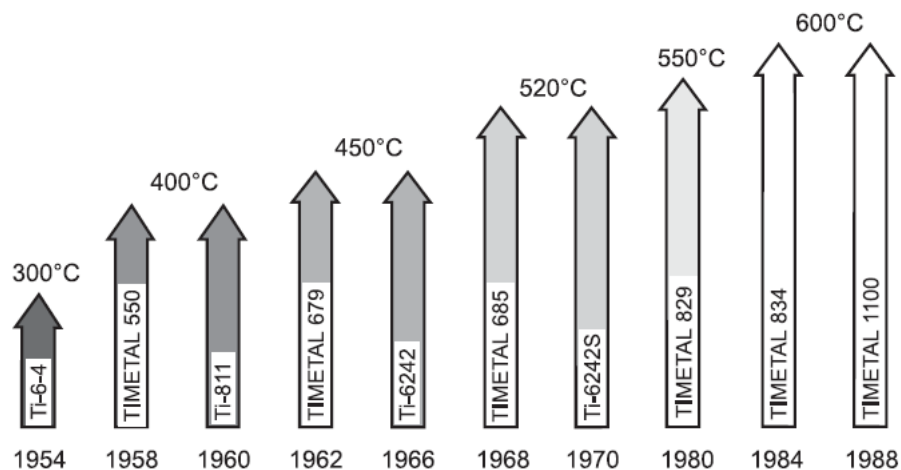
Paduan $\alpha+\beta$ adalah penggabungan (amalgamasi) penstabil α dan β , struktur mikronya merupakan kombinasi fase α dan β dan bersifat metastabil [24]. Paduan titanium $\alpha+\beta$ terbentuk saat fasa α mengendap sebagai presipitat dalam fasa β . Paduan ini dan mengandung kombinasi penstabil fasa α dan β . Sifat mekanik paduan ini dapat diatur melalui perlakuan panas, yang memengaruhi jumlah fasa β yang terbentuk atau ditambahkan [29]. Selama proses pendinginan, struktur martensit alpha (α') terbentuk dalam paduan $\alpha + \beta$, sambil mempertahankan fasa β dalam kondisi metastabil. Jumlah penstabil α berkisar antara 2–6% dan penstabil β berkisar antara 6–10% [23].

2.2.4 *Betha (β) Alloys*

Pada fasa β , temperatur transisi dari fasa α menuju fasa β disebut dengan temperatur β transus. Paduan titanium β umumnya meningkatkan kekerasan suatu material. Unsur penstabil fasa β terdiri dari dua jenis, yaitu β -*eutectoid* dan β -*isomorphous*, dengan perbedaan terletak pada proses pelarutan. Unsur penstabil β -*isomorphous* memiliki kelarutan yang lebih baik dalam paduan β titanium, seperti Nb, Mo, dan V, sementara unsur penstabil β -*eutectoid* memiliki kelarutan yang terbatas. Dalam industri pesawat terbang, Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr, Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-0.5Fe, Ti-15Mo-3Al-3Nb-0.2Si, Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr adalah enam paduan Ti- β yang terus digunakan hingga saat ini [31].

2.3 Titanium Temperatur Tinggi

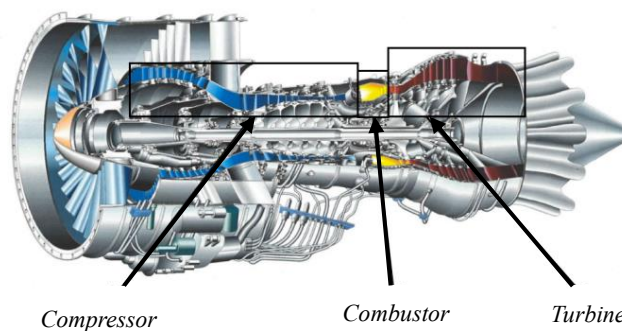
Industri kedirgantaraan telah menjadi salah satu pendorong terbesar pengembangan paduan titanium sejak tahun 1950an. Titanium temperatur tinggi mengacu pada kemampuan titanium dan paduannya untuk mempertahankan struktural dan performa mekaniknya pada temperatur tinggi. Sifat ini mencakup kekuatan mekanik yang tinggi, kepadatan yang rendah, ketahanan korosi yang baik, dan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi. Dengan nilai rata-rata densitas paduan sebesar $4,5 \text{ g/m}^3$ sangat berpotensi untuk menunjukkan kekuatan tarik melebihi 1500 MPa pada temperatur kamar dan kemampuan untuk beroperasi pada temperatur hingga 600°C , paduan titanium memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan industri yang terus berkembang. Industri ini memerlukan rasio kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi untuk memungkinkan peningkatan efisiensi bahan bakar.



Gambar 2.3 Peningkatan Temperatur Titanium Paduan [32].

2.4 *Turbine Jet Engine*

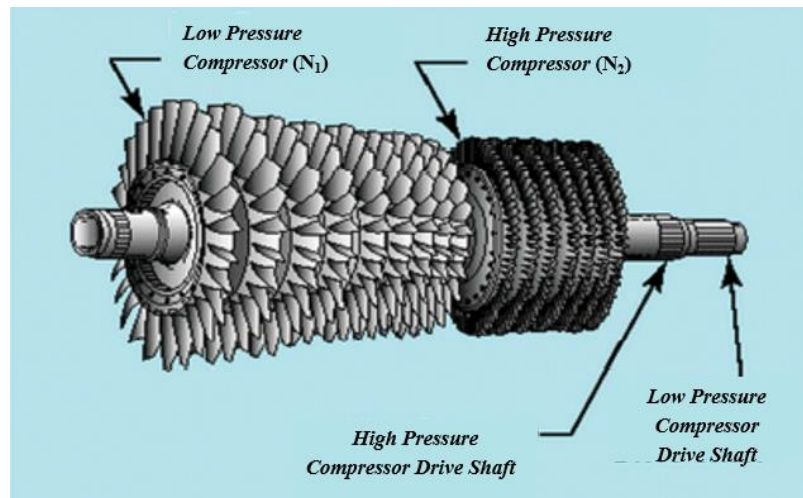
Aplikasi mesin turbin gas mencakup berbagai industri, termasuk pembangkit listrik, minyak dan gas, serta industri dirgantara. Dalam industri dirgantara, mesin turbin gas (mesin pesawat terbang modern) merupakan mesin pembakaran dalam yang terdiri dari lima bagian utama yaitu *fan* (kipas), kompresor, *combustion chamber* (ruang pembakaran), turbin, dan *exhaust nozzle* (nosel pembuangan). Cara kerja mesin ini ialah dengan menghisap udara untuk masuk ke saluran masuk yaitu *fan* ke kompresor bertekanan rendah. Udara ini mengalir melalui beberapa tahap kompresor dengan peningkatan temperatur, mencapai temperatur tinggi ketika memasuki ruang bakar. Campuran udara (bahan bakar) yang terbakar digunakan untuk menggerakkan turbin. Proses pembakaran menghasilkan gas bertemperatur tinggi dan bertekanan tinggi yang mengalir melalui bilah turbin. Sebagian energi gas digunakan untuk memutar poros turbin. Gas panas lalu dibuang melalui *nozzle* dengan energi yang besar untuk mengatasi gaya hambat udara dan menggerakkan pesawat ke depan [33].



Gambar 2.4 Mesin Turbin Jet [34].

2.4.1 Compressor

Bagian kompresor bertugas untuk mengompresi udara yang dimasukkan ke dalam mesin oleh kipas. Karena kompresi udara, temperatur dibagian tersebut mulai meningkat, oleh karena itu digunakan bahan yang memiliki kekuatan temperatur tinggi seperti paduan berbahan dasar Fe, Ni, dan Ti. Kompresor terbagi menjadi dua bagian yaitu *low pressure compressor* dan *high pressure compressor*. *Low pressure compressor* berputar berlawanan arah jarum jam, dan *high pressure compressor* berputar searah jarum jam, sehingga menghasilkan peningkatan efisiensi bahan bakar. *Low pressure compressor* beroperasi pada temperatur -50°C hingga 40°C dan mengalir ke *high pressure compressor* temperatur meningkat hingga 300-650°C [3]. Bilah (*blade*) *low pressure compressor* dan beberapa *high pressure compressor blade* terbuat dari paduan Ti-6Al-4V yang juga digunakan untuk bilah kipas (*fan blade*). Namun, beberapa *high pressure compressor blade* lainnya terbuat dari *superalloy* berbahan dasar Ni seperti Hastelloy. Dalam beberapa tahun terakhir, paduan berbasis Ti telah digunakan pada komponen *high pressure compressor* seperti pada paduan Ti-6242 (Ti-6Al-2Sn-4Zr -2Mo) untuk mengurangi berat [35].



Gambar 2.5 *Compressor in Turbine Jet Engine* [3].

2.5 Oksidasi

Salah satu faktor keberhasilan paduan logam dalam aplikasi yang memerlukan temperatur tinggi ini ialah paduan harus memiliki ketahanan oksidasi saat terpapar pada temperatur tinggi. Dalam sebagian besar kondisi lingkungan, logam umumnya tidak stabil secara termodinamika [36]. Ketidakstabilan ini mungkin tidak signifikan pada temperatur kamar karena reaksi berlangsung dengan lambat, namun menjadi lebih berpengaruh pada temperatur tinggi. Pemahaman terhadap alasan proses oksidasi, produk reaksinya, serta kinetika dan mekanisme oksidasi sangatlah penting. Ketahanan oksidasi disini merujuk pada kemampuan titanium paduan untuk tetap mempertahankan keutuhan strukturalnya ketika terpapar oksigen pada temperatur tinggi. Proses oksidasi dapat dianggap sebagai bentuk khusus degradasi yaitu korosi pada logam dan paduan yang terjadi ketika terpapar udara atau lingkungan pengoksidasi lainnya, seperti SO_2 dan CO_2 .

Pada temperatur diatas 500°C dan di lingkungan yang mengandung banyak oksigen, titanium paduan dapat teroksidasi dengan cepat. Degradasi ini melibatkan pembentukan lapisan oksida dan, pada beberapa kasus, pelarutan spesies gas ke dalam substrat logam yang dapat menyebabkan penggetasan. Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah sifat lapisan oksida yang terbentuk. Lapisan oksida yang tipis, padat, dan melekat dapat memberikan perlindungan dengan menghambat oksidasi lebih lanjut. Sebaliknya, jika lapisan oksida bersifat berpori dan mengelupas dari permukaan logam, ia tidak akan berperan sebagai penghalang pelindung dan tidak dapat menghambat proses oksidasi logam atau paduannya [6].

Tabel 2.1 Sifat Dari Titanium Paduan α , $\alpha+\beta$, dan β [37].

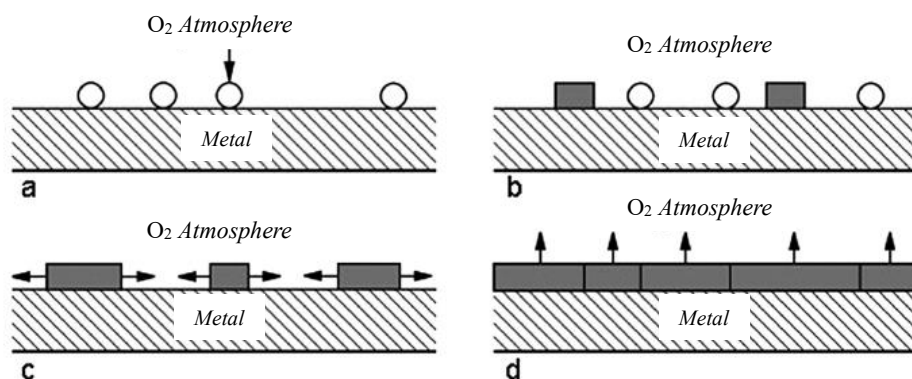
<i>Properties</i>	<i>Class Of Titanium Alloys</i>		
	α	$\alpha+\beta$	β
<i>Density</i>	+	+	-
<i>Strength</i>	-	+	++
<i>Ductility</i>	- / +	+	+/-
<i>Fracture Toughness</i>	+	- / +	+/-
<i>Creep Resistance</i>	+	+/-	-
<i>Corrosion Resistance</i>	++	+	+/-
<i>Oxidation Resistance</i>	++	+/-	-
<i>Weldability</i>	+	+/-	-
<i>Cold Formability</i>	--	-	+/-

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, proses oksidasi logam melibatkan pembentukan lapisan oksida yang merata menutupi permukaan logam. Proses ini dapat diuraikan melalui langkah-langkah berikut [37]:

- a. Adsorpsi oksigen pada permukaan ;
- b. Pembentukan nukleasi (inti) oksida ;
- c. Pertumbuhan inti lateral ;

d. Pembentukan kerak oksida padat (tersusun) dan tipis.

Pada titanium murni, dalam atmosfer yang oksidatif pada temperatur yang rendah, lapisan oksida TiO_2 padat yang terbentuk oleh reaksi antara titanium dan oksigen dapat sepenuhnya menutupi permukaan logam, mengisolasi logam dari lingkungan gas. Namun, pada temperatur tinggi lapisan oksida TiO_2 yang padat tadi dapat menjadi longgar dan berpori. Aktivitas dan kecepatan difusi oksigen menjadi kuat. Atom oksigen dapat masuk ke dalam substrat, sementara atom titanium berdifusi ke permukaan dari dalam dan retakan pada skala oksida. Ini mengakibatkan peningkatan ketebalan lapisan oksida dan melemahnya ikatan antara lapisan oksida dan substrat. Pertambahan massa terus meningkat seiring dengan peningkatan temperatur [2].



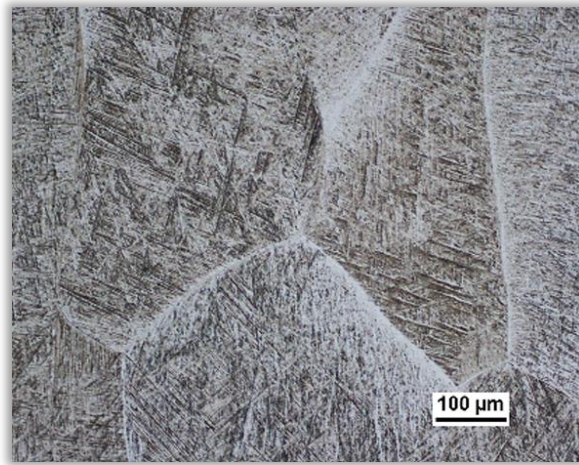
Gambar 2.6 Skematik Proses Oksidasi Titanium [37].

Untuk paduan titanium konvensional, unsur penyusun utamanya adalah Ti dan Al. Dengan meningkatnya kandungan Al, keuletan dan kapasitas deformasi paduan titanium menurun. Oleh karena itu, kandungan Al dibatasi hanya 6% berat pada paduan titanium konvensional. Aktivitas aluminium yang rendah dan aktivitas titanium yang tinggi menghalangi oksidasi selektif Al untuk membentuk Al_2O_3 .

Pada temperatur tinggi, produk oksidasi utama paduan titanium adalah TiO_2 . Temperatur aplikasi maksimum dibatasi oleh ketahanan oksidasi yang buruk dari struktur skala oksida paduan titanium ini.

2.6 Pengaruh *Solution Treatment* Terhadap Struktur Mikro

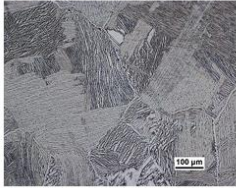
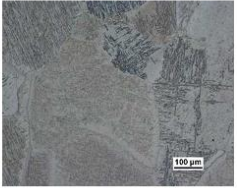
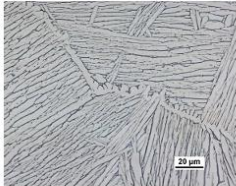
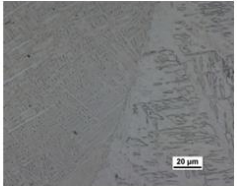
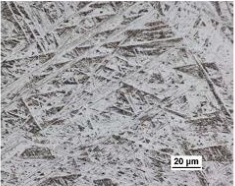
Solution treatment adalah proses perlakuan panas yang digunakan untuk melarutkan fasa dibawahnya dalam matriks logam dengan memanaskan material hingga temperatur tertentu dan kemudian mendinginkannya dengan cepat (*quenching*). Pada saat perlakuan panas *solution treatment*, fasa α berubah menjadi fasa β melalui pemanasan yang terjadi diatas T_β ($\alpha \rightarrow \beta$). Lalu, pendinginan cepat (*quenching*) akan dilakukan setelah pemanasan untuk mencegah mencegah transformasi fase β [38]. *Solution treatment* pada paduan titanium dilakukan dengan pemanasan pada temperatur di atas temperatur β transus sehingga dapat meningkatkan jumlah fasa β . Kecepatan pendinginan mempengaruhi mekanisme transformasi fasa yang terbentuk. Pada pendinginan cepat (*quenching*) akan membentuk bentuk martensit [39]. Dengan memerhatikan laju pendinginan setelah proses pemanasan akan menghasilkan perbedaan fasa struktur mikro.



Gambar 2.7 Struktur Mikro Hasil *Solution Treatment* + *Quenching* [39].

2.7 Pengaruh *Solution Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan

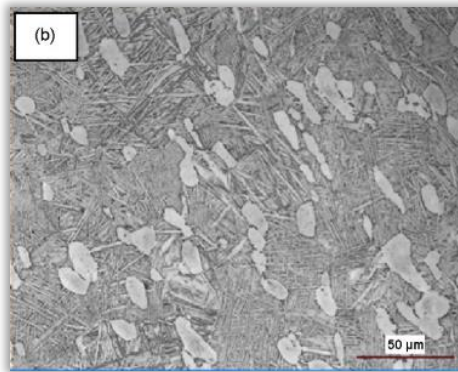
Solution treatment merupakan salah satu perlakuan panas yang dikenal mampu mempengaruhi sifat kekerasan pada material. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa proses *solution treatment* dapat meningkatkan kekerasan material secara signifikan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Galarraga tahun 2017 yang berjudul “*Effects Of Heat Treatments On Microstructure And Properties Of Ti-6Al-4V ELI Alloy Fabricated By Electron Beam Melting (EBM)*” terdapat data bahwa nilai tertinggi didapatkan oleh sampel dengan perlakuan *solution treatment* + *water quenching* yaitu sebesar 414 HVN. Hal ini dikarenakan oleh struktur martensit yang terbentuk pada pendinginan cepat [39].

	1100°C/30min + furnace-cooling	1100°C/30min + air-cooling	1100°C/30min + water-cooling
100x			
500x			
Properties	• UTS=913 MPa (±38 MPa) • YS=774 MPa (±112 MPa) • el=13% (±2 %) • 378 HV (±44 HV)	• UTS=998 MPa (±52 MPa) • YS=847 MPa (±90 MPa) • el=13% (±7%) • 365 HV (±31 HV)	• UTS=1200 MPa (±50 MPa) • YS=932 MPa (±80 MPa) • el=1.8% (±1.5%) • 414 HV (±33 HV)

Gambar 2.8 Perbedaan Nilai Kekerasan Setiap Sampel [39]

2.8 Pengaruh *Aging Treatment* Terhadap Struktur Mikro

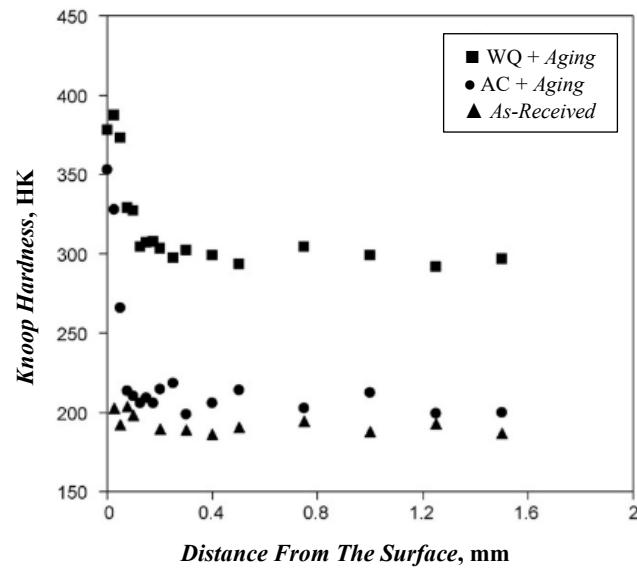
Aging treatment adalah proses perlakuan panas yang dilakukan setelah *solution treatment*. Perlakuan ini dimana sampel dipanaskan pada temperatur yang lebih rendah (di bawah T_{β}) dalam waktu tertentu dan akan terjadi pengendapan (presipitasi) fasa sekunder dari larutan padat. *Aging treatment* juga dikenal sebagai penguatan presipitasi (*precipitation hardening*). *Aging treatment* biasa dilakukan pada temperatur antara 425°C - 650°C (800°F - 1200 °F) [40]. Fasa yang terbentuk pada perlakuan ini berupa precipitat α dan fasa β . Precipitat α terbentuk setelah perlakuan *aging treatment*. Semakin lama waktu *aging treatment*, fasa presipitat yang terjadi semakin halus.



Gambar 2.9 Struktur Mikro Hasil *Aging Treatment* [41].

2.9 Pengaruh *Aging Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan

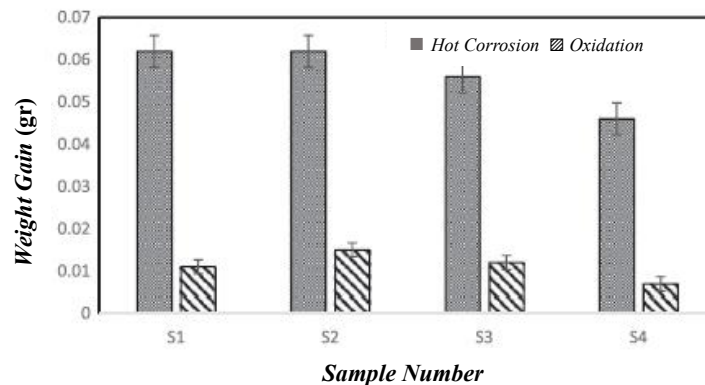
Aging treatment merupakan salah satu perlakuan panas yang juga dikenal mampu mempengaruhi sifat kekerasan pada material. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa proses *aging treatment* setelah *solution treatment* dapat meningkatkan kekerasan material secara signifikan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Venkatesh yang berjudul “*Effect of heat treatment on mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy*” disebutkan bahwa sampel yang dilakukan *aging treatment* mengalami peningkatan kekerasan yang tinggi. Nilai kekerasan *aging treatment* menjadi nilai yang paling tinggi dibandingkan sampel lainnya. Nilainya kekerasannya hampir mencapai 400 HVN. Ini disebabkan oleh adanya pengendapan fasa α dari fase β , yaitu β metastabil $\rightarrow$ fine $\alpha + \beta$ [41]. Selain itu juga, apabila semakin lama *aging treatment* dilakukan, maka fasa presipitat yang terjadi semakin halus. Semakin halus precipitat yang terbentuk maka material semakin keras.



Gambar 2.10 Nilai Kekerasan Dengan Perbedaan Perlakuan Panas [41]

2.10 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi

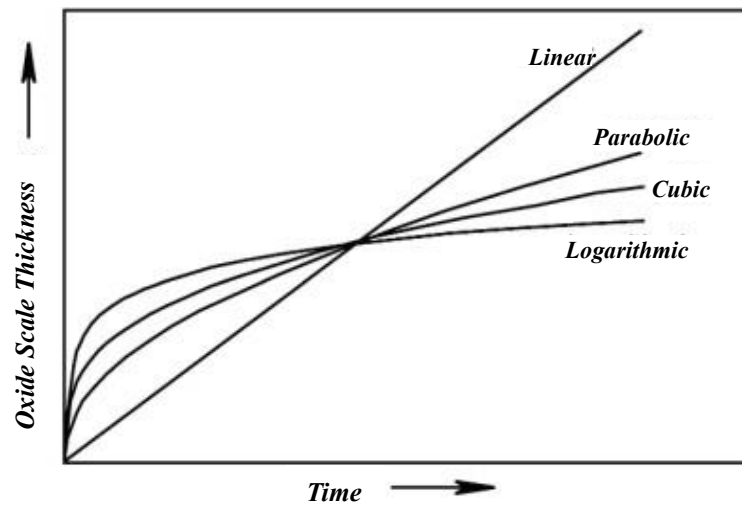
Oksidasi adalah proses di mana material dapat bereaksi dengan unsur oksigen untuk membentuk lapisan oksida. Proses ini dapat mempengaruhi sifat mekanis dan penampilan material tentunya. Oksidasi dapat mengurangi ketahanan material seperti korosi, keausan dan juga kegetasan yang berlebih (membuat material menjadi rapuh). Dalam kata lain, oksidasi dapat menyebabkan degradasi pada material. Ketahanan akan oksidasi sangatlah penting karena untuk menjaga kinerja material. Ketahanan ini dapat dilakukan dengan memodifikasi material khususnya pada struktur mikronya dengan cara melakukan perlakuan panas.



Gambar 2.11 Perbandingan Berbagai Sampel Dengan Pertambahan Berat [17].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Sharifi tahun 2019 yang berjudul “*The Effect Of Different Heat Treatment Cycle On Hot Corrosion And Oxidation Behavior Of Ti-6Al-4V*” [17] melakukan penelitian pengujian oksidasi dengan temperatur 750°C pada sampel Ti-6Al-4V dengan berbagai perlakuan panas. Pada sampel 1 (S1) tanpa dilakukannya perlakuan panas (*as-cast*), sampel 2 (S2) dilakukan *solution treatment* dengan temperatur 800°C selama 1 jam, sampel 3 (S3) dilakukan *solution treatment* dengan temperatur 950°C selama 1 jam, dan sampel 4 (S4) dilakukan *solution treatment* dengan temperatur 1.050°C selama 1 jam serta *aging treatment* dengan temperatur 550°C selama 4 jam. Hasil menunjukkan bahwa sampel dengan perlakuan ST + AT lebih baik dibandingkan sampel lain, dikarenakan pertambahan berat yang paling kecil. Hal itu menunjukkan bahwa ketebalan lapisan oksidanya juga paling tipis dibandingkan sampel lain.

2.11 Laju dan Kinetika Oksidasi



Gambar 2.12 Variasi laju reaksi oksidasi [42].

Umumnya hukum laju untuk oksidasi logam adalah linier, parabola dan logaritmik. Laju linier adalah konstan terhadap waktu dan tidak dipengaruhi oleh jumlah gas atau logam. Laju parabola biasanya terdapat pada temperatur tinggi dan lajunya terus meningkat selama proses oksidasi. Laju logaritmik biasanya pada temperatur dibawah 300 – 400 °C, laju reaksi awalnya sangat cepat, dan turun ke laju yang rendah. Studi menunjukkan bahwa oksidasi terjadi secara bersamaan melalui dua mekanisme, salah satunya dominan pada waktu awal dan yang lain setelah waktu oksidasi berjalan cukup lama [43]. Selain itu, ada juga laju kubik yang terdiri dari kombinasi laju logaritmik dengan laju parabola dan terjadi pada temperatur rendah. Secara umum kinetika oksidasi temperatur tinggi dengan memvariasikan temperatur dan waktu menggunakan persamaan berikut [44]:

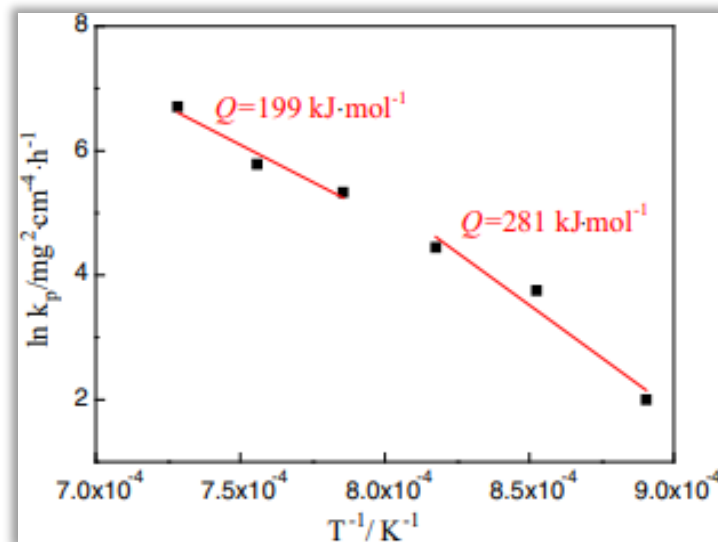
$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p \cdot t \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\theta = t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots \dots \dots (2.2)$$

Adapun keterangannya yaitu ΔW merupakan pertambahan berat, A adalah luas permukaan benda uji, k_p adalah konstanta laju oksidasi, t adalah waktu oksidasi, dan n sebagai eksponen laju. Untuk menentukan nilai n , didapatkan *slope* dari kurva $\ln \Delta W$ per $\ln t$. Menurut Dong et.al, pada dalam penelitiannya menyatakan bahwa kinetika oksidasi dari paduan Ti-6Al-4V diperkirakan mengikuti persamaan parabola [44]. Selain itu, nilai energi aktivasi oksidasi dibawah dan diatas yang didapatkan dari paduan Ti-6Al-4V yang diberikan perilaku oksidasi dengan temperatur tinggi (850 °C dan 1100 °C) sebesar 281 dan 199 kJ/mol.

Tabel 2.2 Eksponen Laju n dan K_p Ti-6Al-4V [44].

Temperatur (°C)	1100	1050	1000	950	900	850
n	1,7	2,2	1,8	1,5	1,1	1,7
Kp						
(mg²/cm⁴.h)	816	324	206	85	43	7



Gambar 2.13 Kurva Arrhenius Konstanta Laju Parabola K_p Ti-6Al-4V [44].

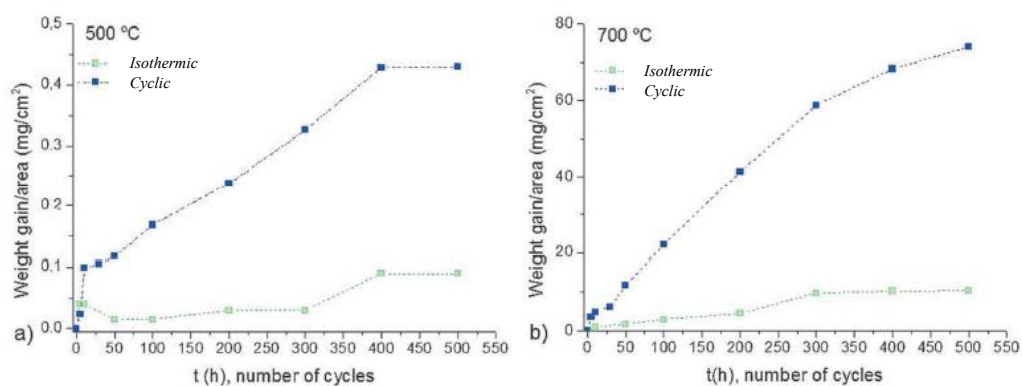
2.12 Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V adalah paduan titanium *alpha-beta* yang sangat populer dan banyak digunakan. Paduan ini adalah paduan titanium yang paling umum digunakan secara komersial. Produksinya mencakup lebih dari 50% total produksi paduan titanium di seluruh dunia. Penamaan tersebut mencerminkan daripada komposisi kimianya, dimana paduan ini terdiri dari 6% unsur aluminium (Al), 4% unsur vanadium (V), dan sisanya titanium (Ti).

Ti-6Al-4V memiliki kombinasi sifat yang sangat baik, seperti kekuatan yang baik dan ketahanan terhadap korosi. Ti-6Al-4V dapat diterapkan secara luas diberbagai bidang seperti dirgantara, otomotif, kelautan dan biomedis. Dalam aplikasi *aerospace*, Ti-6Al-4V terutama digunakan untuk pembuatan komponen mesin dirgantara, seperti *fan discs*, *compressor discs*, *blades*, dan *stators*. Dimana komponen tersebut bekerja pada temperatur maksimum tidak melebihi 300-350 °C.

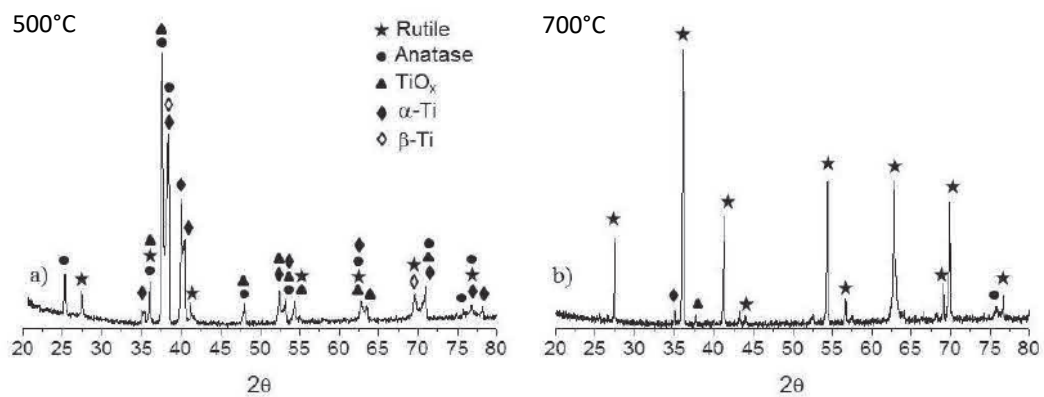
Keterbatasan temperatur ini berkaitan erat dengan oksidasi nyata ketika paduan titanium terpapar pada temperatur tinggi di lingkungan yang mengandung oksigen [9].

Oksidasi berlangsung sebagai dua reaksi secara bersamaan yang melibatkan yaitu pembentukan lapisan oksida TiO_2 yang tipis (5-10 nm) pada permukaan dan difusi oksigen ke dalam logam utama. Lapisan yang diperkaya oksigen biasanya disebut sebagai *alpha-case*. *Alpha-case* berasal dari oksigen yang mengendap dalam logam, oksigen adalah elemen penstabil α yang kuat dan kandungannya yang tinggi dalam titanium dan paduannya mendorong peningkatan temperatur β -transus [9]. Dalam jurnal Fargas *et al.*, 2017, melakukan percobaan uji oksidasi siklik dengan sampel Ti-6Al-4V. Uji oksidasi siklik dilakukan pada dua temperatur yaitu 500°C dan 700°C . Selain itu, uji oksidasi siklik juga dilakukan dengan satu siklus selama 1 jam dan 15 menit pendiginan temperatur kamar. Jumlah siklusnya adalah 5, 10, 50, 100, 200, 300, 400 dan 500. Gambar 2.14 berikut adalah hasil dari uji oksidasinya.



Gambar 2.14 Uji Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V [9].

Pada temperatur 500°C pertambahan berat maksimum per area kurang dari 0,5 mg/cm², sedangkan pada temperatur 700°C mencapai hampir 80 mg/cm². Seperti pada jurnal, untuk kedua temperatur, perlakuan siklik menyebabkan peningkatan pertambahan berat yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan isothermal. Perbedaan lebih nyata dapat terlihat untuk sampel yang terkena temperatur 700 °C dibandingkan 500°C [9]. Dapat dikatakan bahwa, semakin tinggi temperatur uji maka semakin banyak juga pertambahan berat oksida yang akan terbentuk nantinya.



Gambar 2.15 Hasil Uji XRD Setelah Uji Oksidasi Siklik [9].

Dari hasil uji oksidasi juga dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan diantara temperatur 500°C dan 700°C. Pada temperatur 500°C terdapat lima fasa atau bentuk kimia yang dapat terbentuk yaitu TiO₂ dalam bentuk *rutile* dan *anatase*, TiO_x, α-Ti, dan β-Ti. Keberadaan fase α dan β-Ti disebabkan oleh penetrasi sinar-X melalui skala oksida (<5 μm) ke dalam substrat paduan. Fasa tertinggi (terbanyak) pada 500°C yaitu TiO₂ dalam bentuk *anatase* dan TiO_x. Sedangkan pada 700°C hanya

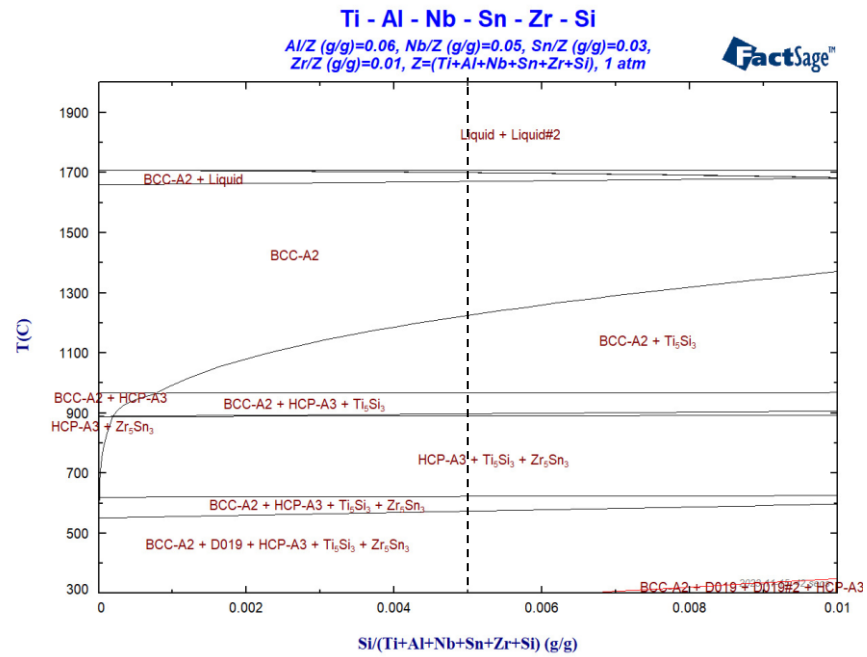
terdapat tiga fasa saja yaitu TiO_2 dalam bentuk *rutile*, TiO_x , dan $\alpha\text{-Ti}$. Fasa tertinggi (terbanyak) pada 700°C yaitu TiO_2 dalam bentuk *rutile* [9].

2.13 Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Skripsi ini bertujuan untuk menginvestigasi potensi paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si sebagai material yang memiliki ketahanan oksidasi tinggi pada temperatur tinggi. Dengan mempertimbangkan kombinasi unsur paduan seperti Al, Nb, Sn, Zr, dan Si. Unsur Al dapat membentuk Al_2O_3 . Lapisan ini secara efektif dapat menghambat difusi Ti dan oksigen secara signifikan meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan titanium dan titanium aluminida. Unsur Nb dapat menyerap atom O untuk menahan difusi internal atom O. Unsur Sn berpengaruh terhadap penguatan lapisan TiN dan Ti_2AlN . Sejumlah kecil unsur Zr dapat menghaluskan partikel oksida karena mendorong nukleasi butir oksida, yang dapat menghambat difusi oksigen pada paduan titanium. Unsur Si dapat lebih memurnikan TiO_2 untuk terbentuk dan meningkatkan rasio Al_2O_3 [2].

Jika melihat dari unsur paduannya, paduan ini termasuk paduan titanium *near- α alloy*. Dalam literatur dikatakan bahwa paduan *near- α* mengandung sekitar 3-5% *stabilizer* β [30]. *Stabilizer* β pada paduan ini yaitu hanya unsur Nb dan berkadar 5%. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan paduan yang memiliki struktur mikro yang optimal dan sifat mekanik yang baik. Penggunaan paduan ini diindikasikan sebagai salah satu solusi untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi, dengan potensi untuk meningkatkan kinerja material dalam kondisi operasional ekstrem. Berikut adalah diagram fasa dari

paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si yang dibuat melalui aplikasi *FactSage Education*.



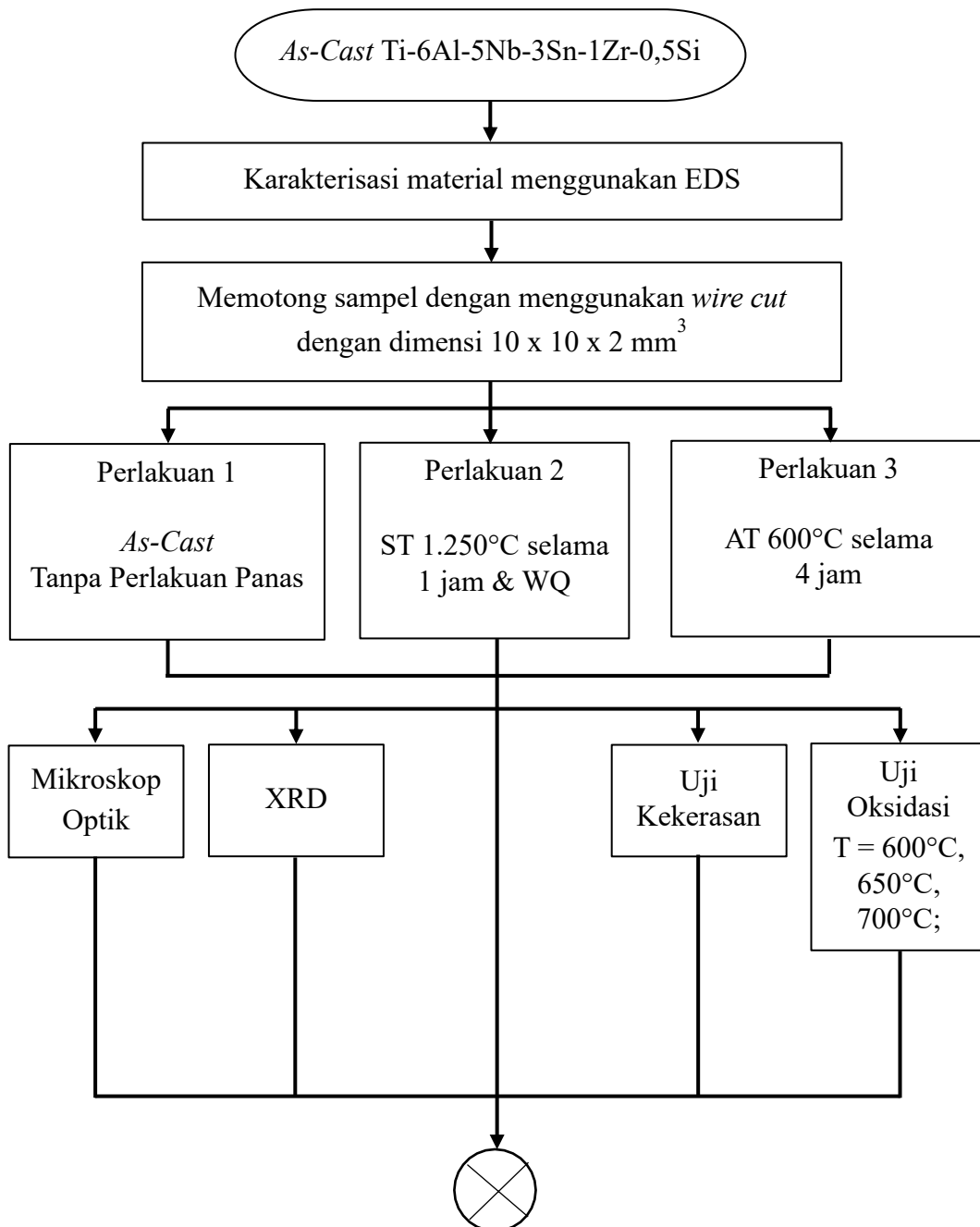
Gambar 2.16 Diagram Fasa Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (*FactSage*)

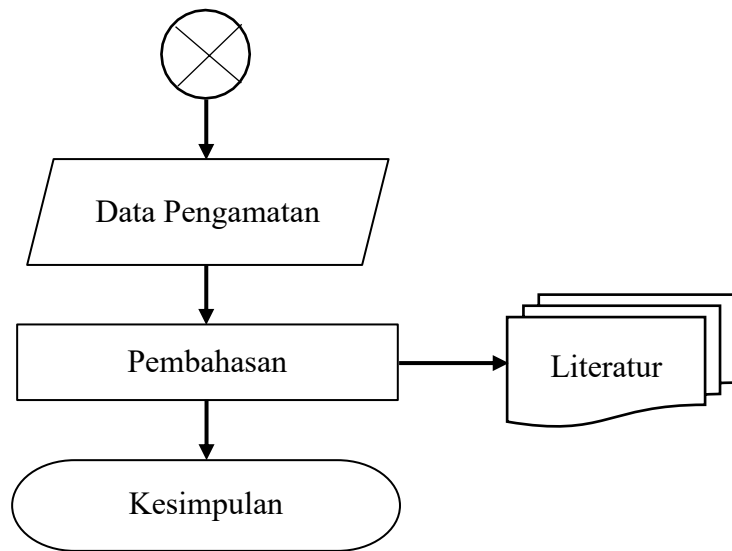
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut adalah diagram alir penelitian kali ini yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut.

- a. Cawan *Crusible* Porselen
- b. Cawan Petri
- c. Cetakan *Mounting*
- d. *Dryer*
- e. *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) JEOL JSM-6390A
- f. Gelas Kimia
- g. Jangka Sorong
- h. Mesin *Grinding* dan *Polishing*
- i. Mesin Bubut
- j. Mikroskop Optik OLYMPUS

- k. *Muffle Furnace*
- l. Neraca Digital
- m. *Scanning Electrode Microscope* (SEM) JEOL JSM-6390A
- n. Tang Penjepit
- o. *Tube Furnace*
- p. *Vacuum Arc Remelting* (VAR) *Furnace*
- q. *Wire cut*
- r. *Vicker's Microhardness* Mitutoyo HM-200
- s. *X-Ray Diffraction* (XRD).

3.2.2 Bahan

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut.

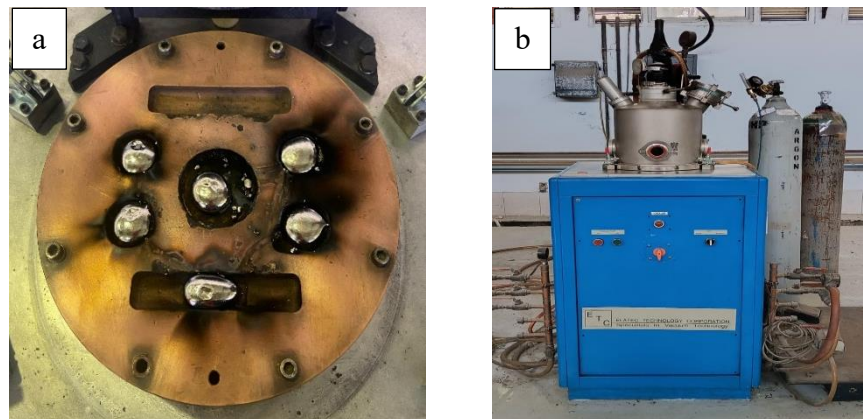
- a. Air Dingin
- b. *As-cast* Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si
- c. *As-cast* Ti-6Al-4V
- d. *Colloidal Silica*
- e. Etanol
- f. Gas Argon
- g. *Hardener*
- h. Kertas Amplas
- i. Larutan *Kroll* (5% HF, 15% HNO₃ , 80% H₂O)
- j. Resin Bening
- k. *Wool Polish*.

3.3 Prosedur Penelitian

Berikut adalah prosedur penelitian yang akan dilakukan.

3.3.1 Pembuatan Sampel Dengan Pengecoran

Beberapa logam pada paduan kali ini diketahui memiliki titik lebur yang sangat tinggi seperti unsur Ti sebesar 1.660°C , unsur Nb sebesar 2.477°C , unsur Zr sebesar 1.855°C , dan unsur Si sebesar 1.410°C . Salah satu *furnace* yang dapat meleburkan unsur-unsur tersebut ialah VAR *furnace*. *Furnace* ini bekerja dengan cara menempelkan (bersentuhan langsung) elektroda dengan logam-logam yang ingin dipadukan. Prinsip kerja *furnace* ini mirip seperti pada prinsip pengelasan GTAW. *Furnace* ini bekerja dalam lingkungan vakum yang dimana terdapat hembusan gas argon, yang berarti tidak ada udara atau gas lainnya disekitarnya. Hal ini membantu menghindari kontaminasi dari oksigen dan nitrogen yang dapat terlarut dalam logam pada temperatur tinggi. Karena apabila oksigen dan nitrogen larut kedalam paduan, dapat mengakibatkan sebuah penggetasan ataupun *pores* (lubang). Bersamaan dengan itu, dialirkan air pendingin pada *copper mold* (wadah tempat logam dileburkan atau dilelehkan) untuk mempercepat proses solidifikasi sehingga terhindar dari terjadinya sampel teroksidasi dengan udara ketika *furnace* dibuka dan juga menghindari wadah tersebut dari pelelehan karena *copper* atau tembaga hanya memiliki titik lebur sebesar 1.085°C .



Gambar 3.2 a) *As-Cast*, b) *Vacuum Arc Remelting (VAR) Furnace*

3.3.2 Karakterisasi Komposisi Sampel Dengan EDS

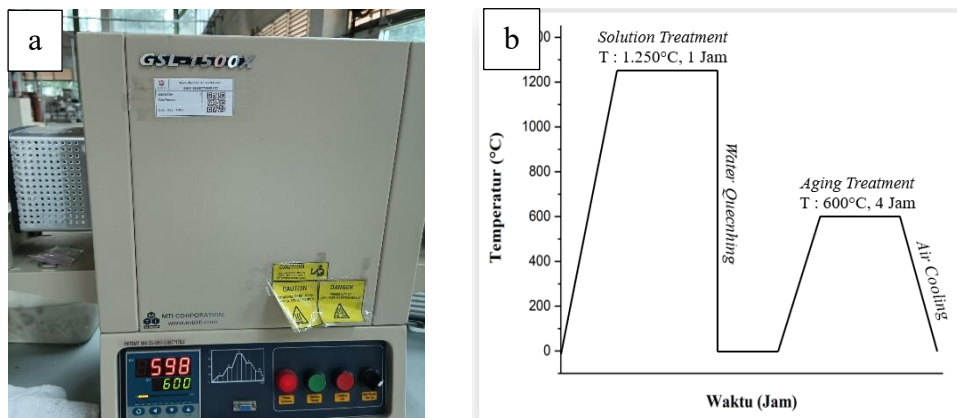
Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) adalah salah satu teknik analisis untuk menganalisis unsur atau karakteristik kimia dari spesimen. Setelah sampel berhasil dibuat, maka selanjutnya adalah karakterisasi sampel tersebut. Karakterisasi pertama yaitu untuk mengetahui komposisi yang homogen dan sesuai dengan variasi komposisi paduan yang diharapkan untuk dapat dilanjutkan pada proses berikutnya. Prinsip dasar EDS ialah dengan merangsang emisi sinar energi tinggi (elektron, proton, atau sinar-X) yang difokuskan pada sampel. Hal ini mengeksitasi dan mengeluarkan elektron dari kulit dalam atom dan menciptakan lubang. Elektron dari kulit luar mengisi lubang, dan energi sinar-X yang dihasilkan diukur untuk menentukan perbedaan energi antara dua kulit, memungkinkan pengukuran komposisi unsur spesimen [45]. EDS dipilih karena memiliki kemampuan untuk analisis multi-unsur dalam satu waktu, pengukuran yang tinggi, dan kemampuan untuk menentukan kadar dari suatu paduan.



Gambar 3.3 EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*)

3.3.3 Proses Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

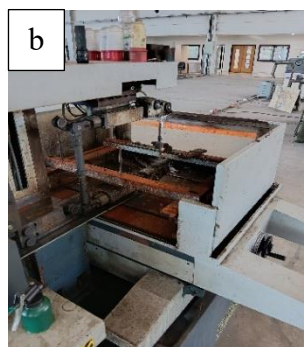
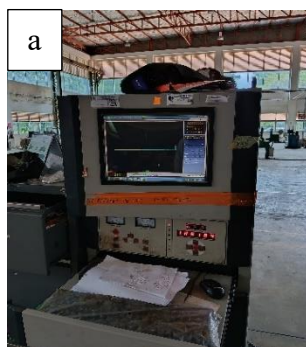
Perlakuan panas (*heat treatment*) dilakukan pada dua sampel saja. Proses *heat treatment* yang dilakukan yaitu *solution treatment* (ST) dan *aging treatment* (AT). ST dilakukan pada temperatur 1.250°C selama 1 jam, dikarenakan pada temperatur tersebut paduan ini sudah melewati T_{β} yang dapat dilihat pada gambar 2.19, lalu mendinginkannya dengan cepat (*quenching*) dan AT dilakukan pada 600°C selama 4 jam lalu mendinginkannya dengan cukup lambat (pendinginan udara). *Heat treatment* dilakukan dengan menggunakan *tube furnace*.



Gambar 3.4 a) *Tube Furnace*, b) Skema Perlakuan Panas

3.3.4 Pemotongan Sampel Dengan *Wirecut*

Selanjutnya ialah dilakukan pemotongan sampel dengan mesin *wirecut*. Mesin *wirecut* adalah metode pemotongan sampel menggunakan alat berbasis *wire* (kawat) yang dioperasikan secara otomatis. *Wirecut* digunakan untuk persiapan sampel dengan dimensi $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$ yang diperlukan untuk berbagai jenis pengujian selanjutnya seperti analisis mikrostruktur dan uji mekanik. Sebelum memulai operasi pemotongan, dilakukan pembuatan pola terlebih dahulu pada komputer. Mesin *wire cut* beroperasi dengan menghidupkan sumber tegangan listrik, yang menyebabkan kawat sebagai anoda (kutub negatif) dan sampel uji sebagai katoda (kutub positif). Pada saat percikan bunga api listrik timbul diantara kawat dan sampel uji, cairan dielektrik yang diberikan dan mengalami proses deionisasi. Selanjutnya, percikan ini melelehkan dan menguapkan sampel uji sesuai dengan pengaturan alat. Sampel yang meleleh akan membentuk kepingan dan dapat dibuang, sedangkan fluida dielektrik yang telah terionisasi dapat difiltrasi untuk digunakan kembali. Pemotongan sampel dengan presisi menggunakan mesin *wire cut*.



Gambar 3.5 a) Komputer *Wire-Cut*, b) Mesin *Wire-Cut*, c) Sampel

3.3.5 Pengamatan dan Analisa Metalografi

Pengamatan metalografi dilakukan bertujuan untuk mengetahui karakteristik morfologi fasa (struktur mikro) yang terbentuk pada sampel. Pengamatan ini dilakukan pada sampel *as-cast* dan sampel hasil perlakuan panas. Tujuannya ialah untuk melihat perbedaan diantara sampel tersebut. Pengamatan metalografi ini dilakukan menggunakan mikroskop optik OLYMPUS (Gambar 3.6).



Gambar 3.6 Mikroskop Optik OLYMPUS

Adapun tahapan dari pengamatan metalografi pada semua sampel adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan pengamplasan sampel dengan menggunakan *grinding machine* dengan amplas grit #240 , #400, #600, #800, #1000, #1200, #1500, #2000 dan #3000. *Grinding* dilakukan dengan menggunakan grit kasar terlebih dahulu, lalu menggunakan grit

- halus untuk meminimalisir *scratch* (goresan) yang terlalu tampak oleh mata dan untuk memudahkan pada proses *polishing*.
- b. Melakukan pemolesan (*polishing*) menggunakan *polishing machine* dengan larutan *colloidal silica*. *polishing* untuk menghilangkan goresan atau noda yang menempel pada sampel dan juga untuk pengkilapan dan penghalusan sampel. *Colloidal Silica* terbuat dari 70% *Oxide Polishing Suspensions* (OP-S) *NonDry* dan 30% *Hydrogen Peroxide* (H_2O_2).
 - c. Melakukan pengikisan permukaan sampel (*etching*) dengan menggunakan campuran larutan asam nitrat dan asam flourida; 5% HF, 15% HNO_3 dan 80% H_2O selama $\pm 10-20$ detik.
 - d. Melakukan pengamatan sampel dengan mikroskop optik Olympus dengan perbesaran 10x, 20x, dan 50x.

3.3.6 Karakterisasi Fasa Sampel Dengan XRD

Pengujian *X-ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal yang terbentuk dan menentukan struktur kristal dari logam. Dalam kata lain, XRD digunakan untuk menganalisis komposisi, ukuran butir, dan orientasi kristal dari logam yang diujikan. Pada penelitian kali ini dilakukan dua kali pengujian XRD yaitu sebelum pengujian oksidasi yang dilakukan untuk melihat perbedaan besaran fasa α dan fasa β karena pastinya dipengaruhi oleh perbedaan *heat treatment* (perlakuan panas) pada sampel, dan juga setelah pengujian oksidasi yang

dilakukan untuk melihat lapisan oksida apa saja yang terbentuk pada permukaan logam. Ini penting karena perbedaan lapisan oksida akan mempengaruhi sifat mekanik ataupun ketahanan dalam temperatur tinggi dari sebuah sampel. Prinsip kerja dari XRD yaitu sinar-X yang terdifraksi, berturut-turut dibentuk oleh atom-atom kristal dari material tersebut. Dengan munculnya berbagai sudut yang timbul, pola difraksi yang terbentuk menyatakan karakterisasi dari sampel [46].

Sebelum pengujian XRD ini dilakukan, pastinya sampel harus dilakukan preparasi terlebih dahulu yaitu *grinding*. *Grinding* dilakukan dengan menggunakan mesin *grinding* untuk meratakan permukaan sampel. *Grinding* dilakukan hanya sampai grit #1000. Kemudian sampel nantinya diletakkan di dalam alat XRD dilakukan pada tegangan 40 kV dan 30 mA. Material anoda yang digunakan yaitu logam tembaga atau *copper* (Cu). Setelah mendapatkan data dari setiap sampel yang ada, sampel dianalisa pada sudut 20° - 90° menggunakan *software HighScorePlus*. Kemudian grafik dibuat menggunakan *software origin*.

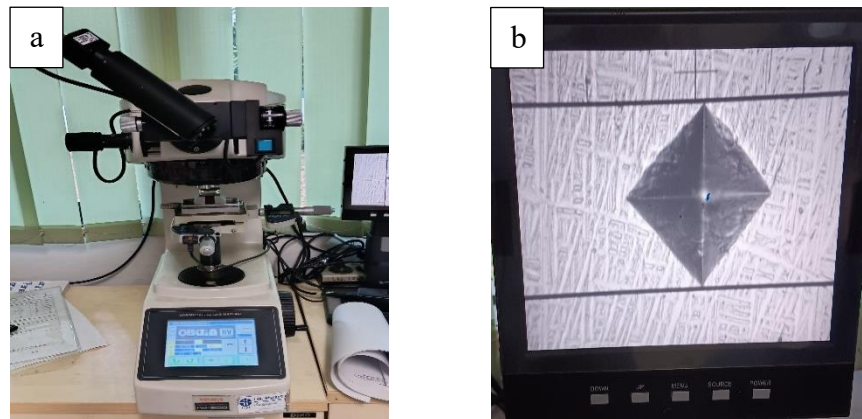
3.3.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah proses yang digunakan untuk menentukan seberapa tahan sebuah sampel terhadap pembebanan yang diterapkan pada sampel. Tujuannya adalah untuk melihat ketahanan material terhadap kerusakan atau perubahan bentuk yang disebabkan oleh tekanan atau goresan. Alat yang digunakan dalam pengujian kekerasan ini

menggunakan mesin uji kekerasan *vicker's* dengan indenter berupa intan (*diamond*). Pengujian ini dilakukan sesuai dengan standar ASTM-E384.

Pengujian kekerasan metode *vicker's* ini dipilih karena alat ini mampu mendeteksi kekerasan material dengan rentang kekerasan material yang sangat tinggi yaitu sekitar 5 – 1500 HV. Pengujian *vicker's* menggunakan indenter piramida intan yang dasarnya membentuk bujur sangkar. Pengukuran kekerasan *vicker's* ini dilakukan dengan penekanan dengan sudut 136^0 dan gaya F tertentu selama waktu tertentu. Goresan yang dihasilkan nantinya akan berbentuk piramid, yang kemudian dapat diketahui dua diagonal yang berbeda panjang.

Pengujian ini dilakukan pada semua sampel. Tujuannya ialah untuk melihat perbedaan antar sampel, baik itu sampel *as-cast* ataupun dengan sampel yang mengalami perlakuan panas dan juga sampel pembanding yaitu sampel Ti-6Al-4V. Pengujian ini juga dilakukan sebanyak dua kali nantinya, yaitu sebelum pengujian oksidasi dan setelah pengujian oksidasi. Tujuan lainnya juga ialah untuk mengevaluasi ataupun melihat perbedaan nilai kekerasannya sebelum dan sesudah pengujian oksidasi dilakukan pada setiap sampel.



Gambar 3.7 a) Mesin Kekerasan *Vickers*, b) Area Pembebanan

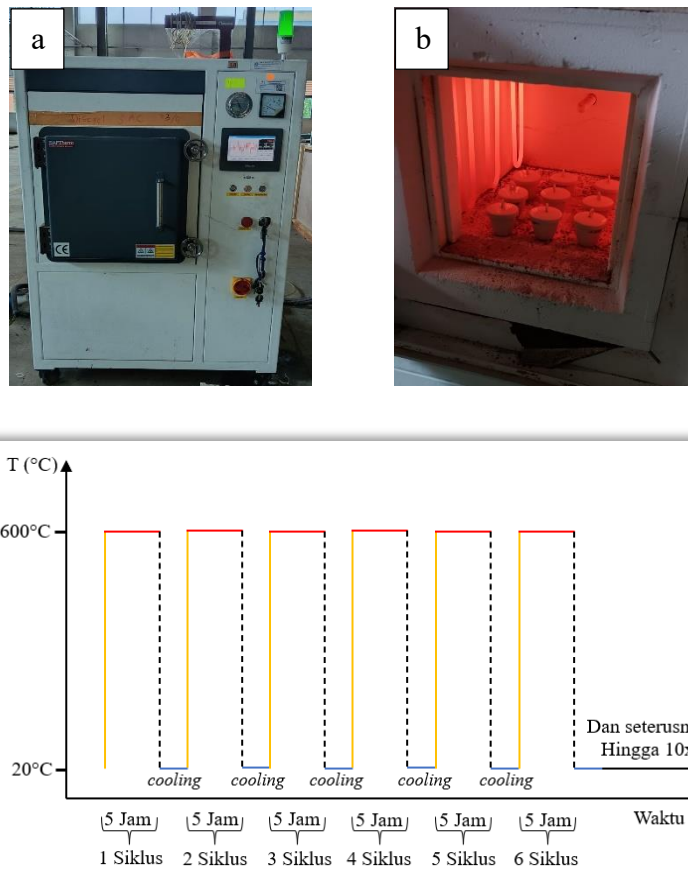
Adapun langkah-langkah dalam melakukan pengujian kekerasan dengan menggunakan mesin uji kekerasan *vicker's* adalah sebagai berikut :

- a. Tentukan area mana yang ingin diujikan pada sampel ;
- b. Letakkan sampel pada meja kerja kemudian nyalakan alat. Putar lensa mikroskop pada permukaan sampel yang ingin diuji ;
- c. Atur ketinggian meja kerja dengan sampel, kemudian sesuaikan tingkat fokus permukaan uji yang dapat dilihat pada layar monitor *display* sambil menyesuaikan tinggi meja kerja. Atur gaya yang diberikan sebesar 1F dan waktu pembebanan selama 12 detik ;
- d. Tekan tombol *Start*, lalu indenter akan bergerak dan memberikan pembebanan pada sampel ;
- e. Putar kembali mikroskop sehingga lensa dapat membaca wilayah yang diberikan pembebanan. Pastikan area yang mengalami pembebanan sudah berbentuk piramid (bujur sangkar), apabila belum maka dikatakan gagal dan harus dilakukan ulang ;

- f. Alat pengujian *vicker's* ini terdapat bagian *encoder*. *Encoder* digunakan untuk mengukur diagonal hasil penekanan. Terdapat dua diagonal yaitu diagonal vertikal dan horizontal, masing-masing diukur dengan melalui satu klik tombol ;
- g. Hasil pengukuran kekerasan *Vicker's* ini akan dihitung dan terbaca secara otomatis pada monitor, terdapat dua nilai kekerasan yaitu dalam HV dan HRC ;

3.3.8 Pengujian Oksidasi

Pengujian oksidasi adalah proses untuk memahami material logam terhadap lingkungan yang mengandung oksigen pada temperatur tinggi. Tujuan utamanya adalah untuk memahami seberapa baik atau seberapa buruk logam tersebut (kali ini menggunakan paduan logam titanium) bertahan terhadap oksidasi yang dapat menyebabkan degradasi. Degradasi ini dapat berupa retak, korosi, penggetasan, dan lainnya. Pengujian oksidasi kali ini dilakukan selama 50 jam dan pemanasan dilakukan per 5 jam (per-siklus). Setelah dilakukan pemanasan selama 5 jam, maka sampel ditimbang terlebih dahulu untuk melihat seberapa besar pertambahan beratnya (oksidanya), kemudian ulangi pemanasan lagi hingga 50 jam. Setelah 50 jam sampel akan diambil untuk dianalisis lebih lanjut nantinya.



Gambar 3.8 a) *Muffle Furnace*, b) Pengujian Oksidasi, c) Skema Pengujian

Adapun langkah-langkah dalam melakukan pengujian oksidasi adalah sebagai berikut :

- Melakukan penimbangan sampel terlebih dahulu untuk mengetahui perbedaan antara sebelum pengujian oksidasi dan sesudah pengujian oksidasi ;
- Mengatur *furnace* pada monitor agar sesuai dengan temperatur yang diinginkan ;
- Memasukan sampel pada *muffle furnace* dengan menggunakan tang penjepit dan pemanasan dilakukan selama 5 jam ;

- d. Setelah 5 jam, maka keluarkan sampel dengan menggunakan tang penjepit dan dilakukan pendinginan dengan udara ;
- e. Melakukan analisis dengan melihat perbedaan warna pada sampel sebelumnya dan melakukan penimbangan ulang untuk melihat perbedaan massanya (perubahan berat oksidanya).
- f. Pengujian dilakukan ulang hingga 10x (50 jam) lamanya.

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data Komposisi Hasil Pengecoran

Penelitian kali ini menggunakan material yang dihasilkan dari proses pengecoran khusus dengan menggunakan alat *Vacuum Arc Remelting* (VAR) *Furnace*. *Furnace* ini dipilih karena prosesnya dapat dilakukan dalam lingkungan yang hampa udara (vakum). Dimana nantinya akan dihembuskan gas argon yang membantu menghindari kontaminasi dari oksigen (O_2) dan nitrogen (N_2) yang dapat terlarut dalam logam pada saat dilakukannya pengecoran. Proses pengecoran ini menggunakan *raw material* berupa *shot* titanium dan titanium *block*, *shot* aluminium, niobium *wire*, timah *block*, zirkonium, dan silikon.

Dalam prosesnya niobium dileburkan terlebih dahulu dengan ditamhkannya sedikit titanium, karena niobium memiliki titik lebur yang sangat tinggi yaitu sebesar $2.477^{\circ}C$. Hal ini dilakukan karena untuk membentuk paduan eutektik. Paduan eutektik adalah campuran dua atau lebih unsur yang memiliki titik leleh lebih rendah daripada masing-masing unsur murni (menurunkan *melting point*) [47]. Pembuatan sampel telah dilakukan sebanyak 5 kali *remelting* dengan tujuan agar paduan lebih homogen (terdistribusikan secara merata semua unsurnya). Setelah pengecoran, komposisi kimia sampel dianalisis menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS). Tabel 4.1 dibawah merupakan data hasil dari pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan di Pusat Riset Metalurgi BRIN, Serpong, Tangerang Selatan.

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Paduan *As-Cast* Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Material	Elemen (%wt)					
	Ti	Al	Nb	Sn	Zr	Si
Ti-6Al-5Nb- 3Sn-1Zr-0,5Si	Bal.	4,0675	4,085	2,7725	0,45	0,4325

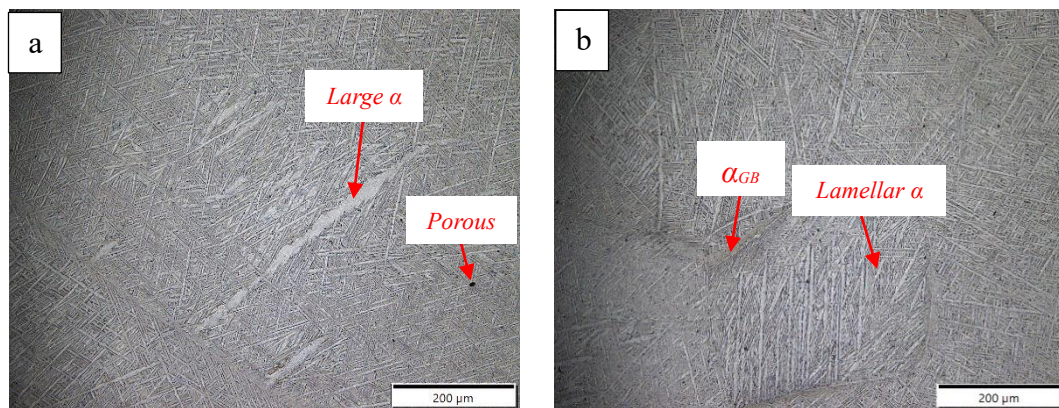
Pengujian EDS dilakukan sebanyak 4 kali karakterisasi dengan perbedaan pengambilan titik pada sampel dan perhitungan dilakukan dengan merata-ratakan pada semua titik tersebut. Didapatkan data kandungan unsur-unsur yang terdapat pada tabel 4.1 diatas. Dari hasil didapatkan bahwa terdapat beberapa kesalahan, dimana seharusnya Al sebesar 6%, Nb sebesar 5%, Sn 3%, Zr 1%, dan Si 0,5%. Hal ini mungkin terjadi dikarenakan berhamburnya leburan sampel di luar cetakan hingga dapat terjadi ledakan kecil di dalam VAR *Furnace*, apabila kuat arus yang digunakan terlalu besar maka semakin panas. Penyebab selanjutnya dapat terjadi karena beberapa unsur dapat menguap pada temperatur tinggi. Aluminium dan timah misalnya, memiliki titik didih yang lebih rendah dibandingkan unsur lainnya dalam paduan, sehingga dapat menguap sebagian selama proses pengecoran.

4.2 Pengamatan Struktur Mikro

Sampel paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dilakukan pengamatan dan analisis metalografi untuk melihat struktur mikro yang terbentuk. Pengamatan dan analisis ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik OLYMPUS. Pengamatan ini juga untuk membandingkan antara sampel *as-cast* dengan sampel

yang dilakukan perlakuan panas berupa *solution treatment* dan sampel *aging treatment*. *Solution treatment* dilakukan pada temperatur 1.250°C selama 1 jam dan dilakukan pendinginan cepat (*quenching*) dan *aging treatment* dilakukan pada temperatur 600°C dan dilakukan pendinginan dengan udara bebas (*air cooling*).

4.2.1 Pengamatan Struktur Mikro Hasil *As-Cast*



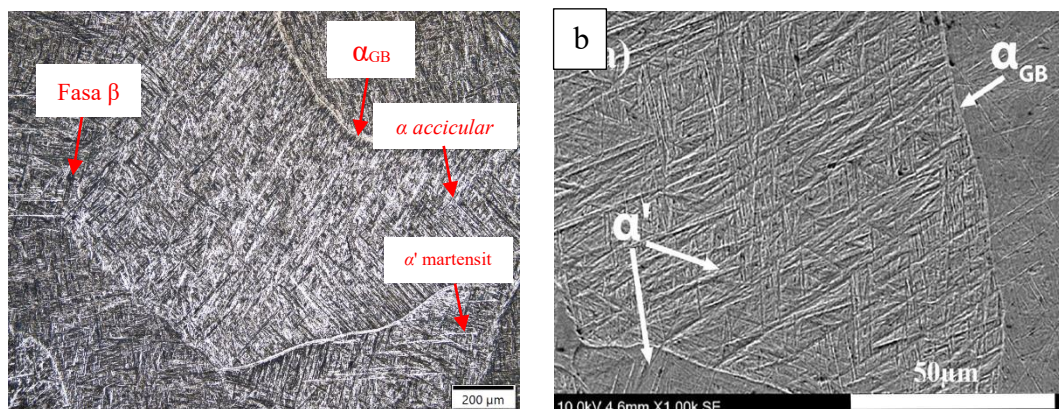
Gambar 4.1 Struktur Mikro *As-Cast* Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dibawah mikroskop optik. Dapat diamati bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki struktur mikro fasa α dengan bentuk *lamellar* yang berwarna terang, serta terdapat juga α_{GB} (*alpha grain boundary*) yang cukup jelas. Dikarenakan setelah pengecoran sampel harus dinginkan secara lambat, maka fase β memiliki cukup waktu untuk bertransformasi ke fasa α . Fasa α yang baru terbentuk biasanya mulai tumbuh di sepanjang batas butir β [48]. Pendinginan yang lebih lanjut menyebabkan fasa α melanjutkan pertumbuhannya dan menyebar di sepanjang batas butir β , membentuk batas butir α (α_{GB}). Dalam kata lain,

struktur mikro *as-cast* ini terdiri dari butir-butir fasa α yang dikelilingi oleh α_{GB} . Terdapat juga butiran α berbentuk lebar yang disebut dengan *large α* .

Dalam gambar juga menunjukkan bahwa tidak terdapat fasa β yang terdeteksi oleh mikroskop optik. Hal ini dikarenakan terdapatnya banyak unsur penstabil fasa α seperti aluminium (Al), timah (Sn), dan zirkonium (Zr) [49]. Unsur-unsur tersebut juga yang berperan untuk mendukung pembentukan dan pertumbuhan fasa α . Selain itu, terdapat adanya *porous* (lubang) yang terbaca pada permukaan sampel, *porous* ini disebabkan akibat hasil dari pengecoran yang dapat menyebabkan terjadinya retakan (*crack*) didalamnya.

4.2.2 Pengamatan Struktur Mikro Hasil Perlakuan Panas

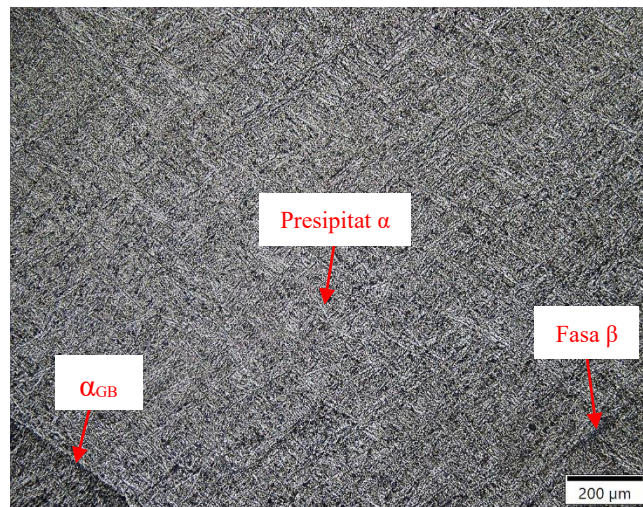


Gambar 4.2 Struktur Mikro Paduan : a) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *Solution Treatment* , b) Ti-6Al-4V *Solution Treatment* [50].

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dengan dilakukannya perlakuan panas berupa *solution treatment* dibawah mikroskop optik. Dapat diamati bahwa struktur

mikro yang terbentuk setelah dilakukan *solution treatment* pada temperatur 1.250°C selama 1 jam dan kemudian didinginkan cepat (*quenching*) adalah fasa α dan β . Ini ditunjukkan dengan perbedaan warnanya yaitu warna terang (α) dan warna gelap (β). Berbeda dari struktur mikro pada *as-cast*, *solution treatment* menghasilkan sebagian kecil dari fasa β . Ini menjelaskan bahwa *solution treatment* mempengaruhi perubahan struktur mikro pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si.

Fasa α yang terbentuk antara lain adalah α dengan bentuk *accicular* dan α' dengan bentuk martensit (α' martensit), dan juga α_{GB} . Lalu, fasa β juga terbentuk. Hal ini disebabkan karena pendinginan cepat (*quenching*) hanya memberikan sedikit kesempatan butir untuk bertumbuh (*grain growth*) [51]. Selama *quenching* terjadi, fasa β dipertahankan karena sempitnya waktu untuk bertransformasi menjadi fasa α secara sempurna, yang akibatnya memunculkan fasa α' martensit yang berbentuk seperti jarum atau bilah tajam. Fasa α *acicular* terbentuk pada batas butir β (β_{GB}) yang dimana α *acicular* bernukleasi pada β_{GB} dan tumbuh kedalam bagian butir β (matriks β) selama pendinginan [52].



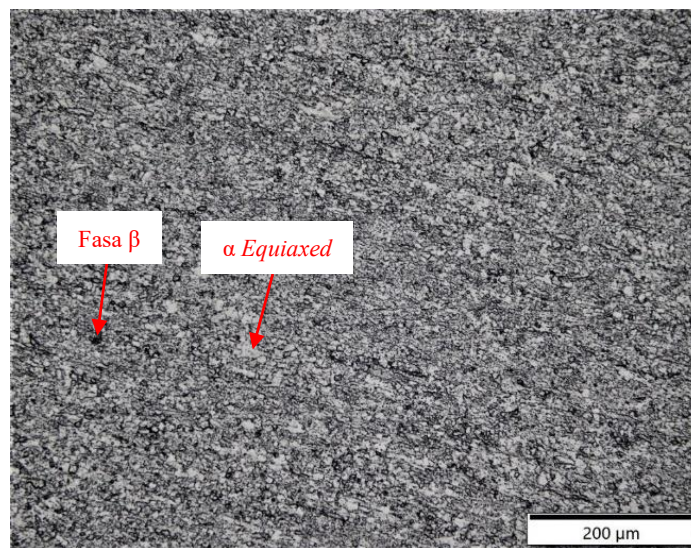
Gambar 4.3 Struktur Mikro Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *Aging Treatment*

Gambar 4.3 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dengan perlakuan panas berupa *aging treatment* dibawah mikroskop optik. Dapat diamati bahwa struktur mikro setelah dilakukan *solution treatment* dan dilakukan juga *aging treatment* pada temperatur 600°C selama 4 jam dan kemudian didinginkan dengan pendinginan udara (*air cooling*) menghasilkan fasa α dan β . Perbedaan fasa ini dapat dilihat melalui warnanya yaitu warna terang (α) dan warna gelap (β). Berbeda dari struktur mikro pada sebelumnya, *aging treatment* ini menghasilkan fasa β yang lebih banyak. Ini menjelaskan bahwa *aging treatment* juga mempengaruhi perubahan struktur mikro paduan.

Temperatur pemanasan *aging* yang tidak terpaut jauh dengan *range* temperatur β -transus, maka terjadi pembentukan butir α kembali yang diikuti dengan pertumbuhan α_{GB} (*alpha grain boundaries*). Fasa α yang terbentuk adalah α dengan bentuk *accicular* (pipih memanjang). Dimana

fasa α ini merupakan bentuk endapan (presipitat) fasa α di dalam matriks β . Presipitat ini disebut juga sebagai *secondary α phase* [53]. Selama proses *aging treatment* fasa β -*metastable* dapat dipertahankan. Dalam jurnal Lin tahun 2017, menjelaskan bahwa perubahan mikro struktur selama proses *aging treatment* adalah sebagai berikut : $\alpha' \rightarrow \alpha' + \beta \rightarrow \beta + \omega \rightarrow \beta + \alpha$ [54].

4.2.3 Pengamatan Struktur Mikro Ti-6Al-4V (Sampel Pembanding)



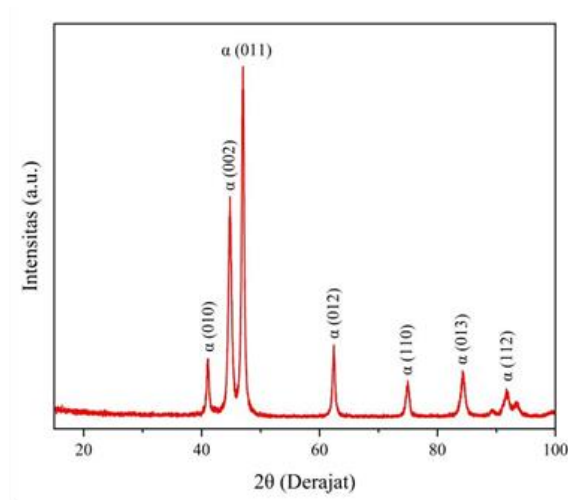
Gambar 4.4 Struktur Mikro *As-Cast* Paduan Ti-6Al-4V

Paduan Ti-6Al-4V di dalam penelitian kali ini digunakan sebagai sampel pembanding. Ini karena paduan Ti-6Al-4V merupakan paduan titanium yang komersial dan banyak digunakan dalam dunia industri, khususnya pada dunia *aerospace*. Gambar 4.4 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro *as-cast* paduan Ti-6Al-4V dibawah mikroskop optik. Dapat diamati bahwa paduan ini memiliki struktur mikro campuran antara fasa α dan fasa β . Fasa α ditunjukkan pada daerah yang berwarna

terang berbentuk *equiaxed* atau seperti bentuk bulat [55]. Sedangkan pada fasa β ditunjukkan pada daerah yang berwarna gelap dengan bentuk juga bulat. Campuran dua fase ini terjadi karena masing-masing memiliki unsur penstabilnya, yaitu penstabil fase α yang direpresentasikan oleh unsur aluminium (Al) dan penstabil fase β yang direpresentasikan oleh unsur vanadium (V), yang berperan dalam mempertahankan fase β agar tidak bertransformasi menjadi fase α .

4.3 Hasil Pengujian XRD Sebelum Perlakuan Oksidasi

Hasil dari analisis struktur mikro sebelumnya didukung oleh data dari hasil XRD. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dilakukan pengujian XRD pada sampel sebelum dan setelah dilakukan perlakuan panas. Analisis XRD dilakukan untuk melihat perubahan fasa yang terjadi setelah proses perlakuan panas *solution treatment* dan *aging treatment*. Pengujian XRD ini bersifat kualitatif dan hanya dapat mengidentifikasi fase-fase yang terbentuk pada permukaan sampel. Dalam analisis XRD didapatkan data-data yang mendukung seperti data struktur kristal, jenis fasa serta parameter kisi. Di bawah ini merupakan nilai parameter kisi yang didapatkan setelah data XRD diolah menggunakan software *HighScore Plus* dengan database *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) dan juga database *Crystallography Open Database* (COD).

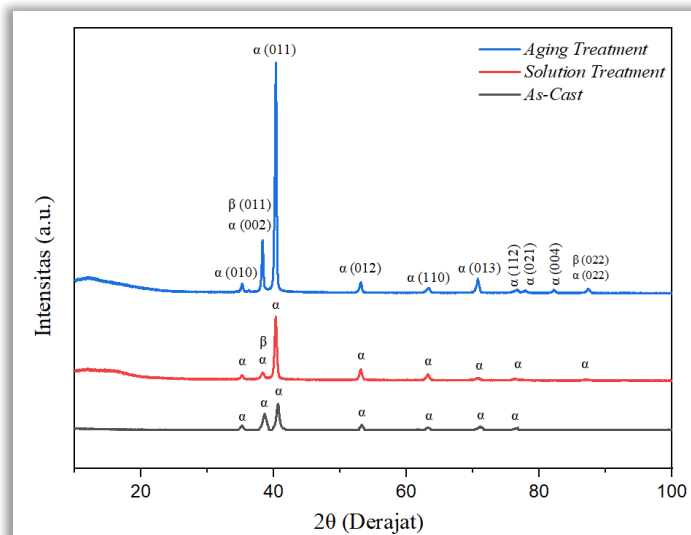


Gambar 4.5 Data XRD Sampel *As-Cast* Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Tabel 4.2 Hasil Analisis XRD Parameter Kisi Paduan

Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si.				
Parameter Kisi		<i>As-Cast</i>	<i>Solution Treatment</i>	<i>Aging Treatment</i>
Ti-α	a (Å)	2,9404	2,9378	2,9241
	b (Å)	2,9404	2,9378	2,9241
	c (Å)	4,6926	4,7693	4,6924
<i>Unit Cell</i> (Hexagonal)		a = b ≠ c		
Ti-β	a (Å)	-	3,3200	3,3110
	b (Å)	-	3,3200	3,3110
	c (Å)	-	3,3200	3,3110
<i>Unit Cell</i> (Cubic)		a = b = c		

Hasil dari analisis parameter kisi menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si ini memiliki perbedaan pada setiap sampelnya, dimana pada *as-cast* hanya memiliki fasa tunggal saja yaitu fasa α dengan intensitas 100%, namun pada *solution treatment* dan *aging treatment* memiliki dua fasa yaitu fasa α dan juga fasa β . Fasa α memiliki jenis struktur kristal berupa *Hexagonal Closed Packed* (HCP). Hal ini dapat dilihat dari *unit cell* yang membentuk pola $a = b \neq c$ yang berarti *hexagonal* atau dengan kata lain fasa α . Sementara fasa β memiliki jenis struktur kristal berupa *Body Centered Cubic* (BCC). Hal ini dapat dilihat dari *unit cell* yang membentuk pola $a = b = c$ yang berarti *cubic* atau dengan kata lain fasa β . Titanium paduan memiliki sifat *allotropy* dimana titanium paduan memiliki dua bentuk struktur kristal yaitu *hexagonal* dan *cubic* [40].

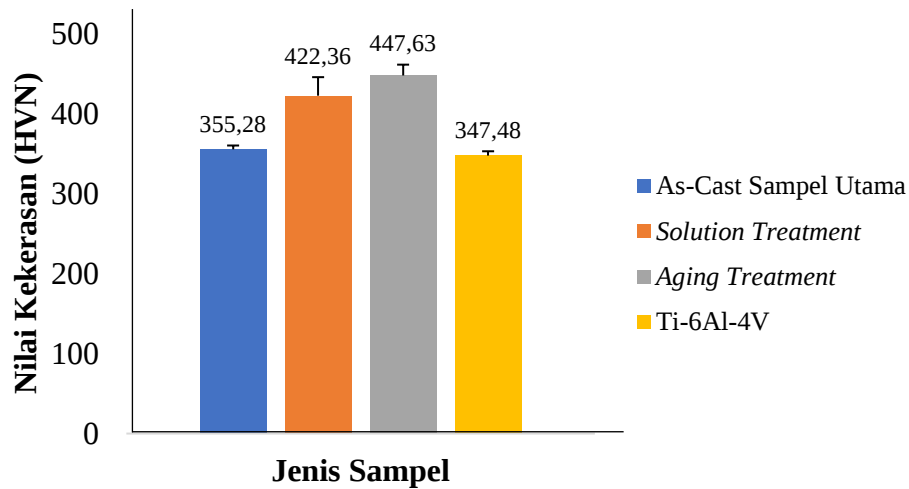


Gambar 4.6 Hasil Analisis XRD Dengan Perbedaan Sampel

Gambar 4.6 diatas menunjukkan data hasil karakterisasi XRD pada berbagai sampel. Sampel *as-cast* tidak terlihat sedikit pun fasa β yang terbentuk. Ini menjelaskan bahwa hasil pengamatan struktur mikro dan hasil XRD berkorelasi. Pada sampel *solution treatment* terdapat fasa α dengan struktur HCP dengan persentase sebesar 94%, sedangkan fasa β dengan struktur BCC terdeteksi sebesar 6% saja. Intensitas puncak pada 2θ sekitar $\pm 37^\circ$ menunjukkan bahwa terdapat fasa β . Hal tersebut dapat terjadi karena fasa β dapat dipertahankan selama terjadinya *quenching* dan mengakibatkan fasa α tidak terbentuk sempurna [40]. Ini pun menjelaskan bahwa hasil pengamatan struktur mikro dan hasil XRD berkorelasi. Selanjutnya, pada sampel *aging treatment* terdapat fasa α dengan struktur HCP dengan persentase sebesar 92%, sedangkan fasa β dengan struktur BCC terdeteksi sebesar 8% saja. Ini berbeda dengan sampel *solution treatment*, dimana sampel *aging treatment* mengalami kenaikan 2% pada fasa β . Intensitas puncak pada 2θ sekitar $\pm 38^\circ$ dan 82° menunjukkan bahwa terdapat dua fasa β . Ini disebabkan karena pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si juga terdapat unsur penstabil fasa β yaitu niobium (Nb). Nb dapat membantu mempertahankan fasa β bahkan setelah proses *aging treatment*, meskipun terjadi presipitat fasa α di dalam matriks β , sebagian fasa β *metastable* berubah menjadi fasa β *stable* dan mengalami pertumbuhan. Ini juga menjelaskan bahwa hasil pengamatan struktur mikro dan hasil XRD berkorelasi.

4.4 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik

Sifat mekanik merupakan salah satu kriteria yang juga perlu diperhatikan dalam pembuatan sampel ataupun produk. Salah satu sifat mekanik yang penting adalah sifat kekerasan. Secara umum, kekerasan merujuk pada kemampuan material dalam menahan deformasi permanen ketika diberikan beban atau gaya. Kekerasan menjadi parameter penting karena berhubungan langsung dengan ketahanan material baik itu terhadap keausan, deformasi, dan juga kerusakan material. Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si pada sampel hasil *as-cast* dan sampel hasil perlakuan panas (*solution treatment* dan *aging treatment*). Selain itu, sampel Ti-6Al-4V dilakukan juga pengujian kekerasan karena sebagai paduan titanium yang komersial. Pengujian kekerasan ini dilakukan dengan menggunakan metode kekerasan *Vicker's*. Pengujian ini dilakukan sebanyak sembilan posisi setiap satu sampel dan didapatkan nilai kekerasan rata-rata sampel tersebut. Gambar 4.7 dibawah menunjukkan hasil uji kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan juga Ti-6Al-4V (paduan komersial).



Gambar 4.7 Nilai Kekerasan Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan Ti-6Al-4V

Terdapat perbedaan nilai kekerasan yang signifikan pada setiap sampel paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si. Nilai kekerasan terendah terdapat pada sampel hasil *as-cast* dengan nilai sebesar 355,28 HVN dan mengalami kenaikan setelah sampel diberi perlakuan panas. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan panas memiliki pengaruh besar terhadap perubahan sifat mekanik material. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Tiara juga menunjukkan bahwa perlakuan *panas* dapat menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil *as-cast* karena perbedaan struktur mikro [56]. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada gambar 4.2 bahwa terdapat fasa α' (martensit) pada struktur mikro hasil *solution treatment*. Fasa α' ini lah menyebabkan nilai kekerasan menjadi meningkat, dikarenakan martensit dikenal memiliki sifat mekanik yang keras. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Eshawish *et al*, yang menjelaskan bahwa *solution treatment* umumnya meningkatkan nilai kekerasan akibat terbentuknya struktur martensit karena proses *quenching* [50].

Nilai tertinggi terdapat pada sampel hasil perlakuan panas yakni *aging treatment* dengan nilai kekerasan sebesar 447,63 HVN. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya pada gambar 4.3 bahwa terdapat presipitat fasa α . Dengan adanya presipitat α inilah menyebabkan nilai kekerasan meningkat, hal ini dikenal sebagai *precipitation hardening*. Ini sejalan dengan penelitian Elsaheer *et al*, yang menyebutkan bahwa material yang diberi perlakuan *aging treatment* setelah *solution treatment* akan mengalami peningkatan nilai kekerasan dikarenakan terdapatnya presipitat fasa α [57].

Dalam gambar 4.7 juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai kekerasan antara *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan *as-cast* paduan Ti-6Al-4V. Nilai kekerasan pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si lebih tinggi dibandingkan dengan Ti-6Al-4V. Ini disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si merupakan paduan *near- α* jika dilihat dalam struktur mikro (gambar 4.1) dan juga hasil XRD (gambar 4.5). Paduan *near- α* dominan terdiri dari unsur penstabil fasa α , tetapi juga mengandung sejumlah kecil unsur penstabil β . Dalam hal ini unsur penstabil fasa α seperti aluminium (Al), timah (Sn), dan zirkonium (Zr) [49], unsur penstabil β hanya Nb saja.

Keberadaan Unsur Sn dalam paduan mendukung fasa α untuk tumbuh. Fase α sendiri diketahui memiliki struktur kristal heksagonal yang memang getas dan keras, oleh karenanya gerakan slip akan terbatas selama terjadinya deformasi [58]. Unsur Zr diketahui dapat menyebabkan nilai kekerasan pada paduan titanium meningkat, dikarenakan Zr dapat membuat ukuran butiran yang lebih halus, dan mendukung keberadaan fasa α untuk tumbuh [59]. Terakhir, Unsur Si cenderung

tersebar di sekitar area dislokasi dalam struktur kristal yang dapat menghambat pergerakan dislokasi dan deformasi. Akibatnya, keberadaan Si ini menyebabkan peningkatan nilai kekerasan material. Namun, unsur Si ini hanya dibolehkan maksimum sebesar 1%, karena apabila berlebih maka menyebabkan penggetasan yang berlebih (menurunkan keuletan secara drastis) [60]. Hal-hal tersebut lah yang menjadi alasan mengapa paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan komersial Ti-6Al-4V.

4.5 Hasil Perlakuan Oksidasi Temperatur Tinggi

Salah satu metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah perlakuan oksidasi, yang melibatkan pemanasan material pada temperatur tinggi dalam atmosfer yang mengandung oksigen (O_2). Pengujian ini penting karena untuk menentukan ketahanan material terhadap degradasi dalam berbagai kondisi, salah satunya ialah kondisi pada temperatur tinggi. Proses ini menyebabkan terbentuknya lapisan oksida di permukaan material, yang dapat berfungsi sebagai penghalang atau pelindung terhadap masuknya oksigen dan melindungi material dari kerusakan. Pengujian oksidasi dilakukan untuk mengetahui perbedaan ketahanan paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si pada sampel hasil *as-cast* dan sampel hasil perlakuan panas (*solution treatment* dan *aging treatment*). Selain itu, sampel Ti-6Al-4V dilakukan juga pengujian oksidasi karena sebagai pembanding dan juga Ti-6Al-4V sebagai paduan titanium yang komersial. Pengujian ini dilakukan dengan metode *cyclic oxidation testing*, dimana sampel nantinya mengalami siklus pemanasan dan pendinginan berulang dalam lingkungan yang oksidatif untuk

melihat ketahanannya terhadap siklus termal. Hasil uji oksidasi nantinya diolah dan dianalisa dalam bentuk grafik dengan menggunakan *software* Origin. Secara umum, kinetika oksidasi temperatur tinggi dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p \cdot t \dots\dots\dots(2.1)$$

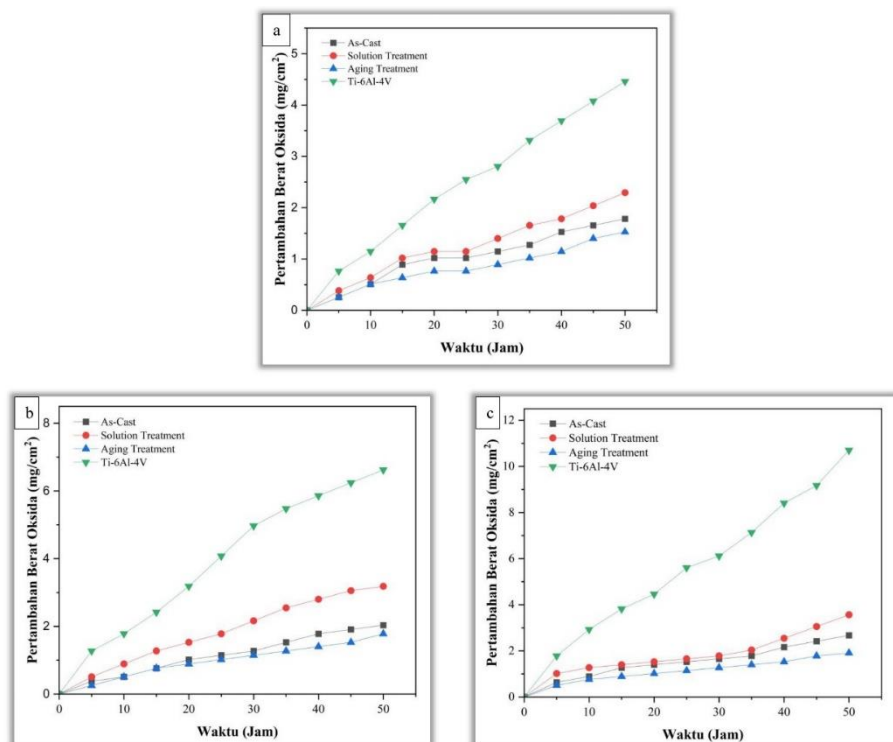
$$\ln\left(\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n\right) = \ln(K_p \cdot t)$$

$$n \cdot \ln\left(\frac{\Delta W}{A}\right) = \ln(K_p) + \ln(t)$$

$$\ln\left(\frac{\Delta W}{A}\right) = \frac{1}{n} (\ln(K_p) + \ln(t))$$

$$\ln\left(\frac{\Delta W}{A}\right) = \frac{\ln(K_p)}{n} + \frac{\ln(t)}{n} \dots\dots\dots(4.1)$$

4.5.1 Hasil Kinetika Oksidasi



Gambar 4.8 Grafik Kinetika Oksidasi : a) Temperatur 600°C,
b) Temperatur 650°C, c) Temperatur 700°C

Gambar 4.8 diatas menunjukkan grafik pertambahan berat oksida pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan Ti-6Al-4V (paduan komersial) setelah oksidasi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8 menjelaskan bahwa dengan meningkatnya waktu pengujian oksidasi maka pertambahan berat oksida pada setiap paduan pun menunjukkan peningkatan. Pada temperatur 600°C, pertambahan berat oksida paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si pada sampel *as-cast* sebesar 1,7 mg/cm², *solution treatment* sebesar 2,2 mg/cm², dan *aging treatment* sebesar 1,5 mg/cm². Sebagai perbandingan, sampel paduan Ti-6Al-4V menunjukkan pertambahan berat oksida yang jauh lebih besar, yaitu sebesar 4,4 mg/cm². Lalu, pada pada temperatur tertinggi yakni 700°C mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Pertambahan berat oksida paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si pada sampel *as-cast* sebesar 2,6 mg/cm², *solution treatment* sebesar 3,4 mg/cm², dan *aging treatment* sebesar 1,9 mg/cm². Sebagai perbandingan, sampel paduan Ti-6Al-4V menunjukkan pertambahan berat oksida yang jauh lebih besar, yaitu sebesar 10,7 mg/cm². Perbedaan nilai ini menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang lebih baik dibandingkan dengan paduan komersial Ti-6Al-4V. Ini dibuktikan dengan nilai pertambahan berat oksida pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si yang 2 - 4 kali lebih rendah dibandingkan pada paduan Ti-6Al-4V.

Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan Ti-6Al-4V dikarenakan perbedaan kadungan unsur yang pada paduannya. Perbedaan unsur tersebut ialah unsur Nb, Sn, Zr, dan Si dalam paduan yang berperan dalam pembentukan lapisan oksida yang lebih stabil dan tahan terhadap difusi oksigen. Unsur Nb cenderung membentuk senyawa intermetalik dengan unsur-unsur lain. Unsur Nb dapat mendukung pertumbuhan lapisan oksida TiO_2 khususnya adalah TiO_2 jenis rutil [61]. Disamping itu juga, penambahan unsur Nb dapat juga dapat mendorong difusi unsur Al ke permukaan dan dapat meningkatkan aktivitas Al dan menurunkan aktivitas unsur Ti secara signifikan. Secara tidak langsung unsur Nb dapat membentuk lapisan oksida Al_2O_3 yang kontinu dan sangat padat pada permukaan paduan titanium [62]. Dengan kata lain, unsur Nb dapat menurunkan kecepatan difusi ion oksigen.

Unsur Sn diketahui dapat mempercepat atau mendorong pertumbuhan lapisan oksida TiO_2 dan juga lapisan oksida Al_2O_3 [63]. Lapisan oksida tersebutlah yang menyebabkan paduan lebih tahan dari oksidasi. Lalu, unsur Zr sendiri dapat membentuk lapisan ZrO_2 . Bahkan dalam penelitian Matsunaga [64] menyebutkan bahwa unsur Zr dapat meningkatkan ketahanan oksidasi paduan *near- α* titanium lebih efektif daripada Nb, dikarenakan penambahan unsur Zr dapat menurunkan juga laju pertumbuhan TiO_2 yang berlebih. Unsur Si diketahui juga dapat mendorong difusi Al juga ke permukaan untuk membentuk lapisan oksidasi Al_2O_3 .

Kinetika oksidasi dapat dijelaskan dengan persamaan 2.1. ΔW merupakan pertambahan berat, A adalah luas permukaan benda uji, K_P adalah konstanta laju oksidasi, dan n sebagai eksponen laju. Persamaan 4.1 didapatkan dengan

melinearisasikan persamaan 2.1, dengan plot $\ln \left(\frac{\Delta W}{A} \right)$ pada sumbu y terhadap $\ln (t)$ pada sumbu x. Kemiringan garis dalam grafik tersebut adalah $\frac{1}{n}$. Nilai n dapat ditentukan dari kemiringan garis dari grafik tersebut.

Tabel 4.3 Eksponen Laju (n) dan Konstanta Laju (K_p) Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si									
Sampel	<i>As-Cast</i>			<i>Solution Treatment</i>			<i>Aging Treatment</i>		
Temperatur (°C)	600	650	700	600	650	700	600	650	700
n	2,13	2,0	1,56	1,96	2,13	1,26	1,87	2,11	1,44
K_p ($\text{mg}^2/\text{cm}^4.\text{h}$)	0,064	0,179	0,402	0,082	0,223	0,451	0,055	0,145	0,362

Tabel 4.4 Eksponen Laju (n) dan Konstanta Laju (K_p) Paduan Ti-6Al-4V

Sampel	Ti-6Al-4V		
Temperatur (°C)	600	650	700
n	2,05	2,02	1,97
K_p ($\text{mg}^2/\text{cm}^4.\text{h}$)	0,474	0,954	2,132

Adapun pernyataan bahwa jika $n = 1$ kurva kinetika oksidasi mengikuti hukum linier, dan jika $n = 2$, kurva kinetika oksidasi mengikuti hukum parabola [65]. Dimana, laju oksidasi akan menurun seiring waktu, karena lapisan oksida yang terbentuk mulai menghambat difusi oksigen ke dalam sampel. Hasil yang tercantum pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menunjukkan bahwa nilai n untuk paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dan paduan Ti-6Al-4V masing-masing dengan rata-rata sebesar 2. Nilai k_p terendah terdapat pada sampel *aging treatment* paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si pada temperatur 600 °C adalah sebesar 0,055 mg²/cm⁴.h, sedangkan untuk paduan Ti-6Al-4V terdapat pada temperatur 600°C adalah sebesar 0,474 mg²/cm⁴.h. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki laju oksidasi lebih kecil dibandingkan dengan paduan Ti-6Al-4V. Karena θ dalam persamaan ini merupakan parameter dari pertambahan berat yang dipengaruhi oleh temperatur dan waktu, maka dapat diubah menjadi k_p . Maka didapatkan persamaan linear seperti berikut:

$$\theta = t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$K_p = t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

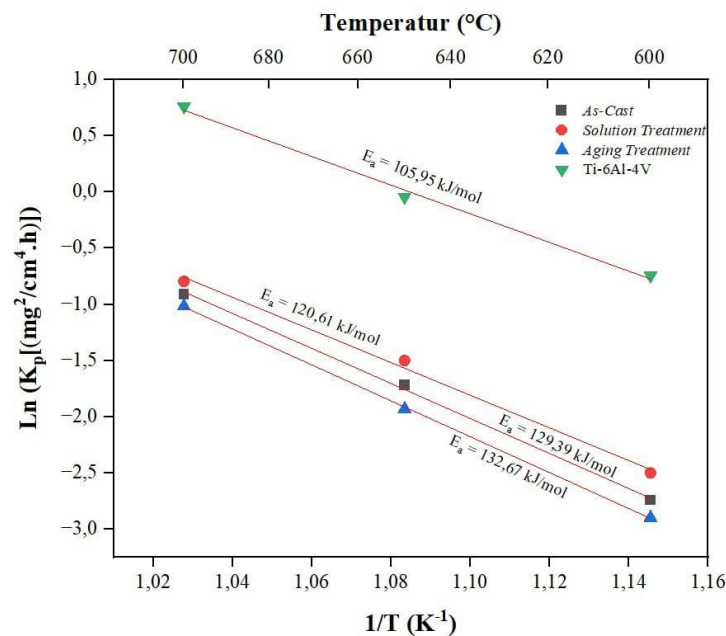
$$\ln(K_p) = \ln\left(t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right)$$

$$\ln(K_p) = \ln(t) + \ln\left(\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right)$$

$$\ln(K_p) = \ln(t) - \frac{Q}{RT}$$

$$\ln(K_p) = -\frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(t) \dots \dots \dots (4.2)$$

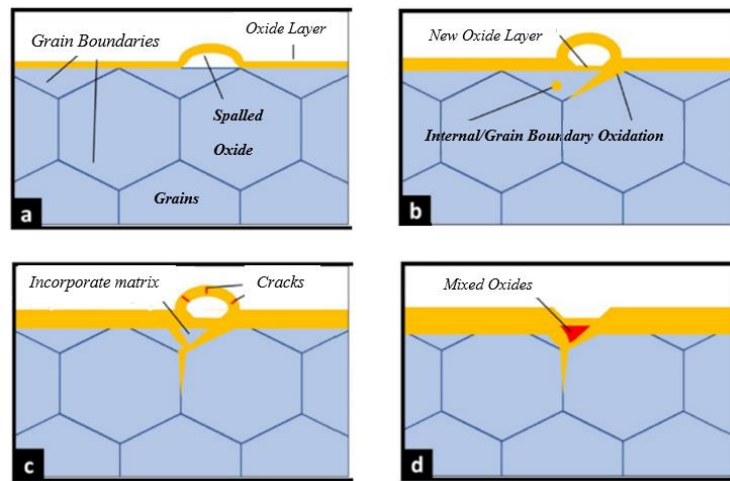
Persamaan 4.2 didapatkan dengan melinearisasikan persamaan 2.2 antara logaritma natural konstanta laju oksidasi ($\ln K_p$) dengan *invers* temperatur ($1/T$). Kemiringan garis dalam grafik tersebut adalah $-\frac{Q}{R}$, yang berhubungan dengan energi aktivasi (E_a). Gambar 4.9 menunjukkan kesesuaian linier yang baik antara plot $\ln k_p$ dan $1/T$. Energi aktivasi (E_a) dari masing-masing sampel menunjukkan jumlah energi yang diperlukan agar atom-atom dapat memulai reaksi oksidasi. Pada sampel *as-cast* sebesar 129,39 kJ/mol, sampel *solution treatment* sebesar 120,61 kJ/mol, sampel *aging treatment* sebesar 132,67 kJ/mol, dan sampel Ti-6Al-4V sebesar 105,95 kJ/mol. Sampel dengan energi aktivasi lebih tinggi lebih tahan terhadap oksidasi karena reaksi membutuhkan lebih banyak energi untuk memulai oksidasi sehingga berjalan lebih lambat. Sebaliknya, sampel dengan energi aktivasi lebih rendah lebih rentan teroksidasi, karena reaksi berlangsung lebih cepat.



Gambar 4.9 Plot Arrhenius Oksidasi

4.5.2 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi

Selain pengaruh komposisi unsur paduan, perlakuan panas juga memiliki pengaruh yang signifikan dalam mempengaruhi hasil oksidasi pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si. Ini terlihat dalam gambar 4.8 yang menjelaskan bahwa terdapatnya perbedaan antara sampel *as-cast* (sampel yang tidak mengalami perlakuan panas) dengan sampel yang dilakukan perlakuan panas (*solution treatment* dan *aging treatment*). Hal ini dikarenakan perlakuan panas mempengaruhi ukuran butir. Ukuran butir suatu logam bukan hanya mempengaruhi terhadap sifat mekaniknya saja, namun juga terhadap ketahanan oksidasinya. Butiran yang semakin halus menciptakan batas butir yang lebih banyak, sebaliknya jika butirannya semakin kasar (besar) maka batas butirnya semakin sedikit. Proses oksidasi sendiri merupakan proses berbasis difusi, dimana difusi oksigen atau nitrogen akan terjadi pada batas butir [66]. Pada batas butir terjadi ketidakaturan atom, sehingga menciptakan ruang kosong (vakansi) atau interstitial dan oksigen akan berdifusi di batas butir. Mekanismenya ialah dimulai ketika atom oksigen dari atmosfer (*furnace*) melalui batas butir. Lalu, terjadi reaksi oksidasi dimana oksigen bereaksi dengan atom logam pada batas butir, membentuk lapisan oksida. Selanjutnya, terjadi pertumbuhan lapisan oksida seiring berjalannya waktu dan mendorong lapisan oksida yang lebih kuat ke permukaan. Setelah itu terjadi yang namanya spallation atau pengelupasan lapisan oksida.



Gambar 4.10 Mekanisme Oksidasi Pada Batas Butir [67].

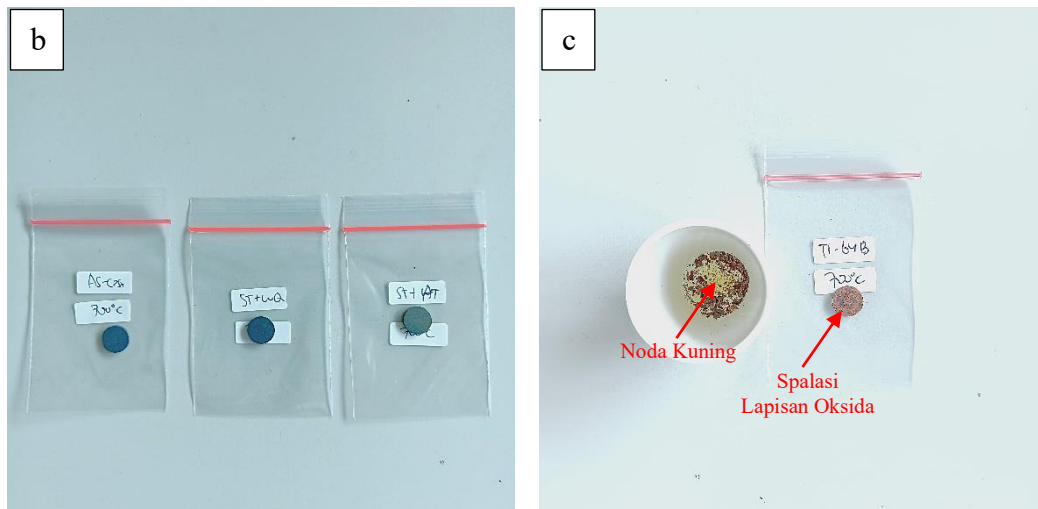
Perlakuan *solution treatment* menghasilkan butiran yang lebih besar, dikarenakan kristal dalam material tidak sempat untuk melakukan nukleasi atau transformasi namun hanya terjadi distorsi yang menyebabkan tidak adanya nukleasi sehingga tidak dapat membentuk butir-butir yang lebih kecil. Hal ini mengakibatkan butiran yang dihasilkan lebih besar dan juga memiliki batas butir yang sedikit. Hal ini dikonfirmasi oleh penelitian Sutowo [21] yang menjelaskan bahwa *solution treatment* dapat membuat ukuran butirnya menjadi lebih besar atau lebar. Hal ini berdampak negatif pada ketahanan oksidasi material. Batas butir yang lebih sedikit mengurangi hambatan terhadap difusi oksigen di dalam material, memungkinkan oksigen menembus lebih dalam. Jika lapisan oksida pada batas butir tidak cukup stabil atau padat, oksigen dapat terus berdifusi ke dalam material, bereaksi dengan atom-atom logam di bawah permukaan untuk membentuk lapisan oksida baru. Hal ini dapat mempercepat laju oksidasi dan merusak ketahanan material terhadap oksidasi pada temperatur tinggi. Ini juga dijelaskan dalam

penelitian Zhang [68] yang menjelaskan bahwa butiran yang lebih besar memang menghasilkan lapisan oksida campuran $\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, namun lapisannya yang besar dan juga kurang padat.

Disisi lain, perlakuan *aging treatment* menghasilkan butiran yang lebih kecil dan halus karena kristal dalam material mengalami nukleasi, di mana martensit akan terdekomposisi dan menghasilkan fasa α dalam matriks β . Proses inilah memungkinkan terbentuknya butiran halus dengan batas butir yang lebih banyak [21]. Hal ini dapat membantu memperlambat proses oksidasi, karena batas butir dapat menjadi penghalang (*barrier*) yang efektif bagi difusi oksigen, sehingga oksidasi menjadi lebih sulit terjadi di dalam material. Butiran yang halus memang dapat menghasilkan lebih banyak batas butiran, yang berarti lebih banyak tempat untuk difusi oksigen atau nitrogen ke dalam substrat dan akibatnya mengurangi ketahanan oksidasi. Namun, dengan peningkatan jumlah batas butiran juga dapat memungkinkan pergerakan atom Al untuk membentuk lapisan pelindung Al_2O_3 yang konsisten, kontinu, dan kuat di permukaan, sehingga mencegah difusi oksigen atau nitrogen lebih lanjut [68].

4.5.3 Pengamatan Visual Hasil Pengujian Oksidasi





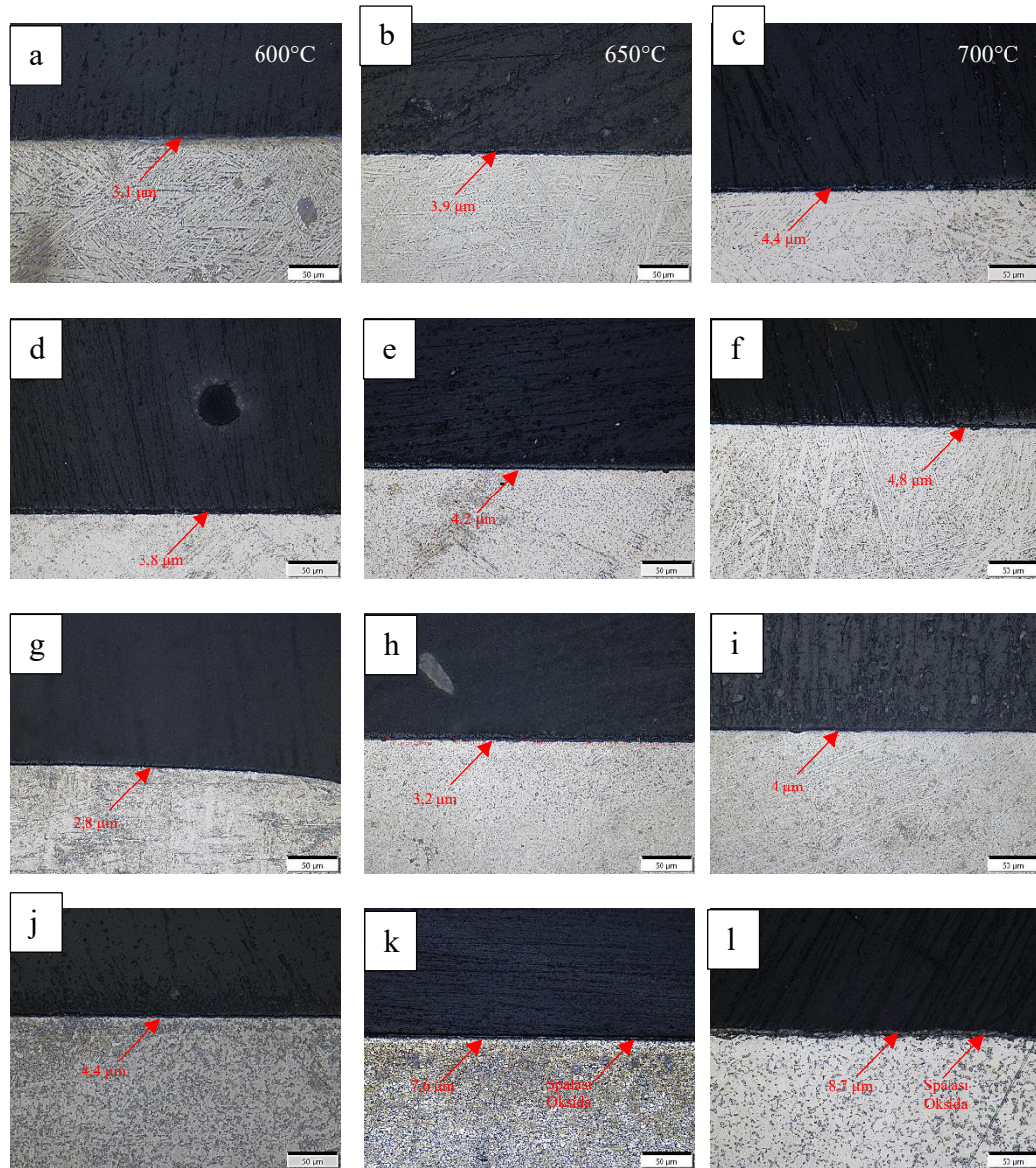
Gambar 4.11 Sampel Pengujian Oksidasi. (a) Sampel Sebelum Pengujian Oksidasi, (b) – (c) Sampel Setelah Pengujian Oksidasi 700°C. (b) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *as-cast*, *solution treatment*, *aging treatment*, (c) Ti-6Al-4V

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kondisi sampel antara sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si dengan sampel komersial Ti-6Al-4V setelah dilakukannya pengujian oksidasi. Hal ini dikarenakan pengaruh komposisi unsur paduan yang berbeda. Terdapat fenomena pengelupasan lapisan oksida yang biasa disebut sebagai *oxide spallation*. Ini terjadi pada sampel Ti-6Al-4V. Selain itu pun, sampel Ti-6Al-4V meninggalkan noda kuning pada cawan yang merupakan noda dari lapisan oksida yang terlepas. Spalasi terjadi karena perbedaan koefisien muai termal antara lapisan oksida dan substrat dan juga tegangan sisa dalam lapisan oksida. Lapisan oksida yang terkelupas (*spallation*) akan menyebabkan terjadinya peningkatan oksidasi yang signifikan pada substrat paduan [63]. Ini dapat dilihat pada gambar 4.8 dimana sampel Ti-6Al-4V mengalami penambahan berat oksida yang paling besar. Penelitian yang dilakukan oleh Guangbao juga mengalami hal

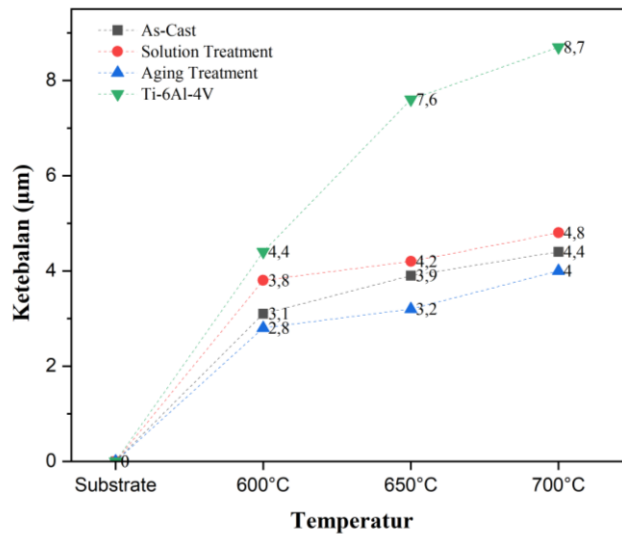
yang sama dimana dalam penelitiannya sampel Ti-6Al-4V mengalami spalasi lapisan oksida dan meninggalkan noda kuning yang merupakan noda dari lapisan oksida V_2O_5 [69]. Pada sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si hanya terdapat perbedaan warna dan tidak terjadi spalasi. Untuk *as-cast* berwarna biru (cukup terang), *solution treatment* berwarna biru (gelap), dan *aging treatment* berwarna hijau. Perubahan warna pada paduan titanium ini merupakan hasil dari lapisan oksida. Penambahan sejumlah kecil unsur Sn dan Zr dalam dapat meningkatkan daya rekat (adhesi) lapisan oksidanya sehingga mencegah terjadinya spalasi [14], [64]. Lapisan oksida yang melekat dapat memberikan tingkat oksidasi yang rendah.

Ini menjelaskan dan menegaskan kembali bahwa sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si lebih baik dari sampel komersial Ti-6Al-4V dalam hal ketahanan oksidasi. Lapisan oksida yang mengalami pengelupasan tentu saja sangat merugikan utamanya dari segi sifat mekanik [70]. Spalasi dapat menciptakan retakan kecil pada permukaan material yang dimana menjadi titik awal bagi pertumbuhan retakan yang lebih besar. Apabila dibiarkan material dapat mengalami kegagalan fraktur secara tiba-tiba. Lalu, spalasi juga dapat membuat sampel menjadi lebih rentan terhadap serangan korosi. Hal ini karena lapisan pelindung pada sampel telah terkelupas atau hilang. Spalasi juga tentunya akan mengurangi ketebalan sampel, terutama pada daerah yang mengalami pengelupasan. Hal-hal tersebut lah yang akan mengurangi kinerja dan umur sampel.

4.5.4 Ketebalan Lapisan Oksida



Gambar 4.12 Pengamatan Mikroskop Optik Setelah Pengujian Oksidasi. (a)-(c) *As-Cast*, (d)-(f) *Solution Treatment*, (g)-(i) *Aging Treatment*, (j)-(l) *Ti-6Al-4V*

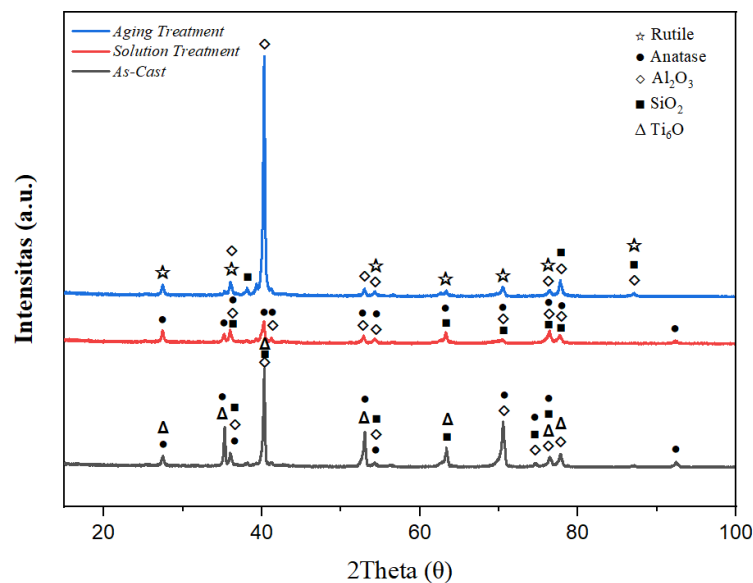


Gambar 4.13 Grafik Ketebalan Lapisan Oksida Setiap Sampel

Gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan pengamatan mikroskop dan grafik ketebalan lapisan oksida setelah dilakukan pengujian oksidasi. Pengamatan mikroskop optik pada sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (gambar 4.12 a-i) menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk sangatlah tipis. Pada sampel Ti-6Al-4V (gambar 4.12 j-l) menunjukkan bahwa lapisan yang terbentuk terlihat lebih tebal dibandingkan sampel utama. Terlihat juga spalasi oksida pada hasil pengamatan mikroskop optik dan hasil ini sejalan dengan gambar 4.10. Gambar 4.13 menunjukkan peningkatan ketebalan secara linear seiring dengan meningkatnya temperatur. Pada temperatur tertinggi yaitu 700°C, ketebalan terbesar atau paling tebal dimiliki oleh sampel Ti-6Al-4V yaitu sebesar 8,7 μm . Sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki ketebalan yang lebih rendah, pada sampel *as-cast* sebesar 4,4 μm , *solution treatment* 4,8 μm dan *aging treatment* 4 μm . Ketebalan yang lebih besar pada sampel Ti-6Al-4V mengindikasikan laju

oksidasi yang lebih cepat. Sementara ketebalan oksida yang lebih rendah pada sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si menunjukkan bahwa paduan ini memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik, terutama oleh sampel yang diberikan perlakuan panas berupa *aging treatment*. Hasil ini sejalan dengan data pertambahan berat oksida pada Gambar 4.7 yang menunjukkan bahwa sampel Ti-6Al-4V mengalami pertambahan berat oksida yang lebih besar dibandingkan dengan sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si. Hal Ini mengindikasikan bahwa semakin besar nilai pertambahan berat oksida maka semakin tebal pula lapisan oksida yang terbentuk.

4.6 Hasil Pengujian XRD Setelah Perlakuan Oksidasi



Gambar 4.14 Data XRD Setelah Pengujian Oksidasi 700°C

Setelah dilakukannya pengujian oksidasi, sampel dilakukan pengujian XRD. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui senyawa-senyawa apa saja yang

terbentuk sehingga menjadi lapisan oksida yang melindungi sampel. Gambar 4.14 menunjukkan data XRD untuk paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si setelah dilakukan pengujian oksidasi pada temperatur tertinggi yaitu 700°C. Dari data XRD tersebut, terdapat beberapa fasa teridentifikasi seperti TiO₂ (rutile dan anatase), Al₂O₃, SiO₂, dan juga Ti₆O. Pada sampel *as-cast* terbentuk lapisan oksida anatase, Al₂O₃, SiO₂, dan juga Ti₆O. Pada sampel *solution treatment* terbentuk lapisan oksida yang hampir mirip dengan *as-cast*, namun fasa Ti₆O tidak terdeteksi. Sementara itu, pada kondisi *aging treatment*, hanya fasa rutile, Al₂O₃, dan SiO₂ yang teridentifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan lapisan oksida pada setiap sampel. Perbedaan tinggi puncak intensitas menunjukkan perbedaan fasa-fasa dominan tertentu pada masing-masing sampel. Puncak tertinggi terdapat pada posisi 2θ sekitar 40°.

Fasa-fasa tersebut masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda dalam ketahanan oksidasi sampel. Rutile dan anatase merupakan salah satu bentuk polimorf dari senyawa TiO₂ yang umum terbentuk pada temperatur tinggi [71]. Rutile umumnya lebih stabil pada temperatur tinggi yang menunjukkan perlindungan yang lebih efektif dibandingkan dengan anatase yang cenderung terbentuk pada temperatur lebih rendah dan dapat bertransformasi menjadi rutile pada kondisi tertentu. Hal ini karena rutile adalah fase stabil dari TiO₂, sedangkan anatase adalah metastabil dari TiO₂. Secara termodinamika, anatase memiliki energi bebas Gibbs yang lebih tinggi dibandingkan rutile [72]. Itu artinya, anatase lebih reaktif terhadap oksigen dibandingkan rutile. Lapisan anatase ini nantinya akan lebih mudah ditembus oleh oksigen yang memungkinkan oksidasi material yang

lebih lanjut. Pada *aging treatment*, keberadaan fasa rutile sebagai salah satu fasa yang terdeteksi yang berarti menunjukkan ketahanan oksida yang lebih baik, sementara anatase terdeteksi pada *as-cast* dan *solution treatment* (puncak intensitas) mengindikasikan perlindungan yang kurang optimal.

Selain fasa TiO_2 , fasa Al_2O_3 juga terdeteksi pada semua sampel. Dalam penelitian Dai dan Chen menjelaskan bahwa lapisan Al_2O_3 juga merupakan oksida yang paling cocok untuk lapisan oksida pelindung. Hal ini dikarenakan kerapatannya yang sangat baik, sangat protektif, dapat menghambat difusi unsur logam lainnya, kecepatan pertumbuhan yang rendah dan juga adhesinya yang baik [73], [74]. Secara termodinamika pun, Al_2O_3 salah satu senyawa yang paling stabil. Keberadaan Al_2O_3 sebagai salah satu fasa dominan pada *aging treatment* (puncak intensitas) menghasilkan lapisan pelindung yang sangat efektif dan kuat sehingga *aging treatment* menjadi sampel terbaik.

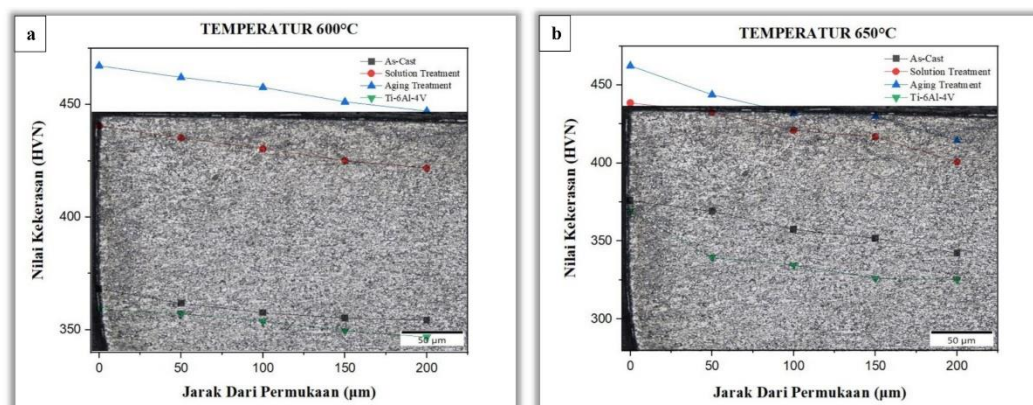
Lapisan oksida SiO_2 juga teridentifikasi pada semua sampel. Lapisan ini memberikan dapat memperlambat laju oksidasi. Hal ini karena SiO_2 dalam mengurangi porositas dan unsur Si dapat mendukung pertumbuhan rutile [15]. Sementara itu, fasa Ti_6O hanya terdeteksi pada sampel *as-cast*. Lapisan Ti_6O ini adalah salah satu oksida transisi dari titanium. Dalam penelitian Romanowicz, lapisan Ti_6O menghasilkan lapisan yang sangat tipis [75]. Itu berarti lapisan ini tidak sekuat dan tidak protektif jika dibandingkan TiO_2 (baik rutile ataupun anatase).

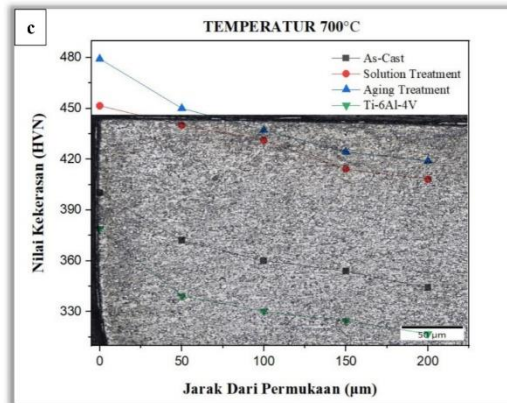
Secara keseluruhan, perbedaan fasa yang terbentuk pada setiap sampel dapat memengaruhi ketahanan oksidasinya. Sampel *aging treatment* terbukti

menghasilkan lapisan oksida yang lebih tahan terhadap oksidasi dengan lapisan oksida rutil dan Al_2O_3 , dibandingkan dengan *as-cast* dan *solution treatment* yang didominasi oleh anatase. Oleh karena itu, *aging treatment* memberikan perlindungan yang lebih superior terhadap oksidasi dibandingkan sampel lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa data XRD sejalan dengan grafik penambahan berat oksida dan juga grafik ketebalan lapisan oksida.

4.7 Pengaruh Perlakuan Oksidasi Terhadap Sifat Kekerasan

Setelah dilakukannya pengujian oksidasi, sampel juga harus dilakukan pengujian kekerasan kembali. Pengujian ini dilakukan untuk melihat bagaimana perlakuan oksidasi memengaruhi sifat mekanik pada sampel, terutama kaitannya dengan lapisan oksida yang terbentuk selama proses oksidasi. Pengujian dilakukan dengan mesin kekerasan *vicker's* dan dilakukan sebanyak 5 kali pada setiap sampel. Titik indentasi ini dibedakan berdasarkan jaraknya. Jarak yang dimaksudkan adalah jarak dari permukaan (*top layer oxide*) sampai pada subsrat (yang tidak terbentuk lapisan oksida).





Gambar 4.15 Grafik Nilai Kekerasan Setelah Pengujian Oksidasi. (a) Temperatur 600°C, (b) Temperatur 650°C, (c) Temperatur 700°C

Gambar 4.15 menunjukkan grafik nilai kekerasan setelah pengujian oksidasi dengan temperatur yang berbeda. Dari grafik menunjukkan bahwa kekerasan pada lapisan permukaan (*top layer oxide*) memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan inti material (*substrat*). Hal ini disebabkan karena pada saat oksidasi temperatur tinggi terjadi difusi interstisial ataupun vakansi oksigen di permukaan sampel yang secara signifikan meningkatkan kekerasan [76]. Dengan adanya atom interstisial ini akan mempersulit gerakan dislokasi. Ini dapat dikonfirmasi dengan membandingkan antara gambar 4.7 yaitu nilai kekerasan setiap sampel sebelum dilakukannya oksidasi dengan grafik diatas. Seperti contohnya pada sampel *aging treatment* dimana sebelum dilakukannya pengujian oksidasi nilai kekerasannya sebesar 447,63 HVN. Sedangkan, setelah dilakukannya pengujian oksidasi nilai kekerasan pada permukaan meningkat, pada temperatur 600°C sebesar 453,2 HVN, pada temperatur 650°C sebesar 462,4 HVN, dan pada temperatur 700°C sebesar 479,3 HVN. Peningkatan kekerasan lapisan oksida ini

sebanding dengan peningkatan ketebalan lapisan oksida yang ada (gambar 4.11) dan peningkatan temperatur pengujiannya. Hasil yang diperoleh sesuai dengan penelitian yang dilaporkan oleh Ahmed [77].

Peningkatan nilai kekerasan ini dapat diakibatkan juga oleh lapisan oksida yang terbentuk. Sebagaimana sebelumnya pada gambar 4.12 terdapat beberapa lapisan oksida yang terbentuk seperti TiO_2 , SiO_2 , dan Al_2O_3 . Senyawa-senyawa tersebut merupakan senyawa keramik yang dimana memiliki ciri khas yaitu sifat kekerasannya yang tinggi. Fasa Al_2O_3 itu sendiri merupakan salah satu keramik yang paling keras, dikarenakan kepadatannya yang bagus [78]. Fasa TiO_2 juga memiliki kekerasan yang cukup tinggi dan nilai modulus Young yang tinggi walau tidak sebaik Al_2O_3 [79].

Selain itu, terjadi penurunan nilai kekerasan sampel secara bertahap dari permukaan menuju substrat. Jika dibandingkan dengan nilai kekerasan sebelum pengujian oksidasi, maka terjadi penurunan. Seperti contohnya pada sampel *aging treatment* dimana sebelum dilakukannya pengujian oksidasi nilai kekerasannya sebesar 447,63 HVN. Sedangkan, setelah dilakukannya pengujian oksidasi temperatur 700°C nilai kekerasan pada substrat menurun menjadi 421,2 HVN. Dalam penelitian Latief tahun 2020 [79] juga mengalami hal yang serupa, didalamnya menjelaskan bahwa penurunan nilai kekerasan pada substrat diakibatkan oleh berdifusinya atom-atom dari substrat menuju ke permukaan untuk membentuk lapisan oksida, sehingga menciptakan ruang kosong (pori-pori) dan juga retakan. Hal ini tentu dapat mengurangi konsentrasi atom didalam substrat dan dapat menurunkan kekerasannya.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

- a. Perlakuan panas dapat mempengaruhi struktur mikro yang terbentuk dikarenakan perbedaan laju pendinginan pada sampel. Pada sampel *as-cast* (tanpa perlakuan panas) memiliki struktur mikro berupa fasa α dengan bentuk lamellar dan juga α_{GB} . Pada sampel *solution treatment* memiliki struktur mikro berupa α dengan bentuk accicular dan α' dengan bentuk martensit dan α_{GB} , fasa β . Pada sampel *aging treatment* memiliki struktur mikro berupa fasa presipitat α bentuk accicular, α_{GB} , dan fasa β .
- b. Perlakuan panas berupa *solution treatment* dan *aging treatment* memberikan peningkatan terhadap nilai kekerasan yang signifikan dibandingkan dengan sampel *as-cast*. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan struktur mikro. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada sampel dengan perlakuan panas berupa *aging treatment*. Nilai kekerasan pada *as-cast* sebesar 355,28 HVN, pada *solution treatment* sebesar 422,36 HVN, dan pada *aging treatment* sebesar 447,63 HVN.
- c. Perlakuan panas juga dapat mempengaruhi ketahanan oksidasi sampel. *Aging treatment* memberikan ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan *as-cast* dan *solution treatment*. Hal ini ditunjukkan oleh penambahan berat oksida yang lebih kecil dan memiliki lapisan

oksida yang lebih tipis. Seperti pada temperatur 700°C, penambahan berat oksida pada sampel *aging treatment* hanya sebesar 1,9 mg/cm², lebih rendah dibandingkan dengan *as-cast* sebesar 2,6 mg/cm² dan *solution treatment* sebesar 3,4 mg/cm². Selain itu, sampel *aging treatment* hanya sebesar 132,67 kJ/mol, ini lebih rendah dibandingkan *as-cast* sebesar 129,39 kJ/mol dan sampel *solution treatment* sebesar 120,61 kJ/mol. Pada temperatur yang sama juga, ketebalan pada sampel *aging treatment* hanya 4 µm, lebih rendah dibandingkan *as-cast* sebesar 4,4 µm, dan *solution treatment* 4,8 µm.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian berikutnya adalah sebagai berikut.

- a. Penelitian lanjutan pada kondisi operasional yang berbeda, seperti temperatur yang lebih tinggi (diatas 700°C) dan juga durasi (jam) yang berbeda untuk lebih memahami batas kemampuan sampel dalam lingkungan yang lebih ekstrem.
- b. Melakukan pengujian yang berbeda seperti uji korosi temperatur tinggi, uji ketahanan aus, pengujian *mapping* SEM-EDS, TEM, dan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ikuhiro Inagaki, Tsutomu Takechi, Yoshihisa Shirai, and Nozomu Ariyasu, "Application and features of titanium for the aerospace industry," pp. 22–27, 2014.
- [2] J. Dai, J. Zhu, C. Chen, and F. Weng, "High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: A review," 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.212.
- [3] I. Aniekan, O. Ikechukwu, P. O. Ebunilo, and E. Ikpe, "Material Selection for High Pressure (HP) Compressor Blade of an Aircraft Engine," *International Journal of Advanced Materials Research*, vol. 2, no. 4, pp. 59–65, 2016, [Online]. Available: <http://www.aiscience.org/journal/ijamrhttp://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [4] N. Vaché, Y. Cadoret, B. Dod, and D. Monceau, "Modeling the oxidation kinetics of titanium alloys: Review, method and application to Ti-64 and Ti-6242s alloys," *Corros Sci*, vol. 178, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2020.109041.
- [5] D. Rugg, M. Dixon, and J. Burrows, "High-temperature application of titanium alloys in gas turbines. Material life cycle opportunities and threats – an industrial perspective," *Materials at High Temperatures*, vol. 33, no. 4–5, pp. 536–541, Jun. 2016, doi: 10.1080/09603409.2016.1184423.
- [6] B. Sefer, *Oxidation and alpha-case phenomena in titanium alloys used in aerospace industry : Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo and Ti-6Al-4V*. Luleå University of Technology, 2014.
- [7] S. Perosanz, M. Viscasillas, N. Martin Piris, M. Hokka, and D. Barba, "On the effect of the microstructure on the dynamic behaviour of Ti-6Al-4V," *EPJ Web Conf*, vol. 250, p. 02013, 2021, doi: 10.1051/epjconf/202125002013.
- [8] A. Pathania, S. A. Kumar, B. K. Nagesha, S. Barad, and T. N. Suresh, "Reclamation of titanium alloy based aerospace parts using laser based metal deposition methodology," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 4886–4892. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.354.

- [9] F. Gemma, R. Joan Josep, S. Birhan, P. Robert, A. Marta-Lena, and M. Antonio, "Oxidation Behavior Of Ti6Al4V Alloy Exposed To Isothermal And Cyclic Thermal Treatments," pp. 1573–1579, 2017.
- [10] Prof. Caballero, *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys: Metals and Alloys*, 1st ed. Elsevier, 2021. Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780128197332/encyclopedia-of-materials-metals-and-alloys>
- [11] G. Rhys Watkins and Mp. Thesis, "Development of a High Temperature Titanium Alloy for Gas Turbine Applications," MPhil thesis, University of Sheffield, 2015.
- [12] J. Dai, J. Zhu, L. Zhuang, and S. Li, "Effect Of Surface Aluminizing On Long-Term High-Temperature Thermal Stability Of TC4 Titanium Alloy," *Surface Review and Letters*, vol. 23, no. 2, Apr. 2016, doi: 10.1142/S0218625X15501024.
- [13] Y. Pan *et al.*, "Effect of Sn Addition on Densification and Mechanical Properties of Sintered TiAl Base Alloys," *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, vol. 54, no. 1, pp. 93–99, Jan. 2018, doi: 10.11900/0412.1961.2017.00143.
- [14] Y. Pan *et al.*, "Effect of Sn addition on the high-temperature oxidation behavior of high Nb-containing TiAl alloys," *Corros Sci*, vol. 166, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108449.
- [15] J. Y. Xu, Z. Z. Shi, Z. B. Zhang, H. G. Huang, and X. F. Liu, "Significant enhancement of high temperature oxidation resistance of pure titanium via minor addition of Nb and Si," *Corros Sci*, vol. 166, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108430.
- [16] Y. Song *et al.*, "Effect of Nb content on cyclic oxidation behavior of as-cast Ti-1100 alloys," *Materials*, vol. 13, no. 5, Mar. 2020, doi: 10.3390/ma13051082.
- [17] F. Sharifi *et al.*, "The effect of different heat treatment cycle on hot corrosion and oxidation behavior of Ti-6Al-4V," *Mater Res Express*, vol. 6, no. 11, Oct. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab4cb4.
- [18] K. V Sai Srinadh and V. Singh, "Oxidation behaviour of the near α titanium alloy IMI 834," *Bulletin of Materials Science*, 347-354. 2004.
- [19] S. Amalina Azahra *et al.*, "The Effect of Solution Treatment Temperature on Hardness, Microstructure, and Corrosion Resistance of Ti-6Al-4V ELI," *Defect and Diffusion Forum*, 2024, [Online]. Available: www.scientific.net.

- [20] P. Pinke Óbudai Egyetem, L. Čaplovič, and T. Anna Kovacs Óbudai Egyetem, “The Influence Of Heat Treatment On The Microstructure Of The Casted Ti6Al4V Titanium Alloy,” 2011, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266870574>
- [21] Cahya Sutowo, Fendy Rokmanto, Merliana K Waluyo, and Alfirano, “Pengaruh Variasi Temperatur Solution Treatment Terhadap Struktur Mikro Dan Kekuatan Paduan Ti-6Al-6Nb Untuk Aplikasi Biomedis,” *Seminar Sains dan Teknologi 2017*, 2017.
- [22] H. Warlimont, “Titanium and titanium alloys,” in *Springer Handbooks*, Springer, 2018, pp. 195–206. doi: 10.1007/978-3-319-69743-7_7.
- [23] Adrian. P. Mouritz, “Introduction to aerospace materials,” in *Titanium alloys for aerospace structures and engines*, Elsevier, 2012, pp. 202–223. doi: 10.1533/9780857095152.202.
- [24] H. A. Kishawy and A. Hosseini, “Materials Forming, Machining and Tribology Machining Difficult-to-Cut Materials Basic Principles and Challenges,” 2019. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/11181>
- [25] K. K. Sankaran and R. S. Mishra, “Titanium Alloys,” in *Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures*, Elsevier, 2017, pp. 177–288. doi: 10.1016/b978-0-12-812068-2.00005-9.
- [26] C. Leyens and M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2003. doi: 10.1002/3527602119.
- [27] E. O. Ezugwu and Z. M. Wang, “Materials Processing Technology Titanium alloys and their machinability a review,” 1997.
- [28] X. Yang and C. R. Liu, “Machining titanium and its alloys,” *Machining Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 107–139, 1999, doi: 10.1080/10940349908945686.
- [29] ASM International, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. 2. ASM International, 1990. doi: 10.31399/asm.hb.v02.9781627081627.
- [30] M. Motyka, K. Kubiak, J. Sieniawski, and W. Ziaja, “Phase Transformations and Characterization of $\alpha + \beta$ Titanium Alloys,” in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 2, Elsevier Ltd, 2014, pp. 7–36. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00202-8.

- [31] P. Singh, H. Pungotra, and N. S. Kalsi, "On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 8971–8982. doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.249.
- [32] M. Peters, J. Kumpfert, C. H. Ward, and C. Leyens, "Titanium alloys for aerospace applications," Jun. 01, 2003. doi: 10.1002/adem.200310095.
- [33] Ezekiel Enterprises, "Jet Turbine Engine Fundamentals ," in *Continuing Education For Profesional Engineers*, LLc, 2019.
- [34] E. Van Der Weide, G. Kalitzin, J. Schlüter, and J. J. Alonso, "Unsteady Turbomachinery Computations Using Massively Parallel Platforms," 2006.
- [35] T. Okura, "Materials for Aircraft Engines," 2015, Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <http://animagraffs.com/inside-a-jet-engine/>
- [36] H. Guleryuz and H. Cimenoglu, "Oxidation of Ti-6Al-4V alloy," *J Alloys Compd*, vol. 472, no. 1–2, pp. 241–246, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2008.04.024.
- [37] R. R. Boyer, "A An overview on the use of titanium in the aerospace industry," *Materials Science and Engineering*, vol. 213, no. 1–2, pp. 103–114, 1996.
- [38] Rajan T.V., C.P Sharma, and Ashok Sharma, *Heat Trearment Principles and Thecniques Second Edition. Eastern Economi Edition*. New Delhi, 2011.
- [39] H. Galarraga, R. J. Warren, D. A. Lados, R. R. Dehoff, M. M. Kirka, and P. Nandwana, "Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)," 2017. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- [40] Jr. Matthew J. Donachie, "Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition," 2000. [Online]. Available: www.iran-mavad.com
- [41] B. D. Venkatesh, D. L. Chen, and S. D. Bhole, "Effect of heat treatment on mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 506, no. 1–2, pp. 117–124, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.msea.2008.11.018.
- [42] Vahid Salimian Rizi, "Ce Pte Us Pt," *Mater. Res. Express*, pp. 1–12, 2019.
- [43] A. S. Khanna, "High-Temperature Oxidation," in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, vol. 2, Elsevier, 2018, pp. 117–132. doi: 10.1016/B978-0-323-52472-8.00006-X.

- [44] E. Dong, W. Yu, Q. Cai, L. Cheng, and J. Shi, "High-Temperature Oxidation Kinetics and Behavior of Ti-6Al-4V Alloy," *Oxidation of Metals*, vol. 88, no. 5–6, pp. 719–732, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11085-017-9770-0.
- [45] Sanjaya Okky and A.P Bayuseno, "Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy N6025 Pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian : Mikrografi Dan Kekerasan," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 2, pp. 33–39, Oct. 2014.
- [46] A. Krisnawan, "Karakterisasi Sampel Paduan Magnesium Jenis AZ9 1D Dengan Berbagai Variasi Waktu Milling Menggunakan X-Ray Fluoresence (XRF) Dan X-Ray Diffraction (XRD)". Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, 2009.
- [47] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, and Y. He, "Fatty acids as phase change materials: A review," 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.107.
- [48] M. Nakai, M. Niinomi, H. Liu, and T. Kitashima, "Suppression of Grain Boundary α Formation by Addition of Silicon in a Near- β Titanium Alloy," *Mater Trans*, vol. 60, no. 9, pp. 1749–1754, Jul. 2019, doi: 10.2320/matertrans.ME201920.
- [49] J. Mantione, M. Garcia-Avila, M. Arnold, D. Bryan, and J. Foltz, "Properties of Novel High Temperature Titanium Alloys for Aerospace Applications," *MATEC Web of Conferences*, vol. 321, p. 04006, 2020, doi: 10.1051/mateconf/202032104006.
- [50] N. Eshawish, S. Malinov, and W. Sha, "Effect of Solution Treatment and Cooling Rate on the Microstructure and Hardness of Ti-6Al-4V Alloy Manufactured by Selective Laser Melting Before and After Hot Isostatic Pressing Treatment," *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 5, pp. 3550–3558, May 2022, doi: 10.1007/s11665-021-06489-3.
- [51] F. Rokhmanto, H. Arief, Alfirano, and C. Sutowo, "Characteristic of Ti-6Al-6Nb alloys following solution treatment with cryogenic cooling for implant applications," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jul. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/541/1/012043.
- [52] T. Grosdidier, Y. Combres, E. Gautier, and M.-J. Philippe, "Effect of Microstructure Variations on the Formation of Deformation-Induced Martensite and Associated Tensile Properties in a Metastable Ti Alloy," *Metallurgical And Materials*, 2000.

- [53] Ritupurna Sahoo and Abu Syed Kabir, *TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. in The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-36296-6.
- [54] J. Lin *et al.*, “Effects of solution treatment and aging on the microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of a β type Ti-Ta-Hf-Zr alloy,” *RSC Adv*, vol. 7, no. 20, pp. 12309–12317, 2017, doi: 10.1039/c6ra28464g.
- [55] L. E. Murr *et al.*, “Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications,” Jan. 2009. doi: 10.1016/j.jmbbm.2008.05.004.
- [56] Tiara Destia Ramadhan, *Analisis Variasi Temperatur Solution Treatment Terhadap Perubahan Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketahanan Korosi Paduan Ti-6Al-7Nb Untuk Aplikasi Implan Gigi*. Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, 2019.
- [57] R. N. Elshaer, S. El-Hadad, and A. Nofal, “Influence of heat treatment processes on microstructure evolution, tensile and tribological properties of Ti6Al4V alloy,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-38250-2.
- [58] E. P. Utomo, I. Kartika, and A. Anawati, “Effect of Sn on mechanical hardness of as-cast Ti-Nb-Sn alloys,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., May 2018. doi: 10.1063/1.5038328.
- [59] A. Sharma, J. N. Waddell, K. C. Li, L. A Sharma, D. J. Prior, and W. J. Duncan, “Is titanium–zirconium alloy a better alternative to pure titanium for oral implant? Composition, mechanical properties, and microstructure analysis,” *Saudi Dental Journal*, vol. 33, no. 7, pp. 546–553, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.sdentj.2020.08.009.
- [60] A. M. Chaze and C. Coddet, “Influence of alloying elements on the dissolution of oxygen in the metallic phase during the oxidation of titanium alloys,” *J Mater Sci*, vol. 22, pp. 1206–1214, 1987.
- [61] M. Yoshihara and K. Miura, “Effects of Nb addition on oxidation behavior of TiAl,” *Intermetallics (Barking)*, vol. 3, pp. 351–363, 1995.
- [62] X. Jin *et al.*, “Oxidation resistance of powder metallurgy Ti—45Al—10Nb alloy at high temperature,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 29, no. 12, pp. 2232–2240, Dec. 2015, doi: 10.1007/s12613-021-2320-4.

- [63] Y. Yang *et al.*, “Effects of Ga, Sn Addition and Microstructure on Oxidation Behavior of Near- α Ti Alloy,” *Oxidation of Metals*, vol. 88, no. 5–6, pp. 583–598, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11085-017-9741-5.
- [64] S. Matsunaga, A. Serizawa, and Y. Yamabe-Mitarai, “Effect of Zr on microstructure and oxidation behavior of α and $\alpha + \alpha_2$ Ti-Al-Nb alloys,” *Mater Trans*, vol. 57, no. 11, pp. 1902–1907, 2016, doi: 10.2320/matertrans.MAW201603.
- [65] K. Aniołek, M. Kupka, M. Łuczuk, and A. Barylski, “Isothermal oxidation of Ti-6Al-7Nb alloy,” *Vacuum*, vol. 114, pp. 114–118, 2015, doi: 10.1016/j.vacuum.2015.01.016.
- [66] Y. Yang *et al.*, “Effect of grain size on oxidation resistance of unalloyed titanium,” in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2017, pp. 2187–2191. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2187.
- [67] S. Parizia *et al.*, “Effect of heat treatment on microstructure and oxidation properties of Inconel 625 processed by LPBF,” *J Alloys Compd*, vol. 846, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156418.
- [68] K. Zhang, L. Zhang, and J. Li, “The Effect of Refined Coherent Grain Boundaries on High-Temperature Oxidation Behavior of TiAl-Based Alloys through Cyclic Heat Treatment,” *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 5, May 2024, doi: 10.3390/met14050521.
- [69] G. Mi, K. Yao, P. Bai, C. Cheng, and X. Min, “High temperature oxidation and wear behaviors of Ti–V–Cr fireproof titanium alloy,” *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.3390/met7060226.
- [70] W. Peng, W. Zeng, Y. Zhang, C. Shi, B. Quan, and J. Wu, “The effect of colored titanium oxides on the color change on the surface of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe alloy,” *J Mater Eng Perform*, vol. 22, no. 9, pp. 2588–2593, Sep. 2013, doi: 10.1007/s11665-013-0573-4.
- [71] S. A. Hamdan, I. M. Ibrahim, and I. M. Ali, “Comparison Of Anatase And Rutile TiO₂ Nanostructure For Gas Sensing Application,” 2020.
- [72] S. A. Kim, Sk. K. Hussain, M. A. Abbas, and J. H. Bang, “High-temperature solid-state rutile-to-anatase phase transformation in TiO₂,” *J Solid State Chem*, vol. 315, p. 123510, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jssc.2022.123510.
- [73] J. Dai, J. Zhu, L. Zhuang, and S. Li, “Effect Of Surface Aluminizing On Long-Term High-Temperature Thermal Stability Of TC4 Titanium Alloy,” *Surface Review and Letters*, vol. 23, no. 2, Apr. 2016, doi: 10.1142/S0218625X15501024.

- [74] W. Chen *et al.*, “Oxidation mechanism of a near β -Ti alloy,” *Mater Des*, vol. 223, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111144.
- [75] B. F. . Romanowicz and Matthew. Laudon, *Nanotechnology 2008 : materials, fabrication, particles, and characterization : technical proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show : Boston, June 1-5, 2008 : NSTI Nanotech*. Nano Science and Technology Institute ; CRC Press, 2008.
- [76] S. Wang, Y. Liang, H. Sun, X. Feng, and C. Huang, “Oxygen induced phase transformation in tc21 alloy with a lamellar microstructure,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2021, doi: 10.3390/met11010163.
- [77] F. S. Ahmed, M. A. El-Zomor, M. S. A. Ghazala, and R. N. Elshaer, “Impact of thermal oxidation parameters on micro-hardness and hot corrosion of Ti-6Al-3Mo-2Nb-2Sn-2Zr-1.5Cr alloy,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, p. 11249, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-38216-4.
- [78] D. Whitney, “Ceramic Cutting Tools,” in *Comprehensive Hard Materials*, Elsevier, 2014, pp. 491–505. doi: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00037-4.
- [79] F. H. Latief, E. S. M. Sherif, A. S. Wismogroho, W. B. Widayatno, and H. S. Abdo, “The cyclic oxidation and hardness characteristics of thermally exposed titanium prepared by inductive sintering-assisted powder metallurgy,” *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/cryst10020104.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

1. Perhitungan Penimbangan Komposisi Sampel

Diketahui :

Komposisi masing-masing bahan (*raw material*) :

- Ti = 99,99 %
- Al = 99,99 %
- Nb = 99,99 %
- Sn = 99,99 %
- Zr = 99,99 %
- Si = 99,99 %

Setiap satu sampel memiliki berat sebesar ± 20 gram.

Perhitungan :

Sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si :

- $Al = \frac{6}{100} \times 20 \text{ gr} = 1,2 \text{ gram}$
- $Nb = \frac{5}{100} \times 20 \text{ gr} = 1 \text{ gram}$
- $Sn = \frac{3}{100} \times 20 \text{ gr} = 0,6 \text{ gram}$
- $Zr = \frac{1}{100} \times 20 \text{ gr} = 0,2 \text{ gram}$
- $Si = \frac{0,5}{100} \times 20 \text{ gr} = 0,1 \text{ gram}$
- $Ti = 20 - (1,2 + 1 + 0,6 + 0,2 + 0,1) = 16,9 \text{ gram}$

2. Perhitungan Luas Permukaan

Dalam mengolah data hasil uji oksidasi diperlukan data luas permukaan sampel.

Adapun bentuk sampel adalah bulat atau bentuk cakram dan berikut diketahui diameter masing-masing sampel :

Tabel A.1 Data Diameter Preparasi Sampel Untuk Uji Oksidasi

Jenis Paduan	Diameter (mm)
<i>As-Cast</i> Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si	10
<i>Solution Treatment</i>	10
<i>Aging Treatment</i>	10
Ti-6Al-4V	10

Contoh Perhitungan Luas Permukaan Paduan Ti-6Al-4V :

$$\text{Luas Permukaan} = \pi \times r^2 = 3,14 \times (5)^2 = 78,5 \text{ mm}^2 = 0,785 \text{ cm}^2$$

3. Perhitungan Parameter Kisi XRD

Diketahui :

$$\lambda_{\text{Cu}} = 1,5406 \text{ \AA}$$

$$\lambda_{\text{Co}} = 1,78897 \text{ \AA}$$

Contoh Perhitungan pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *As-Cast* :

Tabel A.2 Data Sudut 2θ (°) XRD Paduan

Peak	2θ (°)	θ (°)	hkl
1	41,06587	20,532935	010
2	44,81969	22,409845	002

<i>Peak</i>	2θ (°)	θ (°)	hkl
3	47,0042	23,5021	011
4	62,42347	31,211735	012
5	74,94638	37,47319	110
6	84,32116	42,16058	013
7	92,01876	46,00938	112

* Gunakan nilai 2θ (°) pada salah satu *peak* untuk menghitung *interplaner spacing* (jarak antarplanar) (d) dan juga menghitung parameter kisi (a dan c). Perlu diingat bahwa dalam hal ini struktur kristal adalah HCP dan memiliki *unit cell* a = b ≠ c.

Contoh Percobaan Pada *Peak* 1 :

Perhitungan dilakukan dengan persamaan Hukum Bragg, berikut adalah persamaan Hukum Bragg :

$$d = \frac{n \lambda}{2 \sin \theta} \dots \dots \dots (A.1)$$

$$d = \frac{1 \times 1,78897}{2 \sin(20,532935)}$$

$$d = 2,550237636 \text{ Å}$$

Maka, jika dirangkum, didapatkan nilai masing-masing *interplaner spacing* (jarak antarplanar) (d) sebagai berikut.

Tabel A.3 Data Jarak Antarplanar (d) Paduan

<i>Peak</i>	d (Å)	hkl
1	2,550237636	010

<i>Peak</i>	<i>d (Å)</i>	<i>hkl</i>
2	2,346317968	002
3	2,243038736	011
4	1,726131264	012
5	1,470249022	110
6	1,332644031	013
7	1,24328394	112

Persamaan parameter kisi diawali dengan mencari nilai a. Perhitungan nilai a dengan mencari yang nilai indeks miller L nya 0. Kita ambil indeks 110. Berikut adalah persamaan rumusnya :

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$= \frac{1}{(1,470249022)^2} = \frac{(1)^2 + (1)^2}{a^2} + \frac{(0)^2}{c^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{(1,470249022)^2}} = \sqrt{\frac{(1)^2 + (1)^2}{a^2}}$$

$$= \frac{1}{1,470249022} = \frac{2}{a}$$

$$a = 2,9404 \text{ Å}$$

Lalu, menghitung nilai c dengan mencari yang nilai indeks miller H,K nya 0. Kita ambil indeks 002 :

$$\begin{aligned}
\frac{1}{d^2} &= \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \\
&= \frac{1}{(2,346317968)^2} = \frac{(0)^2 + (0)^2}{a^2} + \frac{(2)^2}{c^2} \\
&= \sqrt{\frac{1}{(2,346317968)^2}} = \sqrt{\frac{(2)^2}{c^2}} \\
&= \frac{1}{2,346317968} = \frac{2}{c} \\
c &= 2 \times 2,346317968 \\
c &= 4,6926 \text{ \AA}
\end{aligned}$$

Maka, didapatkan data sebagai berikut.

Tabel A.4 Data Nilai Parameter Kisi Paduan

<i>Lattice Constant</i>	Nilai Parameter Kisi (Å)
a = b	2,9404 Å
c	4,6926 Å

4. Perhitungan Nilai Kekerasan

Diketahui :

Tabel A.5 Data Nilai Kekerasan Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *As-Cast* :

Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)
1	353,7
2	353,3
3	351,5

Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)
4	357,3
5	359,8
6	359,6
7	345,3
8	359
9	358

Contoh Perhitungan pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si As-Cast :

$$\overline{\text{HVN}} = \frac{\text{HVN}_1 + \text{HVN}_2 + \text{HVN}_3 + \dots + \text{HVN}_9}{9}$$

$$\overline{\text{HVN}} = \frac{353,7 + 353,3 + 351,5 + \dots + 358}{9}$$

$$\overline{\text{HVN}} = 355,28$$

5. Perhitungan Nilai Pertambahan Berat Oksida

Diketahui :

Tabel A.6 Data Nilai Pertambahan Berat Oksida Sampel Ti-6Al-4V

Sampel	Jam	ΔW
Ti-6Al-4V (700°C)	5	1,78343949
	10	2,929936306
	15	3,821656051
	20	4,458598726

Sampel	Jam	ΔW
	25	5,605095541
	30	6,114649682
	35	7,133757962
	40	8,407643312
	45	9,171974522
	50	10,70063694

Contoh Perhitungan pada paduan Ti-6Al-4V pada jam 15 :

$$\text{Pertambahan Berat Oksida} = \frac{\Delta W}{A}$$

$$\text{Pertambahan Berat Oksida} = \frac{3,821656051 \text{ gram}}{0,785 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Pertambahan Berat Oksida} = 0,003821656 \text{ g/cm}^2$$

$$\text{Pertambahan Berat Oksida} = 3,821656051 \text{ mg/cm}^2$$

6. Perhitungan Nilai Energi Aktivasi (E_A)

Diketahui :

Tabel A.7 Data Nilai *Slope* (Kemiringan) Setiap Sampel

Sampel	<i>Slope</i> (Kemiringan)
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (<i>As-Cast</i>)	$y = -15.563x + 15,104$

Sampel	<i>Slope</i> (Kemiringan)
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>(Solution Treatment)</i>	$y = -14.507x + 14,15$
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si <i>(Aging Treatment)</i>	$y = -15.957x + 15,375$
Ti-6Al-4V	$y = -12.743x + 13,821$

Contoh perhitungan energi aktivasi (E_A) pada paduan Ti-6Al-4V :

$$Slope = -\frac{E_A}{R}$$

$$E_A = -Slope \times R$$

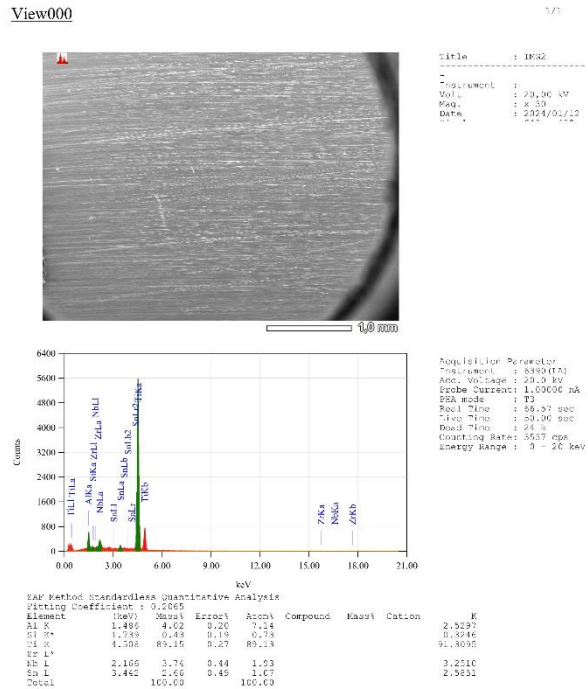
$$E_A = -(-12.743) \times 8,314$$

$$E_A = 105,95 \text{ kJ/mol}$$

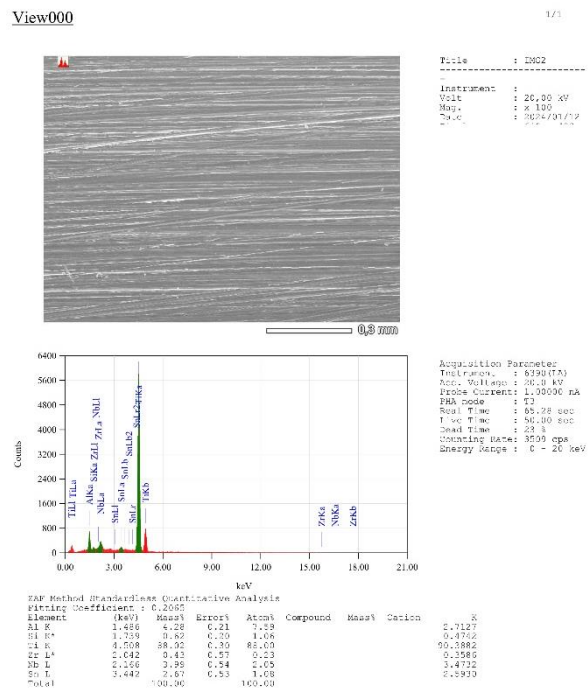
LAMPIRAN B
DATA PENELITIAN

Lampiran B. Data Penelitian

1. Data Hasil Komposisi (EDS)



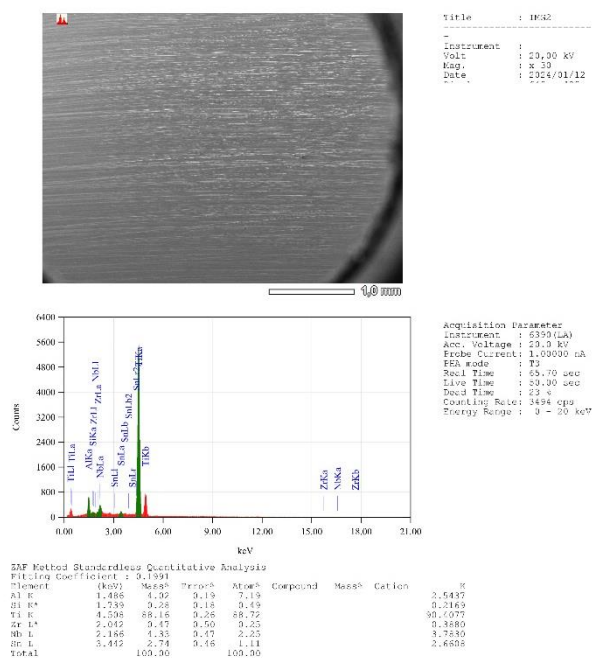
Gambar B.1 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 1



Gambar B.2 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 2

View000

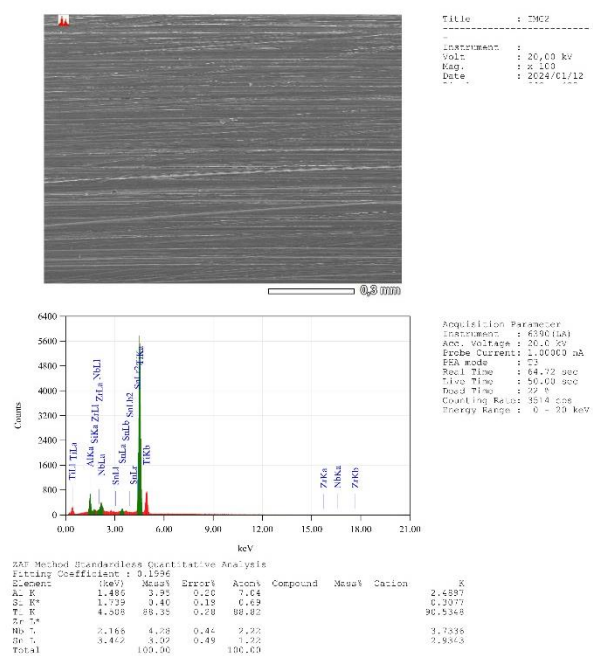
1/1



Gambar B.3 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 3

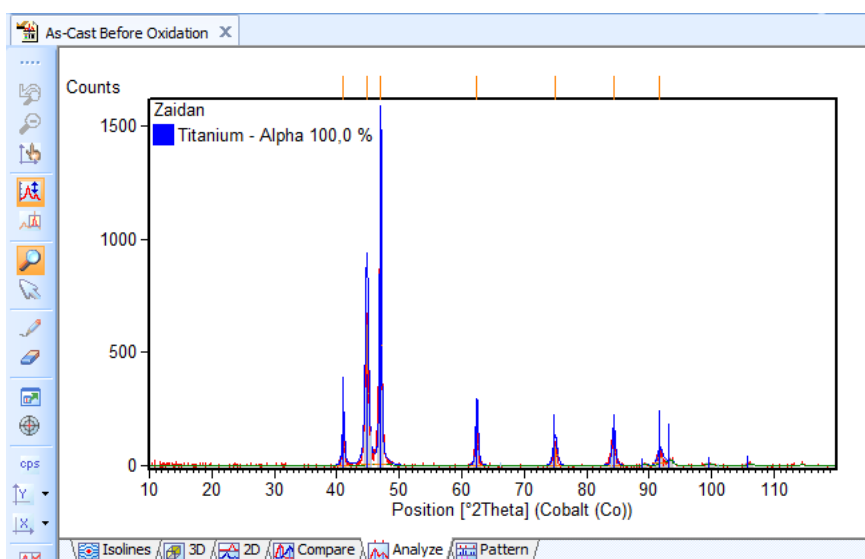
View000

1/1



Gambar B.4 Data Uji Komposisi Kimia EDS Titik 4

2. Data Hasil Karakterisasi XRD Sebelum Uji Oksidasi



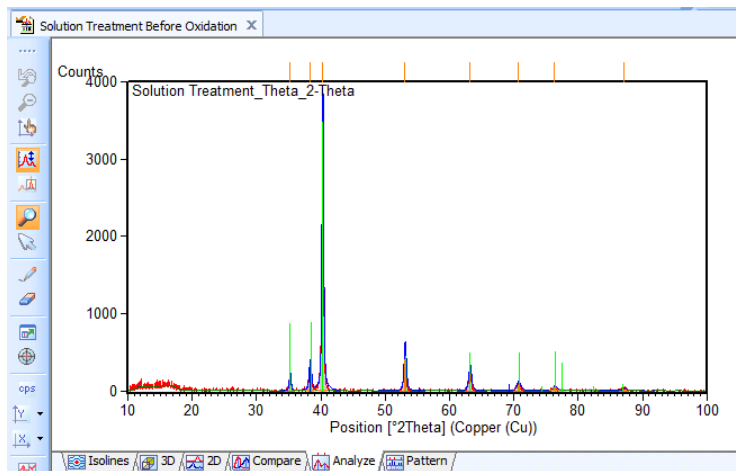
Gambar B.5 Data XRD Paduan *As-Cast*

Peak List :

<i>Peak</i>	<i>2θ (°)</i>	<i>FWHM</i>	<i>d-Spacing Å</i>
1	41,06587	0,5431	2,550237636
2	44,81969	0,76024	2,346317968
3	47,0042	0,58301	2,243038736
4	62,42347	0,55286	1,726131264
5	74,94638	0,68296	1,470249022
6	84,32116	0,88112	1,332644031
7	92,01876	2,14814	1,24328394

Pattern List :

<i>Ref.Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound Name</i>	<i>Chemical Formula</i>
98-005-2522	72	Titanium - Alpha	Ti ₁



Gambar B.6 Data XRD Paduan Perlakuan *Solution Treatment*

Peak List :

Fasa α

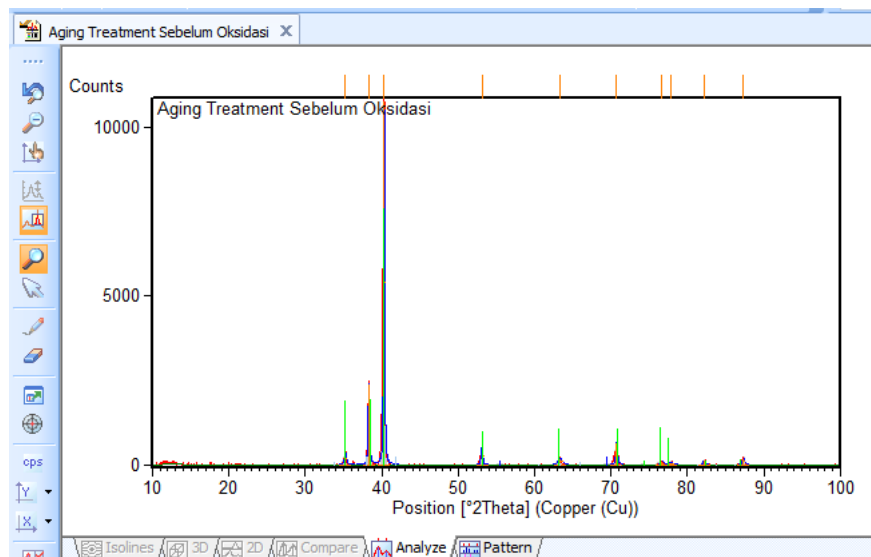
Peak	2θ (°)	FWHM	d-Spacing Å
1	35,28144	0,0385	2,541847888
2	37,69176	4,6081	2,38465528
3	40,27345	4,17501	2,237542891
4	53,25784	3,64114	1,718612683
5	63,25531	0,85023	1,468925405
6	70,69151	5,25082	1,331525958
7	76,6206	5,14304	1,242579487
8	87,21999	5,31806	1,116788143

Fasa β

Peak	2θ (°)	FWHM	d-Spacing Å
2	37,69176	4,6081	2,541847888

Pattern List :

Ref.Code	Score	Compound Name	Chemical Formula
98-007-6265	61	Titanium - Alpha	Ti ₁
98-015-1409	33	Titanium - Beta	Ti ₁



Gambar B.7 Data XRD Paduan Perlakuan *Aging Treatment*

Peak List :

Fasa α

Peak	2 θ (°)	FWHM	d-Spacing Å
1	35,27132	0,14168	2,542554003
2	38,33333	0,3078	2,34620703
3	40,46512	0,60134	2,2273855
4	53,56589	0,04007	1,709453573
5	63,58527	52,9064	1,462095577
6	70,79457	1204,228	1,329840159
7	76,93798	72,31039	1,238243325
8	78,12016	5,88565	1,222436549
9	82,24806	4,14E-04	1,171218286
10	87,44186	28,36719	1,114524983

Fasa β

<i>Peak</i>	<i>2θ (°)</i>	<i>FWHM</i>	<i>d-Spacing Å</i>
2	38,33333	0,3078	2,34620703
9	82,24806	4,14E-04	1,171218286

Pattern List :

<i>Ref.Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound Name</i>	<i>Chemical Formula</i>
98-007-6265	49	Titanium - Alpha	Ti ₁
98-004-4391	31	Titanium - Beta	Ti ₁

3. Data Nilai Kekerasan Paduan

Tabel B.1 Data Nilai Kekerasan Paduan *As-Cast*

Jenis Paduan	Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)	Rata-Rata Nilai Kekerasan
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (<i>As-Cast</i>)	1	353,7	355,28
	2	353,3	
	3	351,5	
	4	357,3	
	5	359,8	
	6	359,6	
	7	345,3	
	8	359	
	9	358	

Tabel B.2 Data Nilai Kekerasan *Solution Treatment*

Jenis Paduan	Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)	Rata-Rata Nilai Kekerasan
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (<i>Solution Treatment</i>)	1	425,9	422,35
	2	406,2	
	3	403,6	
	4	400,7	
	5	403,6	
	6	440,1	
	7	456	
	8	457	
	9	408,1	

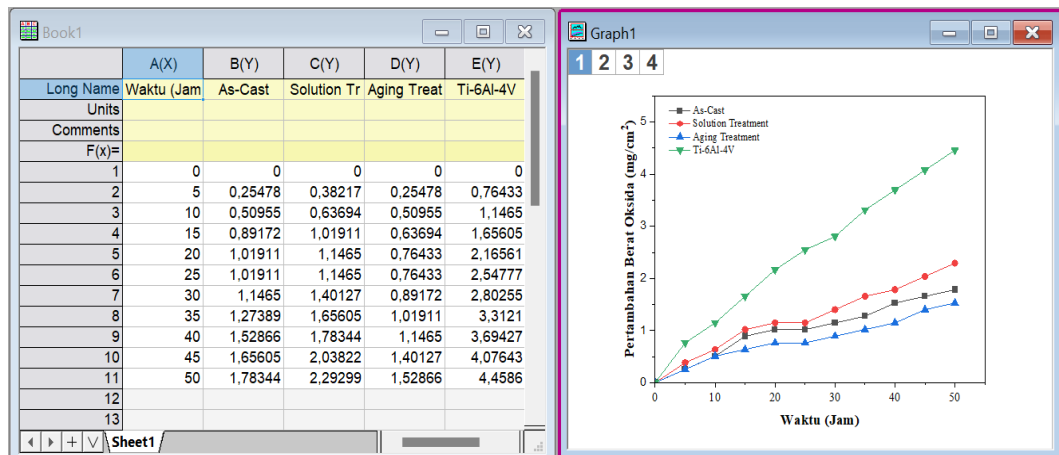
Tabel B.3 Data Nilai Kekerasan *Aging Treatment*

Jenis Paduan	Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)	Rata-Rata Nilai Kekerasan
Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si (<i>Aging Treatment</i>)	1	435	447,63
	2	432	
	3	442,1	
	4	434,7	
	5	446,2	
	6	464,6	
	7	464,7	
	8	464,3	
	9	445,1	

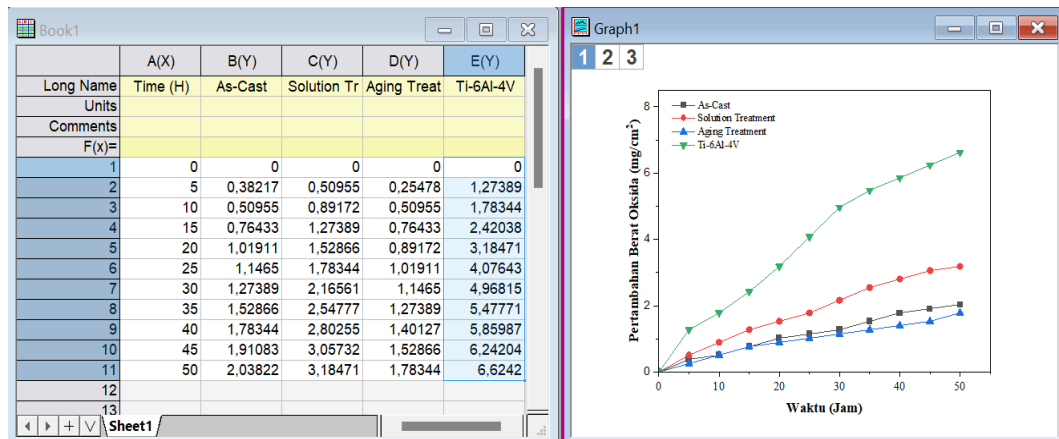
Tabel B.4 Data Nilai Kekerasan Paduan Ti-6Al-4V

Jenis Paduan	Titik Indentasi	Nilai Kekerasan (HVN)	Rata-Rata Nilai Kekerasan
Ti-6Al-4V	1	356,2	347,5
	2	340,6	
	3	348,1	
	4	346,3	
	5	351,7	
	6	343,7	
	7	346,9	
	8	340,8	
	9	353	

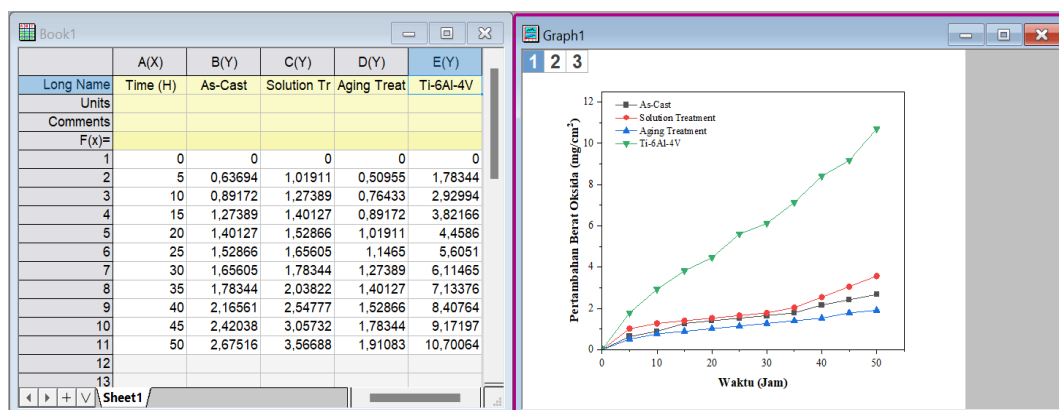
4. Data Nilai Oksidasi



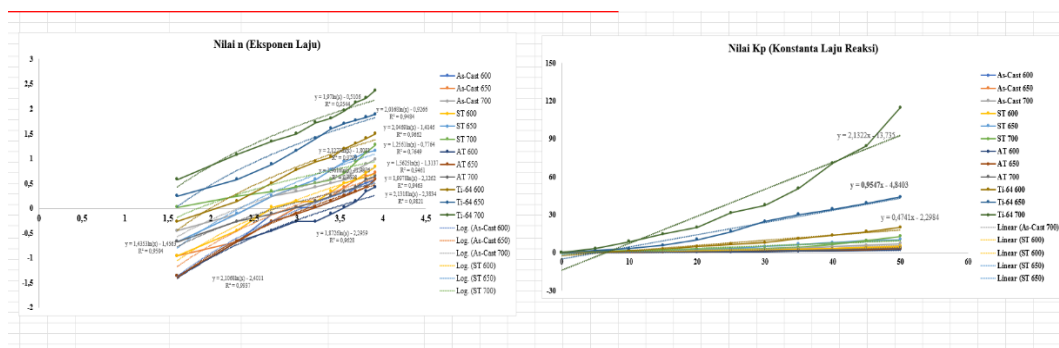
Gambar B.8 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 600°C



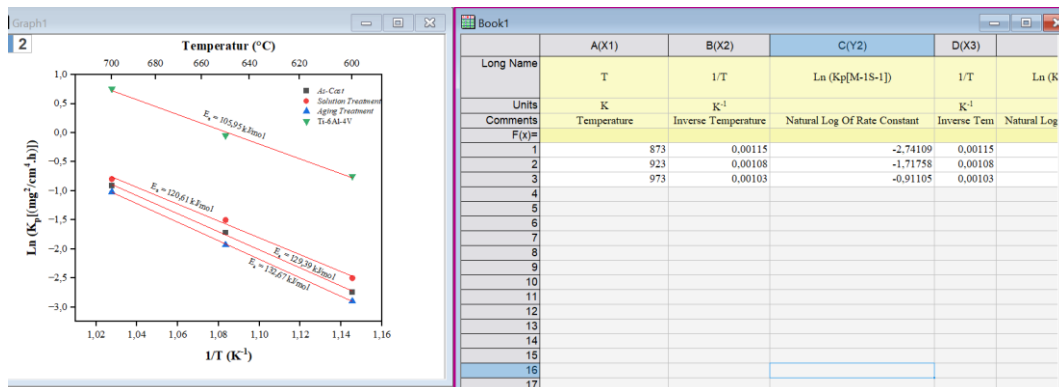
Gambar B.9 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 650°C



Gambar B.10 Data Hasil Pengujian Oksidasi Temperatur 700°C

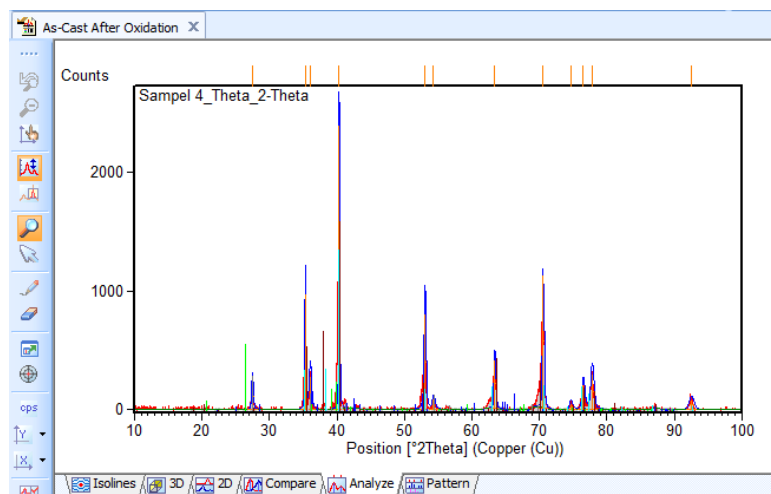


Gambar B.11 Data Hasil Nilai n dan K_p Semua Sampel

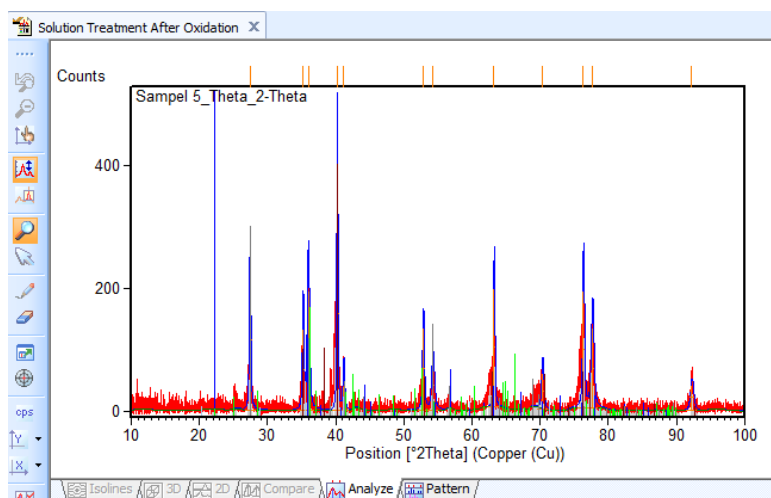


Gambar B.12 Data Hasil Plot Arhenius Oksidasi

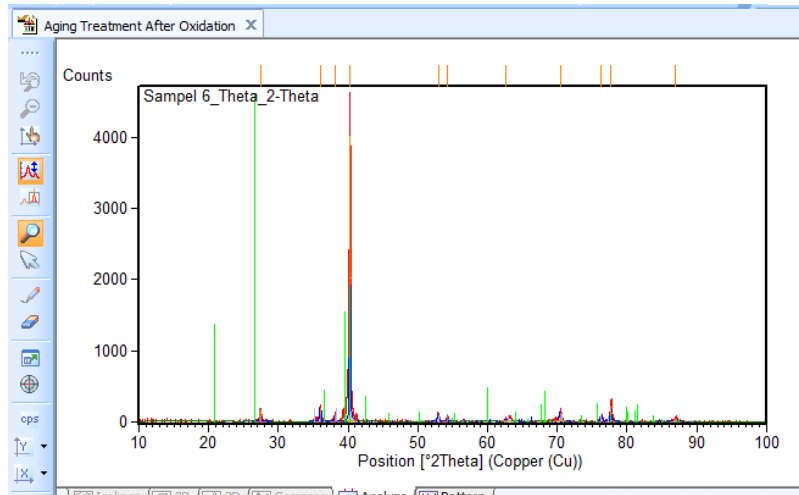
5. Data Hasil Karakterisasi XRD Setelah Uji Oksidasi



Gambar B.13 XRD Sampel *As-Cast* Setelah Uji Oksidasi



Gambar B.14 XRD Sampel *Solution Treatment* Setelah Uji Oksidasi



Gambar B.15 XRD Sampel *Aging Treatment* Setelah Uji Oksidasi

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan



Gambar C.1 Air Dingin



Gambar C.2 *As-Cast* Paduan Utama



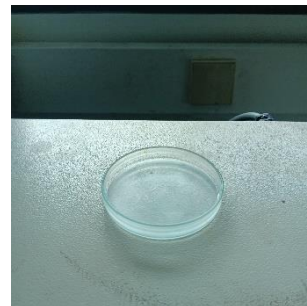
Gambar C.3 *As-Cast* Ti-6Al-4V



Gambar C.4 Aquades



Gambar C.5 Cawan *Crusible*



Gambar C.6 Cawan Petri



Gambar C.7 Cetakan *Mounting*



Gambar C.8 *Colloidal Silica*



Gambar C.9 *Dryer*



Gambar C.10 Etanol



Gambar C.11 Gas Argon



Gambar C.12 Gelas Kimia



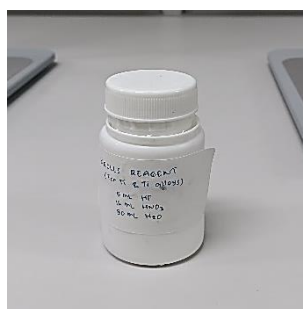
Gambar C.13 *Hardener*



Gambar C.14 Jangka Sorong



Gambar C.15 Kertas Ampelas



Gambar C.16 Larutan Kroll



Gambar C.17 Mesin Bubut



Gambar C.18 Mesin *Grinding-Polishing*



Gambar C.19 Mikroskop Optik



Gambar C.20 *Muffle Furnace*



Gambar C.21 Neraca Digital



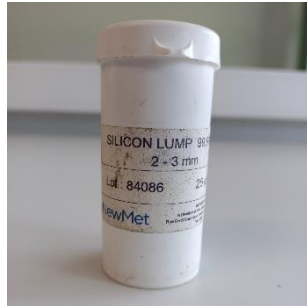
Gambar C.22 Resin Bening



Gambar C.23 Sampel Al Murni



Gambar C.24 Sampel Nb Murni



Gambar C.25 Sampel Si Murni



Gambar C.26 Sampel Sn Murni



Gambar C.27 Sampel Ti Murni



Gambar C.28 Sampel Zr Murni



Gambar C.29 SEM-EDS



Gambar C.30 Tang Penjepit



Gambar C.31 Tube Furnace



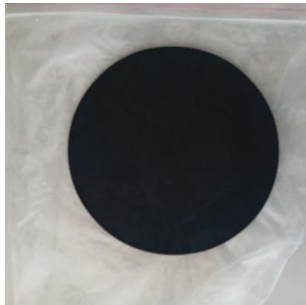
Gambar C.32 VAR Furnace



Gambar C.33 *Vicker's Microhardness*



Gambar C.34 *Wire-Cut*



Gambar C.35 *Woll Polish*



Gambar C.36 *XRD*