

**STUDI PERILAKU OKSIDASI SIKLIK PADUAN Ti-6Al-5Nb-  
3Zr-1Sn UNTUK APLIKASI MATERIAL BILAH  
KOMPRESOR BERTEKANAN TINGGI  
PADA MESIN PESAWAT**

**SKRIPSI**

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



Oleh:

Methalia Novrindah  
3334200060

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON – BANTEN  
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI PERILAKU OKSIDASI SIKLIK PADUAN Ti-6Al-5Nb-  
3Zr-1Sn UNTUK APLIKASI MATERIAL BILAH  
KOMPRESOR BERTEKANAN TINGGI  
PADA MESIN PESAWAT**

**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

Pembimbing II



**Prof. Alfinano, S.T., M.T., Ph.D.**

NIP. 197406292003121001



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

NIP. 19890701201401101

LEMBAR PERSETUJUAN

STUDI PERILAKU OKSIDASI SIKLIK PADUAN Ti-6Al-5Nb-  
3Zr-1Sn UNTUK APLIKASI MATERIAL BILAH  
KOMPRESOR BERTEKANAN TINGGI  
PADA MESIN PESAWAT

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

**Methalia Novrindah**

**3334200060**

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal  
5 September 2024


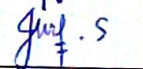
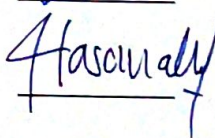
Susunan Dewan Penguji

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

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

Penguji III : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.

Tanda Tangan

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

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



**Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D.**

NIP. 198003072005011002

## LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Studi Perilaku Oksidasi Temperatur Tinggi Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn untuk Aplikasi Material Bilah Kompresor Bertekanan Tinggi pada Mesin Pesawat

Nama Mahasiswa : Methalia Novrindah

NIM : 3334200060

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, 29 Juni 2024



Methalia Novrindah  
NIM. 3334200060

## ABSTRAK

Industri penerbangan membutuhkan material yang memiliki ketahanan pada temperatur tinggi (*high temperatur resistance*), ketahanan terhadap aus, kekerasan yang tinggi dan berbagai kondisi yang dimungkinkan. Indonesia memiliki industri penerbangan yang dapat bersaing dengan industri penerbangan global dengan nama perusahaan yaitu PT Dirgantara Indonesia. PT Dirgantara Indonesia diharapkan juga nantinya sudah dapat memproduksi sendiri komponen-komponen, salah satunya yaitu bilah kompresor bertekanan tinggi. Pada industri penerbangan, paduan titanium dapat meningkatkan performa mesin pesawat terbang dan peningkatan *thrust-weight ratio*. Oleh karena itu, *thrust-weight ratio* dapat meningkat secara signifikan karena adanya penurunan bobot dengan cara mengganti *superalloy* berbasis nikel dengan paduan titanium. Namun, saat ini temperatur aplikasi maksimum paduan titanium bertambah lebih besar dari 500 °C. Hal itu dipengaruhi oleh perilaku oksidasi temperatur tinggi. Untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan titanium, sudah banyak modifikasi-modifikasi paduan titanium telah dipelajari. Modifikasi-modifikasi ini berupaya untuk meningkatkan kinerja material sekaligus mengurangi bobot keseluruhan dan sudah mulai diterapkan pengaplikasiannya, contohnya badan pesawat dan *blade* mesin pesawat terbang. Modifikasi dalam penelitian ini menggunakan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Paduan dilakukan perilaku oksidasi siklik untuk mengetahui ketahanan oksidasi pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C dan dengan memvariasi jumlah siklus sebesar 6, 8, dan 10 tiap temperatur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki struktur mikro *α-colony* dengan pola *Widmanstätten*. Lapisan oksida yang terbentuk terdiri dari Ti<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiSnO<sub>2</sub>, dan Sn<sub>3</sub>Zr<sub>5</sub>O. Kinetika oksidasi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn mengikuti hukum parabola dengan energi aktivasi sebesar 116 kJ/mol.

**Kata Kunci:** Paduan Titanium, Perilaku Oksidasi Siklik, Ketahanan Temperatur Tinggi, Lapisan Oksidasi, Kinetika Oksidasi

## **ABSTRACT**

*The aviation industry needs materials that have high temperature resistance, wear resistance, high hardness and various possible conditions. Indonesia has an aviation industry that can compete with the global aviation industry with the company name PT Dirgantara Indonesia. PT Dirgantara Indonesia is also expected to be able to produce its own components, one of which is the high-pressure compressor blade. In the aviation industry, titanium alloy can improve aircraft engine performance and increase thrust-weight ratio. Therefore, the thrust-weight ratio can increase significantly due to the weight reduction by replacing nickel-based superalloy with titanium alloy. However, currently the maximum application temperature of titanium alloys is greater than 500 °C. It is influenced by high temperature oxidation behavior. To increase the high temperature oxidation resistance of titanium alloy, many modifications of titanium alloy have been studied. These modifications are trying to improve the performance of the material while reducing the overall weight and have begun to be applied, for example the fuselage and aircraft engine blades. Modification in this research uses Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn alloy. Alloys perform cyclic oxidation behavior to determine the oxidation resistance at temperatures of 600 °C, 650 °C, and 700 °C and by varying the number of cycles by 6, 8, and 10 at each temperature. Research results show that Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn alloy has an  $\alpha$ -colony microstructure with a Widmanstätten pattern. The oxide layer that is formed consists of  $Ti_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiSnO_2$ , and  $Sn_3Zr_5O$ . The oxidation kinetics of Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn alloy follow the parabolic law with an activation energy of 116 kJ/mol.*

**Keywords:** *Titanium Alloy, Cyclic Oxidation Behavior, High Temperature Resistance, Oxidation Layers, Oxidation Kinetics*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat dan karunia-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul “Studi Perilaku Oksidasi Siklik Temperatur Tinggi Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn untuk Aplikasi Material Bilah Kompresor Bertekanan Tinggi pada Mesin Pesawat”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mengerjakan tugas akhir pada program sarjana di Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Proses pengerjaan skripsi ini banyak dibantu oleh beberapa pihak, dengan ini penulis mengungkapkan rasa terima kasih dengan tulus kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan Ibu Anistasia Milandia, S.T., M.T. selaku koordinator skripsi Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Bapak Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D. selaku pembimbing I dan Bapak Galih Senopati, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang selalu senantiasa memberikan arahan kepada penulis selama penelitian.
3. Bapak Muliaman Sipayung, Ibu Martha Solinda Sinaga, Kak Bella, dan Marcel selaku keluarga yang selalu menjadi pemberi semangat no.1 untuk penulis, serta diri sendiri.
4. Seluruh Sivitas Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Pusat Penelitian Metalurgi dan Material (P2MM) – Serpong yang senantiasa memberikan arahan kepada penulis selama melakukan penelitian
5. Teman-teman *Behind The Scenes*, teman-teman *Cherish*, rekan asisten LDC, teman-teman Metalurgi 2020, teman-teman BRIN G.225 dan pihak lainnya yang selalu mendukung dan memberi semangat kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran akan penulis nantikan. Besar harapan penulis dengan menyusun skripsi ini dapat membantu penulis menjadi sebuah acuan penelitian dan bermanfaat bagi teman-teman ataupun pihak lain yang memerlukannya

Cilegon, 29 Juni 2024

Methalia Novrindah



## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b><i>ABSTRACT</i></b> .....	vi
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Masalah.....	7
1.5 Sistematika Penulisan .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Titanium.....	10
2.2 Paduan Titanium.....	11
2.2.1 Fasa $\alpha$ .....	12
2.2.2 Fasa $\beta$ .....	13
2.2.3 Fasa $\alpha+\beta$ .....	13

2.3	<i>Titanium Superalloys</i> .....	13
2.4	Aplikasi Material Bilah Kompresor Bertekanan Tinggi.....	14
2.5	Material Temperatur Tinggi.....	16
2.6	Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	20
2.7	Pengaruh Penambahan Unsur.....	21
2.7.1	Pengaruh Penambahan Nb.....	21
2.7.2	Pengaruh Penambahan Zr.....	22
2.7.3	Pengaruh Penambahan Sn .....	26
2.8	Laju Oksidasi.....	27
2.9	Lapisan Oksida .....	29

### **BAB III METODE PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2	Alat dan Bahan .....	33
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan.....	33
3.2.2	Bahan-bahan yang Digunakan.....	34
3.3	Prosedur Penelitian.....	34
3.3.1	Prosedur Pembuatan Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	34
3.3.2	Prosedur Metalografi .....	35
3.3.3	Prosedur Karakterisasi Komposisi Menggunakan SEM-EDS .....	36
3.3.4	Prosedur Pengujian Kekerasan .....	37
3.3.5	Prosedur Pengujian Oksidasi Siklik .....	39
3.3.6	Prosedur Karakterisasi Komposisi Kimia Lapisan Oksida Menggunakan XRD.....	40

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Data Komposisi Hasil Pengecoran .....	42
4.2 Pengamatan Struktur Mikro .....	43
4.3 Hasil Pengujian <i>Microhardness Vickers</i> .....	47
4.4 Analisis Kinetika Oksidasi .....	51
4.5 Ketebalan Lapisan Oksida .....	55
4.6 Permukaan Sampel Setelah dilakukan Oksidasi Siklik .....	60
4.7 Senyawa Lapisan Oksida .....	62
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	65
5.2 Saran .....	66
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN .....</b>	<b>72</b>
<b>LAMPIRAN B DATA PENELITIAN .....</b>	<b>79</b>
<b>LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN .....</b>	<b>101</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
<b>Tabel 2.1</b> Sifat Fisik dan Kimia Titanium .....	10
<b>Tabel 2.2</b> <i>Commercially Pure Titanium</i> .....	12
<b>Tabel 2.3</b> Eksponen Laju $n$ dan Konstanta Laju $k_p$ Ti-6Al-4V teroksidasi pada 850-1100 °C .....	18
<b>Tabel 4.1</b> Komposisi Ti-6Al-4V (ASTM B265 Gr5).....	42
<b>Tabel 4.2</b> Komposisi Kimia Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn Hasil SEM-EDS .....	43
<b>Tabel A.1</b> Komposisi Bahan Baku Secara Perhitungan.....	73
<b>Tabel B.1</b> Hasil SEM-EDS <i>As-Cast</i> .....	80
<b>Tabel B.2</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD <i>As-Cast</i> .....	80
<b>Tabel B.3</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD <i>As-Cast</i> .....	81
<b>Tabel B.4</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 600 °C .....	82
<b>Tabel B.5</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 600 °C .....	84
<b>Tabel B.6</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-6 pada 650 °C .....	84
<b>Tabel B.7</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-6 pada 650 °C .....	86
<b>Tabel B.8</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-8 pada 650 °C .....	87
<b>Tabel B.9</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-8 pada 650 °C .....	89
<b>Tabel B.10</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 650 °C .....	89
<b>Tabel B.11</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 650 °C .....	91
<b>Tabel B.12</b> <i>Peak List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 700 °C .....	92
<b>Tabel B.13</b> <i>Pattern List</i> Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 700 °C .....	94
<b>Tabel B.14</b> Hasil Pengujian <i>Microhardness Vickers As-Cast</i> .....	95
<b>Tabel B.15</b> Hasil Pengujian <i>Microhardness Vickers</i> pada 600 °C.....	96

<b>Tabel B.16</b> Hasil Pengujian <i>Microhardness Vickers</i> pada 650 °C.....	96
<b>Tabel B.17</b> Hasil Pengujian <i>Microhardness Vickers</i> pada 700 °C.....	96
<b>Tabel B.18</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 600 °C....	97
<b>Tabel B.19</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 650 °C....	97
<b>Tabel B.20</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 700 °C....	98
<b>Tabel B.21</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 600 °C.....	98
<b>Tabel B.22</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 650 °C.....	99
<b>Tabel B.23</b> Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 700 °C.....	99

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Struktur titanium, a) HCP dan b) BCC .....	11
<b>Gambar 2.2</b> Bilah Kompesor dalam mesin turbin gas pesawat terbang .....	15
<b>Gambar 2.3</b> Mesin jet pada pesawat dan potensi material .....	16
<b>Gambar 2.4</b> Kurva Arrhenius konstanta laju parabola kp untuk oksidasi Ti-6Al-4V pada 850 – 1100 °C .....	18
<b>Gambar 2.5</b> Pola XRD permukaan Ti-6Al-4V dalam kondisi a) 900 °C (1 dan 2 jam) dan b) 1050 °C (1, 2, 3 jam) .....	18
<b>Gambar 2.6</b> Komposisi skala oksida Ti-6Al-4V pada temperatur tinggi .....	19
<b>Gambar 2.7</b> Digram fasa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	21
<b>Gambar 2.8</b> Hasil XRD Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr sesudah oksidasi pada 800 °C dengan 100 jam: (a) x = 0; (b) x = 1; (c) x = 6 .....	23
<b>Gambar 2.9</b> Hasil XRD setelah oksidasi pada 800 °C dengan perbedaan waktu : (a) Ti-22Al-26Nb-1Zr; (b) Ti-22Al-21Nb-6Zr .....	24
<b>Gambar 2.10</b> Morfologi permukaan paduan Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr setelah oksidasi pada 800 °C selama 100 jam (a) x = 0; (b) x = 1; (c) x = 6 .....	25
<b>Gambar 2.11</b> Kekerasan mikro dan SEM penampang paduan Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr: (a) x = 0; (b) x = 1; (c) x = 6 .....	26
<b>Gambar 2.12</b> Variasi laju reaksi oksidasi.....	28
<b>Gambar 2.13</b> Mekanisme pertumbuhan lapisan oksida pada permukaan logam. 30	
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	32
<b>Gambar 3.2</b> a) Pengecoran Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn; b) <i>Vacuum Arc Remelting</i> .....	35
<b>Gambar 3.3</b> Mikroskop Optik.....	36
<b>Gambar 3.4</b> Skematis posisi pengujian kekerasan; a) sampel <i>as-cast</i> dan b) sampel setelah oksidasi .....	37
<b>Gambar 3.5</b> Mesin uji kekerasan .....	39

<b>Gambar 3.6</b> a) Sampel dengan cawan; b) <i>Muffle Furnace</i> .....	40
<b>Gambar 4.1</b> Hasil XRD <i>as-cast</i> paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	44
<b>Gambar 4.2</b> Struktur mikro <i>as-cast</i> paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn .....	45
<b>Gambar 4.3</b> Struktur mikro paduan Ti-6Al-4V [38].....	46
<b>Gambar 4.4</b> Nilai kekerasan sampel <i>as-cast</i> .....	47
<b>Gambar 4.5</b> Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 600 °C; a. 6 siklus, b. 8 siklus, dan c. 10 siklus.....	48
<b>Gambar 4.6</b> Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 650 °C; a) 6 siklus, b) 8 siklus, dan c) 10 siklus.....	49
<b>Gambar 4.7</b> Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 700 °C; a) 6 siklus, b) 8 siklus, dan c) 10 siklus.....	50
<b>Gambar 4.8</b> Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-4V temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C .....	51
<b>Gambar 4.9</b> Kinetika oksidasi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan Ti-6Al-4V pada temperatur; a. 600 °C, b. 650 °C, dan c. 700 °C .....	52
<b>Gambar 4.10</b> Plot Arrhenius konstanta laju parabola (kp) .....	55
<b>Gambar 4.11</b> Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 600 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10).....	56
<b>Gambar 4.12</b> Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 650 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10).....	57
<b>Gambar 4.13</b> Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 700 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10).....	58
<b>Gambar 4.14</b> Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 600 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V) .....	58
<b>Gambar 4.15</b> Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 650 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V) .....	59
<b>Gambar 4.16</b> Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 700 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V) .....	59
<b>Gambar 4.17</b> Ketebalan lapisan oksida .....	60
<b>Gambar 4.18</b> Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.....	61

<b>Gambar 4.19</b> Sampel Ti-6Al-4V .....	61
<b>Gambar 4.20</b> Senyawa-senyawa oksida yang terbentuk pada temperatur 650 °C .....	63
<b>Gambar 4.21</b> Senyawa-senyawa oksida yang terbentuk pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C.....	64
<b>Gambar C.1</b> Cawan krusibel.....	102
<b>Gambar C.2</b> Cetakan <i>mounting</i> .....	102
<b>Gambar C.3</b> <i>Dryer</i> .....	102
<b>Gambar C.4</b> <i>X-Ray diffraction (XRD)</i> .....	102
<b>Gambar C.5</b> Gelas kimia .....	102
<b>Gambar C.6</b> Mesin bubut .....	102
<b>Gambar C.7</b> Mesin <i>grinding</i> .....	103
<b>Gambar C.8</b> Mesin <i>polishing</i> .....	103
<b>Gambar C.9</b> <i>Microhardness Vickers</i> .....	103
<b>Gambar C.10</b> Mikroskop optik.....	103
<b>Gambar C.11</b> Mistar .....	103
<b>Gambar C.12</b> <i>Muffle furnace</i> .....	103
<b>Gambar C.13</b> Neraca digital .....	104
<b>Gambar C.14</b> Pinset.....	104
<b>Gambar C.15</b> <i>Scanning Electron Microscope Spectroscopy (SEM-EDS)</i> .....	104
<b>Gambar C.16</b> Tang buaya .....	104
<b>Gambar C.17</b> <i>Vacuum Arc Remelting (VAR)</i> .....	104
<b>Gambar C.18</b> <i>Wire Cut Machine</i> .....	104
<b>Gambar C.19</b> Aquades.....	105
<b>Gambar C.20</b> Etanol .....	105



<b>Gambar C.21</b> Gas argon .....	105
<b>Gambar C.22</b> Kapas .....	105
<b>Gambar C.23</b> Kertas ampelas.....	105
<b>Gambar C.24</b> Larutan <i>colloidal silica</i> .....	105
<b>Gambar C.25</b> Larutan hidrogen peroksida .....	106
<b>Gambar C.26</b> Larutan kroll .....	106
<b>Gambar C.27</b> Logam aluminium.....	106
<b>Gambar C.28</b> Logam niobium.....	106
<b>Gambar C.29</b> Logam timah.....	106
<b>Gambar C.30</b> Logam titanium.....	106
<b>Gambar C.31</b> Logam zirkonium.....	107
<b>Gambar C.32</b> Resin bening .....	107
<b>Gambar C.33</b> Sampel Ti-6Al-4V.....	107
<b>Gambar C.34</b> Sarung tangan latex.....	107

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Industri penerbangan membutuhkan material yang memiliki ketahanan pada temperatur tinggi (*high temperatur resistance*), ketahanan terhadap aus, kekerasan yang tinggi dan berbagai kondisi yang dimungkinkan. Indonesia memiliki industri penerbangan yang dapat bersaing dengan industri penerbangan global dengan nama perusahaan yaitu PT Dirgantara Indonesia. PT Dirgantara Indonesia telah memproduksi berbagai jenis pesawat (Boeing, Airbus, General Dynamic, dan sebagainya), helikopter, dan senjata. Selain itu juga, PT Dirgantara Indonesia menyediakan jasa pemeliharaan dan pelatihan untuk berbagai mesin pesawat. PT Dirgantara Indonesia diharapkan juga nantinya sudah dapat memproduksi sendiri komponen-komponen. Salah satu komponen yang menggunakan paduan titanium yaitu bilah kompresor bertekanan tinggi.

Pada industri penerbangan, paduan titanium dapat meningkatkan performa mesin pesawat terbang dan peningkatan *thrust-weight ratio*. Saat ini paduan titanium mewakili sepertiga berat dari mesin pesawat terbang modern. Selain itu, paduan titanium menjadi material mesin kedua yang paling banyak digunakan setelah *superalloy* (paduan yang memiliki sifat-sifat tinggi, seperti kekuatan, stabilitas, dan ketahanan pada temperatur tinggi) berbasis nikel [1]. Ketika suku cadang yang beroperasi di temperatur tinggi pada mesin pesawat terbang yang biasanya dibuat menggunakan *superalloy* berbahan dasar nikel akan berbanding

terbalik dengan hal meningkatkan *thrust-weight ratio* pada mesin penerbangan. Oleh karena itu, *thrust-weight ratio* dapat meningkat secara signifikan karena adanya penurunan bobot dengan cara mengganti *superalloy* berbasis nikel dengan paduan titanium. Namun, kekurangan dari salah satu sifat paduan titanium yaitu ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang buruk. Hal ini dapat membatasi pengaplikasiannya sebagai komponen-komponen yang pengoperasiannya dilakukan pada temperatur tinggi. Temperatur aplikasi maksimum paduan titanium konvensional adalah sekitar 350 °C. Namun, saat ini temperatur aplikasi maksimum paduan titanium bertambah lebih besar menjadi 500 °C [2]. Temperatur maksimum untuk masa pakai yang lama dalam aplikasi paduan titanium dipengaruhi oleh perilaku oksidasi temperatur tinggi. Salah satu contoh dari paduan titanium yang sudah digunakan di industri penerbangan adalah paduan Ti-6Al-4V. Paduan titanium memiliki ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang cukup buruk. Paduan Ti-6Al-4V dalam keadaan *as-cast* (logam hasil pengecoran dan belum diberikan perlakuan panas) dapat ditandai dengan butiran besar dan koloni  $\alpha$  kasar, hal ini dapat memengaruhi sifat mekanik dari material tersebut relatif buruk [3]. Oleh karena itu, paduan titanium Ti-6Al-4V hanya dapat digunakan untuk memproduksi *fan blades*, *1<sup>st</sup>*, dan *2<sup>st</sup>* *blades* pada mesin pesawat terbang [1].

Degradasi termal paduan berbasis titanium telah menarik perhatian dalam beberapa tahun terakhir [4]. Dianggap sebagai mode degradasi utama, difusi oksigen internal yang menyebabkan oksidasi paduan merupakan penghalang efisiensi material. Difusi internal oksigen atau nitrogen dan difusi eksternal ion logam biasanya masuk ke dalam proses oksidasi. Oksidasi pada paduan biasanya terjadi dalam beberapa tahap. Oksidasi diawali dengan tahap munculnya lapisan

oksida tipis pada permukaan logam paduan. Afinitas unsur paduan terhadap oksigen menentukan kinetika oksidasi. Dilanjutkan dengan tahap tekanan internal serta eksternal yang menyebabkan retakan pada lapisan atau kerak oksida. Retakan ini akan menyebabkan degradasi akhir paduan [5]. Karena sifat oksidasi dan difusi oksigen paduan titanium, penggunaan paduan titanium seringkali dibatasi dibawah temperatur di bawah 600 °C. Sifat-sifat paduan sangat menurun pada saat temperatur meningkat, paduan tidak akan tahan terhadap udara panas tersebut. Hal ini sering terjadi pada logam yang teroksidasi pada temperatur tinggi. Ini mempunyai dampak signifikan pada sifat, permukaan, dan masa pakai logam [6]. Bahkan pada temperatur kamar, afinitas titanium yang tinggi terhadap oksigen akan menyebabkan lapisan oksida yang sangat tipis di permukaannya.

Secara umum, reaksi oksidasi titanium digambarkan sebagai hasil dari dua proses yaitu difusi oksigen ke permukaan sampel dan desorpsi atom O dari permukaan disertai reduksi bilangan oksidasi atom Ti [7]. Ketika oksigen masuk dan bereaksi dengan permukaan paduan titanium pada saat temperatur tinggi dapat mengurangi performa material tersebut dapat dikatakan berdampak buruk. Pertama, ketebalan dari lapisan oksidasi akan meningkat seiring dengan difusi internal oksigen. Difusi oksigen yang meningkat dapat menurunkan kekuatan ikatan antara lapisan oksidasi dengan substrat dan dapat pula menyebabkan terjadinya pengelupasan lapisan oksidasi dari substrat. Selain itu, perlakuan temperatur tinggi dapat meningkatkan mobilitas oksigen dalam kisi oksida. Dampak kedua adalah fasa yang teratur dan lapisan rapuh (*brittle*) terbentuk pada permukaan substrat. Ketika lapisan rapuh terbentuk pada permukaan akan menyebabkan distorsi kisi dan mengurangi sifat mekanik substrat. Distorsi yang meningkat selama oksidasi secara

terus menerus akan menyebabkan cacat atau retak pada lapisan oksida [4]. Titanium memiliki kemampuan untuk membentuk titanium oksida ( $\text{TiO}_2$ ) secara spontan ketika terpapar oksigen, menurut penelitian tentang adsorpsi *fibronectin* pada permukaan titanium oksida ( $\text{TiO}_2$ ) menunjukkan bahwa titanium cenderung membentuk ikatan hidrogen yang kuat dengan ion oksigen pada permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa titanium memiliki kemampuan untuk membentuk ikatan kovalen dengan oksigen [8]. Untuk meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan titanium, sudah banyak modifikasi-modifikasi paduan titanium telah dipelajari. Modifikasi-modifikasi ini berupaya untuk meningkatkan kinerja material sekaligus mengurangi bobot keseluruhan dan sudah mulai diterapkan pengaplikasiannya, contohnya badan pesawat dan *blade* mesin pesawat terbang.

Menurut beberapa penelitian menggunakan paduan berbasis  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  pada temperatur di atas  $650\text{ }^\circ\text{C}$ , produk oksidasi terdiri dari lapisan luar yang kaya akan alumina, oksigen dan nitrogen berkontribusi terhadap kerapuhan bawah permukaan karena zat terlarut interstitial atau pembentukan fase yang mengandung kedua unsur tersebut. Hingga saat ini, kemajuan besar untuk lapisan oksida telah dicapai dengan tujuan meningkatkan ketahanan oksidasi paduan berbasis  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ . Namun, memiliki kekuatan pengikat yang buruk antara paduan dasar dan lapisan tahan oksidasi dapat menjadi hambatan selama siklus termal sehingga lebih efektif dan ekonomis untuk meningkatkan ketahanan oksidasi yang tinggi dengan menambahkan unsur-unsur tertentu pada paduan. Peningkatan kandungan unsur Nb dapat menurunkan ketahanan oksidasi dikarenakan terbentuknya  $\text{TiNb}_2\text{O}_7$  atau fase  $\text{AlNbO}_4$ , sedangkan ketika unsur Nb dan Al digunakan secara bersamaan dapat mengurangi efek tersebut [9]. Selain itu, penggunaan aluminium pada paduan

titanium akan meningkatkan ketahanan material terhadap temperatur yang tinggi dan waktu yang lebih lama dengan menurunkan laju oksidasi. Penambahan aluminium menyebabkan pembentukan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  di lapisan oksida, yang dapat mengurangi fluks oksigen melalui kerak. Namun, sebagian besar penambahan unsur aluminium pada paduan titanium dibatasi hanya sampai 6%w.t untuk menghindari pembentukan fasa  $\text{Ti}_3\text{Al}$  yang dapat menurunkan keuletan material [10]. Penggunaan unsur niobium pada penelitian ini untuk menurunkan konsentrasi kekosongan oksigen, sehingga menghambat pertumbuhan rutil, meningkatkan aktivitas Al, dan mengurangi kelarutan oksigen pada paduan [11]. Menurut penelitian yang menggunakan paduan  $\text{TiMoNbZrx}$ , Zr menentukan peningkatan ketahanan aus [12]. Hal itu dikarenakan terbentuknya lapisan pelumas yang bertindak untuk mengurangi keausan pada bilah kompresor. Selain itu, penggunaan timah pada paduan titanium dapat menambah ketahanan pengelupasan lapisan oksida [13]. Unsur timah dapat menghalangi difusi oksigen pada permukaan paduan titanium. Pada penelitian ini akan melakukan perilaku oksidasi siklik temperatur tinggi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dengan variasi temperatur dan jumlah siklus untuk mengetahui pengaruh perilaku oksidasi melalui kinetika, struktur mikro, lapisan oksida yang terbentuk dan sifat mekanik yang didapatkan dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Setelah mengetahui pengaruh perilaku oksidasi temperatur tinggi dapat diprediksi potensi sebagai material bilah kompresor bertekanan tinggi.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, didapatkan identifikasi masalah yang ada dalam penelitian ini yaitu saat *As-Cast*

Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn saat dilakukan uji oksidasi siklik dengan variasi temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C dan dengan variasi jumlah siklus sebesar 6, 8, dan 10 tiap temperatur. Satu siklus oksidasi memerlukan waktu selama 5 jam. Hal tersebut dapat memengaruhi berat dari sampel yang telah melakukan pengujian oksidasi siklik. Semakin tinggi temperatur dan semakin banyak jumlah siklus akan semakin tinggi pula pertambahan massa pada sampel yang telah diuji oksidasi. Perubahan berat tersebut mengikuti hukum parabola. Ketika mengetahui pengaruh temperatur dan jumlah siklus yang digunakan, diharapkan dapat diprediksi potensi untuk material bilah kompresor bertekanan tinggi dengan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn mampu menjadi alternatif paduan titanium yang sudah ada dengan ketahanan oksidasi yang mendekati atau lebih tinggi ketahanannya dari paduan titanium yang telah digunakan dan dapat menjadi paduan alternatif paduan Ti-6Al-4V.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengembangkan serta mendapatkan material bilah kompresor bertekanan tinggi yang memiliki ketahanan yang bagus pada temperatur tinggi. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengidentifikasi struktur mikro yang terbentuk dari *As-Cast* Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.
2. Mengidentifikasi nilai kekerasan yang dimiliki paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn sebagai *As-Cast* dan pengaruh perilaku oksidasi siklik terhadap nilai kekerasan.
3. Mengetahui pengaruh perilaku oksidasi siklik terhadap lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn serta kinetika oksidasinya.

4. Mengembangkan paduan titanium temperatur tinggi yang memiliki ketahanan oksidasi yang tinggi.

#### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan *As-Cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn hasil pembuatan menggunakan *Vacuum Arc Remelting* (VAR)
2. Karakterisasi sampel sebelum dilakukan uji oksidasi siklik dan menggunakan *Scanning Electron Microscope Spectroscopy* (SEM-EDS) dan *X-ray Diffraction* (XRD)
3. Analisa struktur mikro menggunakan mikroskop optik
4. Pemotongan sampel menggunakan mesin *wire cut*
5. Penimbangan massa sampel dilakukan saat uji oksidasi siklik setiap siklus
6. Variabel bebas
  - a. Variasi temperatur = 600 °C, 650 °C, dan 700 °C
  - b. Variasi siklus oksidasi = 6, 8, dan 10 (1 siklus oksidasi = 5 jam)
7. Variabel terikat
  - a. Struktur Mikro
  - b. Perubahan Massa
  - c. Nilai Kekerasan
8. Pengujian yang dilakukan
  - a. Pengujian kekerasan menggunakan *Vickers Hardness*



- b. Pengujian oksidasi siklik
- 9. Analisa ketebalan lapisan oksida menggunakan mikroskop optik setelah pengujian oksidasi siklik
- 10. Karakterisasi sampel menggunakan *XRD*
- 11. Penelitian dilakukan di Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Pusat Riset Metalurgi (PRM) – Serpong.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari lima bab yang terdiri dari Bab I, Bab II, Bab III, Bab IV, dan Bab V. Bab I, menjelaskan hal-hal yang melatarbelakangi penelitian ini perlu dilakukan, landasan permasalahan yang sedang terjadi, fokus penelitian yaitu pemilihan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn sebagai alternatif paduan Ti-6Al-4V, dan memvariasikan metode penelitian berupa temperatur dan jumlah siklus. Bab ini juga menjelaskan mengenai identifikasi masalah yang akan dibahas, tujuan penelitian, batasan masalah untuk mempertegas batasan permasalahan, dan sistematika penulisan. Bab II berisikan uraian-uraian tentang teori titanium, paduan titanium, *titanium superalloys*, aplikasi material bilah kompresor bertekanan tinggi material temperatur tinggi, paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn, laju oksidasi, dan mekanisme pertumbuhan lapisan oksida. Bab III, menggambarkan bagaimana langkah-langkah penelitian dilakukan. Metode penelitian ini diharapkan dapat membantu mencapai tujuan penelitian. Hasil dari metode penelitian ini didapatkan berupa data struktur mikro sebelum dilakukan perilaku oksidasi siklik, nilai kekerasan sebelum dan setelah dilakukan perilaku oksidasi siklik, nilai ketebalan lapisan oksida serta oksida apa saja didalamnya, dan

data kinetika oksidasi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Bab IV, menyajikan analisis dan pembahasan data hasil yang telah didapatkan melalui metode penelitian. Analisis dan pembahasan dilakukan dengan cara membandingkan data hasil penelitian berdasarkan teori yang telah dijabarkan dalam tinjauan pustaka apakah sesuai atau tidak sesuai dengan penjelasan alasan yang ilmiah. Bab V berisikan tentang kesimpulan mengenai rangkuman teori terbaru yang telah didapatkan dari penelitian ini. Selain itu juga, penulis dapat memberikan saran untuk penelitian kedepannya. Bagian akhir terdapat daftar pustaka yang berisi daftar sumber referensi dalam menyusun skripsi dan lampiran-lampiran yang terdiri dari lampiran A mengenai contoh perhitungan penelitian, lampiran B yaitu data penelitian, dan lampiran C menyajikan gambar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

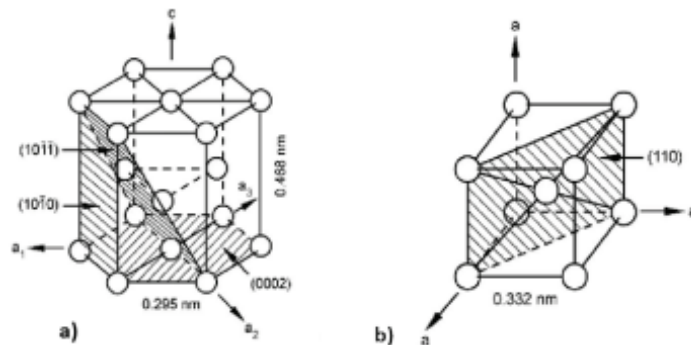
#### 2.1 Titanium

Pada tahun 1791, seorang ahli mineralogi yang berasal dari Inggris menemukan Titanium di *Black Magnetic Sand* di Cornwall dan menyebutnya sebagai '*Menachite*'. Pada tahun 1795, ditemukan kembali oleh seorang ahli mineralogi dan ilmiah Jerman bernama Martin H. Klaproth. Dia menyimpulkan sifat dari logam yang ditemukannya mirip dengan logam yang ditemukan oleh Gregor. Seorang pengungsi yang berasal dari Luksemburg, Dr. Wilhelm Kroll, dikenal sebagai "Bapak Industri Titanium." Dia memperkenalkan Kroll, proses produksi Titanium yang berguna, dimana biro pertambangan AS menggunakan prosedur Kroll untuk menghasilkan titanium [14].

**Tabel 2.1** Sifat Fisik dan Kimia Titanium [14]

<b>Titanium</b>	
Nomor Atom	22
Massa Atom	47,9
Golongan	4D
Titik Lebur	1.672 °C
Massa Jenis	4,5 g/cm <sup>3</sup>
<i>Alpha phase</i> ( $\leq 882,5$ °C)	<i>Hexagonal Close Packed Structure (HCP)</i>
<i>Beta phase</i> ( $\geq 882,5$ °C)	<i>Body Centered Cubic Structure (BCC)</i>

Dapat dilihat pada Tabel 2.1 merupakan penjelasan mengenai sifat fisik dan kimia unsur titanium. Titanium di dalam tabel periodik terdapat pada golongan 4D dengan nomor atom 22 dan massa atom 47,9. Titanium memiliki sifat *allotropy*. Sifat *allotropy* adalah sifat yang memiliki dua struktur Kristal berbeda pada temperatur yang berbeda [15]. Dua struktur kristal tersebut yakni *hexagonal close packed* (HCP) dan *body centered cubic* (BCC) [16]. Titanium juga memiliki titik leleh yang relatif tinggi. Hal tersebut membuat titanium dapat digunakan pada turbin gas yang beroperasi pada temperatur tinggi. Namun, ketika titanium diaplikasikan pada temperatur tinggi akan rentan untuk teroksidasi. Hal ini disebabkan karena titanium memiliki afinitas yang tinggi terhadap oksigen.



**Gambar 2.1** Struktur titanium, a) HCP dan b) BCC [15]

## 2.2 Paduan Titanium

Paduan titanium adalah unsur logam titanium yang dipadukan oleh unsur kimia lainnya. Pada industri *aerospace*, paduan titanium umumnya digunakan untuk *fan* dan kompresor di bagian depan. Selain itu, paduan titanium yang digunakan mempunyai temperatur operasional yang relatif rendah (600 °C atau lebih rendah) [17]. Paduan titanium dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan struktur mikronya, yaitu paduan titanium dengan fasa  $\alpha$ , paduan titanium dengan fasa  $\beta$ , dan paduan titanium dengan fasa  $\alpha + \beta$ .

### 2.2.1 Fasa $\alpha$

Paduan titanium dengan unsur penstabil fasa  $\alpha$  berupa aluminium (Al), timah (Sn), zirkonium (Zr), *gallium* (Ga), oksigen (O), nitrogen (N), dan karbon (C) [15]. Penggunaan unsur penstabil fasa  $\alpha$  digunakan agar menaikkan temperatur transformasi dan menjaga kestabilan paduan titanium dalam temperatur yang lebih tinggi. Paduan titanium dengan fasa  $\alpha$  dan *near*  $\alpha$  memiliki sifat mampu bentuk dan ketangguhan yang lebih baik pada temperatur tinggi. Paduan titanium *near*  $\alpha$  umumnya digunakan untuk komponen besar seperti mesin kompresor *disk*, *blades*, dan *catridge receivers* pada industri pesawat terbang [18].

**Tabel 2.2** *Commercially Pure Titanium* [14]

Komposisi (%)	Fe	C	O	N	H	$\Sigma$	Ti
	max.	max.	max.	max.	max.		(%)
<b>1</b>	0,2	0,1	0,18	0,03	0,015	0,525	99,47
<b>ASTM</b>							
<b>2</b>	0,3	0,1	0,25	0,03	0,015	0,695	99,3
<b>grades</b>							
<b>3</b>	0,3	0,1	0,35	0,03	0,015	0,855	99,13
<b>4</b>	0,5	0,1	0,4	0,03	0,015	1,095	98,93

Ti - titanium, H - hidrogen, N - nitrogen, O - oksigen, C - karbon, Fe - besi

Menurut penelitian *Tabie et al.* menunjukkan bahwa penambahan unsur Zr dan Nb pada paduan titanium *near*  $\alpha$  dapat meningkatkan ketahanan oksidasi [19]. Selain itu, titanium murni atau *commercially pure* Ti (CP Ti) termasuk paduan fasa  $\alpha$ . CP Ti sebagian besar terdiri dari fasa  $\alpha$  HCP dengan sejumlah kecil (sekitar < 5 vol. %) fasa  $\beta$  [20]. Hal ini dikarenakan adanya Fe

sebagai pengotor dari bahan mentah yang disebut *sponge*, atau juga sengaja ditambahkan. CP Ti memiliki empat *grade* yang dibedakan dari komposisi unsur kimianya seperti pada Tabel 2.2.

### 2.2.2 Fasa $\beta$

Paduan titanium fasa  $\beta$  merupakan paduan titanium dengan kekuatan tertinggi. Dikatakan sebagai paduan  $\beta$  karena 100% fasa  $\beta$  metastabil dapat dipertahankan pada temperatur kamar setelah dilakukan pendinginan cepat dari  *$\beta$ -phase field* [20]. Paduan titanium fasa  $\beta$  memiliki unsur penstabil vanadium (V), niobium (Nb), molibdenum (Mo), besi (Fe), kromium (Cr), kobalt (Co), mangan (Mn), nikel (Ni), tungsten (W), dan tantalum (Ta). Paduan titanium dengan fasa ini cenderung menurunkan temperatur transisi fasa  $\alpha$  ke  $\beta$  dan dengan demikian akan mendorong perkembangan struktur kristal berupa BCC dalam fasa  $\beta$  [15].

### 2.2.3 Fasa $\alpha+\beta$

Paduan  $\alpha+\beta$  sejauh ini merupakan paduan titanium yang paling banyak digunakan untuk aplikasi struktural. Paduan titanium dengan fasa ini memiliki unsur penstabil  $\beta$  antara 4% - 6% (dalam berat) [20]. Ti-6Al-4V merupakan paduan  $\alpha+\beta$  paling umum digunakan dalam industri *aerospace*. Sifat-sifat ini dapat dikontrol melalui perlakuan panas, yang digunakan untuk menyesuaikan jumlah dan jenis fasa  $\beta$  yang ada.

## 2.3 *Titanium Superalloys*

*Titanium superalloys* memiliki keunggulan tertentu jika dibandingkan dengan logam dan paduan-paduan lainnya, dimana saat ini digunakan dalam berbagai macam pengaplikasiannya. Adapun contoh *titanium superalloys* yaitu Ti-6Al-4V,

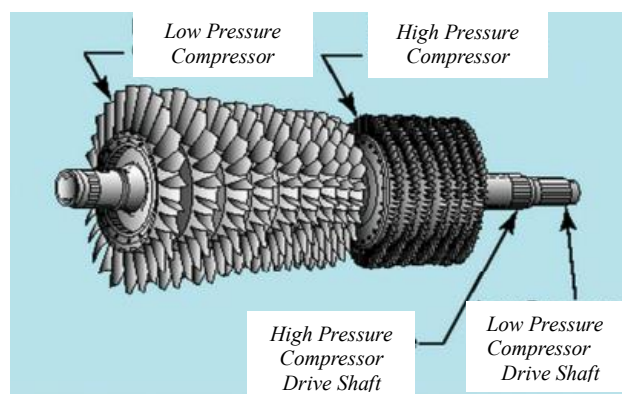
Ti-5Al-2Sn-3Li, Ti-6Al-6V-2Sn, dan sebagainya. Paduan tersebut dapat dikatakan sebagai *titanium superalloys* karena memiliki keunikan pada setiap paduannya seperti rasio bobot terhadap kekuatan yang tinggi, ketahanan korosi yang sangat tinggi, dan bobot yang rendah. *Titanium superalloys* yang umumnya sering digunakan di industri dirgantara, otomotif, alat-alat kedokteran, dan kelautan yaitu paduan Ti-6Al-4V. Selain itu, *titanium superalloys* memiliki kekurangan seperti modulus elastisitasnya yang rendah, kekuatan mekanik yang besar, konduktifitas termal yang terbatas, reaktivitas yang tinggi pada temperatur yang lebih tinggi, sulit untuk dibubut. Hal ini menyebabkan *titanium superalloys* lebih mahal dan sulit untuk dilakukan pemesinan dibandingkan dengan paduan lainnya [21].

#### 2.4 Aplikasi Material Bilah Kompresor Bertekanan Tinggi

Komposisi dari sebuah sistem mesin turbin jet terdiri dari empat bagian, yaitu kompresor, ruang bakar, turbin, dan nozel [22] dapat dilihat pada Gambar 2.2. Paduan Ti-6Al-4V merupakan bahan yang umumnya digunakan pada *rotor blades* bilah kompresor dan baling-baling stator [23]. Namun, Ti-6Al-4V biasanya digunakan untuk bilah kompresor bertekanan rendah. Paduan yang digunakan untuk bilah kompresor bertekanan tinggi, yaitu Ti-8Al-1Mo-1V dan Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo karena kedua paduan ini memiliki kekuatan yang sangat baik, ketahanan lelah, dan ketangguhan yang sangat baik pada temperatur tinggi. Pada Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa ketika udara masuk akan terkompresi dan mengalir melalui sudu berputar (N1) dan sudu statis (N2). Proses yang terjadi dalam sistem mesin jet pesawat, yaitu [24] *compression*, tempat awal mula udara masuk ke dalam sistem turbin gas. Udara yang masuk dari *fan* ke kompresor bertekanan rendah beroperasi

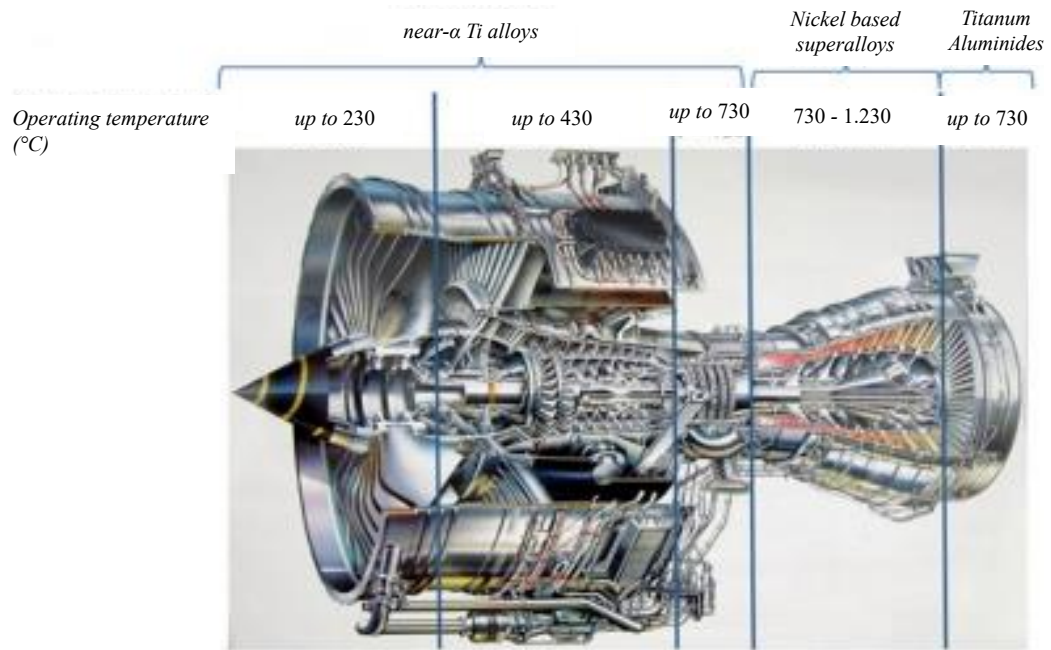
dengan temperatur  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  sampai  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Selanjutnya udara akan mengalir ke kompresor bertekanan sedang dengan peningkatan temperatur  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  sampai  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sebelum masuk ke pembakaran, udara mengalir ke kompresor bertekanan tinggi, dimana udara mengalami peningkatan temperatur dari  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  menjadi  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  [22]. Fungsi dari kompresor untuk menaikkan temperatur dan tekanan udara. Udara yang masuk akan dimanfaatkan sebagai udara pembakaran, udara pengebut bahan bakar, udara pendingin sudu dan ruang bakar dan perapat pelumas bantalan. *Combustion*, ruang bakar mesin turbin gas berbentuk cincin.

Pada saat udara memasuki ruang pembakaran, udara bertemperatur menjadi  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Udara masuk ke dalam ruang bakar dan pembakaran dimulai. Energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi energi panas pada proses pembakaran tersebut. *Exit ring* dipasang dibelakang ruang pembakaran. Hal ini bertujuan untuk mengontrol gas buang. Gas-gas yang keluar dari ruang bakar dilepaskan pada temperatur sekitar  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan poros berputar dengan kecepatan lebih dari  $12.000\text{ rpm}$  [22]. *Expansion*, campuran udara dengan bahan bakar yang keluar dari ruang pembakaran digunakan untuk menggerakkan turbin. Mengalirkan udara panas ke luar melalui nozel. *Exhaust*, gas hasil yang dihasilkan dari pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.



**Gambar 2.2** Bilah kompresor dalam mesin turbin gas pesawat terbang [20]





**Gambar 2.3** Mesin jet pada pesawat dan potensi material [25]

## 2.5 Material Temperatur Tinggi

Setiap material memiliki ketahanan oksidasi yang berbeda-beda. Ketahanan oksidasi material yang menggunakan *superalloys* akan menghasilkan material yang sangat baik pada temperatur 840 °C atau dibawahnya. Pengembangan paduan titanium telah menghasilkan material titanium yang memiliki ketahanan terhadap oksidasi sampai temperatur 595 °C. Material yang memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dapat meningkatkan kekerasan permukaan dan ketebalan lapisan oksida. Strudi oksidasi termal pada titanium *grade 2* dan Ti-6Al-7Nb menunjukkan bahwa lapisan oksida titanium *grade 2* kali lebih tebal dibandingkan dengan Ti-6Al-7Nb, dan morfologi dari lapisan oksida yang terbentuk bergantung kepada temperatur oksidasi [26]. Temperatur oksidasi yang tinggi akan meningkatkan kontinuitas lapisan oksida yang terbentuk di permukaan, tetapi mempercepat proses

degradasi material. Selain itu, paduan titanium yang sudah umum digunakan untuk aplikasi temperatur tinggi yaitu Ti-6Al-4V. Selain itu, penambahan molibdenum, silikon, dan niobium. Niobium salah satu unsur yang dapat meningkatkan ketahanan terhadap temperatur tinggi. Secara umum kinetika oksidasi temperatur tinggi dengan memvariasikan temperatur dan waktu menggunakan persamaan berikut [6]:

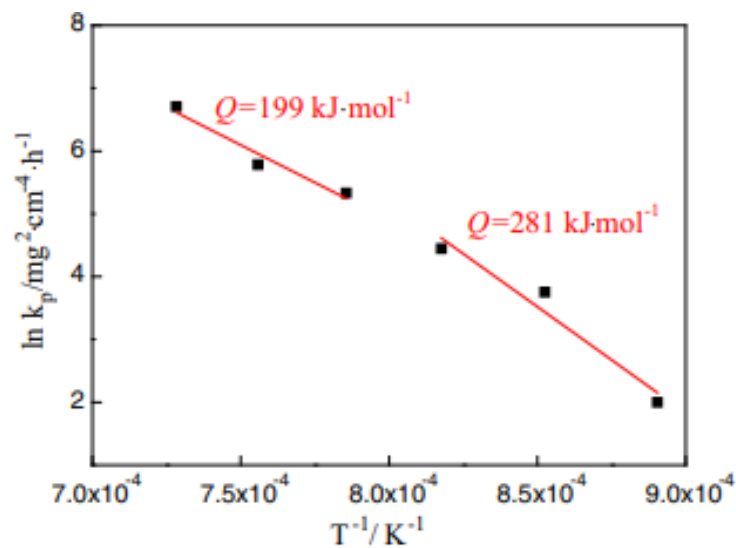
$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p \cdot t \dots \dots \dots (2.1)$$

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

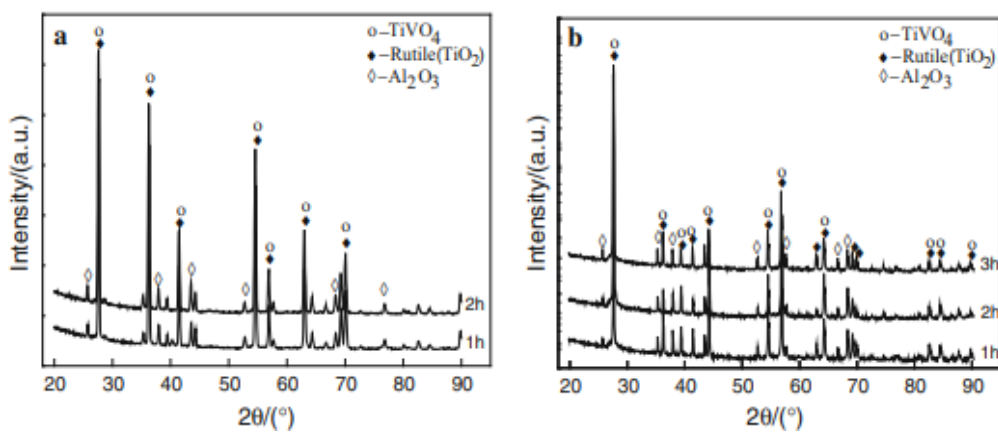
Adapun keterangannya yaitu  $\Delta W$  merupakan pertambahan berat,  $A$  adalah luas permukaan benda uji,  $k_p$  adalah konstanta laju oksidasi,  $t$  adalah waktu oksidasi, dan  $n$  sebagai eksponen laju. Untuk menentukan nilai  $n$ , didapatkan *slope* dari kurva  $\ln \Delta W$  per  $\ln t$ . Menurut Entao *et al.*, pada dalam penelitiannya menyatakan bahwa kinetika oksidasi dari paduan Ti-6Al-4V diperkirakan mengikuti persamaan parabola [6]. 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. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat bahwa semakin meningkat temperatur oksidasi diatas  $T_\beta$ , maka kurva pertambahan berat lebih tinggi dibandingkan dibawah  $T_\beta$ . Pertambahan berat meningkat dengan cepat pada oksidasi awal dalam waktu 90 menit, kemudian secara bertahap melambat pertambahan berat dan relatif stabil seiring berjalannya waktu.

**Tabel 2.3** Eksponen Laju  $n$  dan Konstanta Laju  $k_p$  Ti-6Al-4V teroksidasi pada 850 – 1100 °C [6]

Temperatur (°C)	1100	1050	1000	950	900	850
$n$	1,7	2,2	1,8	1,5	1,1	1,7
$K_p$ ( $\text{mg}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{h}^1$ )	816	324	206	85	43	7

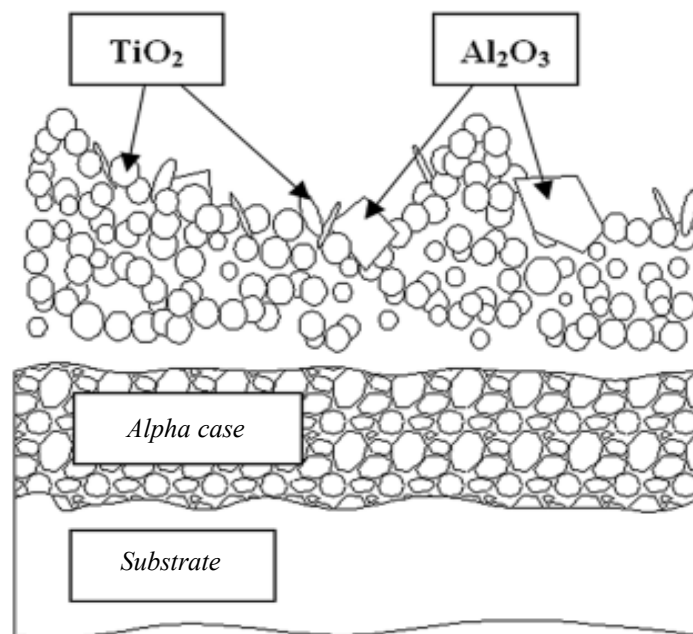


**Gambar 2.4** Kurva Arrhenius konstanta laju parabola  $k_p$  untuk oksidasi Ti-6Al-4V pada 850 – 1100 °C [6]



**Gambar 2.5** Pola XRD permukaan Ti-6Al-4V dalam kondisi a) 900 °C (1 dan 2 jam) dan b) 1050 °C (1, 2, 3 jam) [6]

Dapat dilihat dari hasil XRD paduan Ti-6Al-4V pada Gambar 2.5, permukaan yang teroksidasi sebagian besar terdiri dari  $\text{TiO}_2$  tipe rutil dan sejumlah kecil  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiVO}_4$ . Lapisan oksida atau skala oksida yang terbentuk yaitu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada lapisan luar yang bersifat dispersif dan lapisan dalam terbentuk lapisan-lapisan dari  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiVO}_4$ . Skala oksida memiliki daya rekat (*adhesion*) yang baik pada substrat paduan Ti-6Al-4V dan tidak terjadi pengelupasan pada temperatur diatas  $850\text{ }^\circ\text{C}$ . Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya temperatur akan memengaruhi intensitas puncak difraksi dan puncak rutil ( $\text{TiO}_2$  dan  $\text{TiVO}_4$ ) yang menjadi lebih dominan dengan intensitas yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5b.



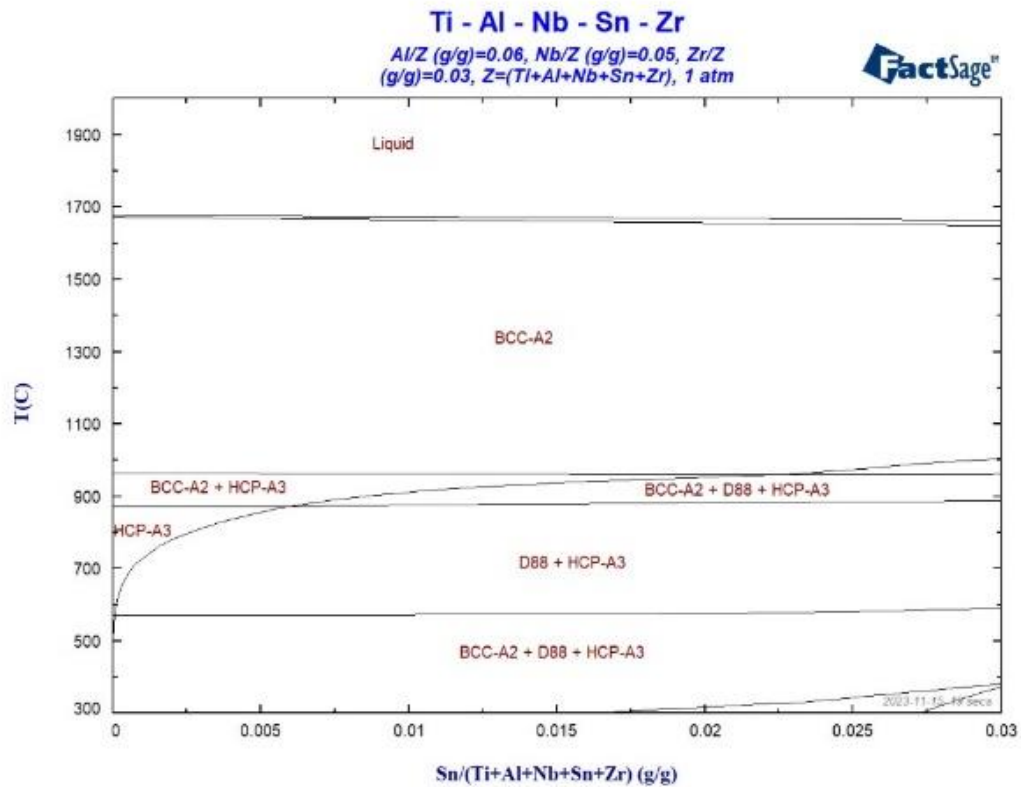
**Gambar 2.6** Komposisi skala oksida Ti-6Al-4V pada temperatur tinggi [6]

Paduan ini menggunakan paduan titanium dengan fasa  $\alpha+\beta$ . Ketika dikenakan perilaku oksidasi dihasilkan bentuk butiran dalam *alpha case* sangat berbeda pada

temperatur oksidasi yang berbeda. Bentuk butirnya berupa *fine polygons* dan *coarse lath* ketika temperatur oksidasi masing-masing dibawah dan diatas  $T_{\beta}$  dapat dilihat pada Gambar 2.6. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman *alpha case* tidak hanya dipengaruhi oleh proses difusi, melainkan juga oleh batas butir dan orientasi butir pada lokasi nukleasi. Ketahanan oksidasi yang baik pada temperatur tinggi adalah pembentukan skala oksidasi untuk mengisolasi substrat dari udara. Namun, terdapat dua jenis tegangan yang terbentuk selama proses oksidasi yaitu *growth stress* (terbentuk karena adanya pertumbuhan kerak) dan *thermal stress* (disebabkan karena adanya perbedaan ekspansi atau kontraksi termal antara substrat dan kerak oksida) [27].

## 2.6 Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

Setelah membahas tentang paduan titanium serta contohnya pada beberapa sub-bab diatas, pada sub-bab ini akan membahas tentang paduan yang akan digunakan dalam penelitian yaitu paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Paduan ini terdiri dari 6% aluminium, 5% niobium, 3% zirkonium, 1% timah, dan 82% titanium. Untuk mendapatkan fasa yang terbentuk dengan melihat komposisi dan temperatur, maka dapat diprediksikan dengan menggunakan aplikasi *Factsage*. Ketika sampel dilakukan perilaku oksidasi, dapat dilihat fasa yang terbentuk dari diagram dibawah ini. Pada Gambar 2.7 berikut dapat dilihat diagram fasa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Dalam penelitian ini menggunakan variasi temperatur oksidasi siklik sebesar 600 °C, 650 °C, dan 700 °C, dapat diprediksikan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki struktur kristal berupa *hexagonal close packed* (HCP).



**Gambar 2.7** Digram fasa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

## 2.7 Pengaruh Penambahan Unsur

### 2.7.1 Pengaruh Penambahan Nb

Menurut Yingjun Song *et al.* pada tahun 2020, melakukan penelitian pengaruh penambahan Nb sebanyak 0,5%, 1%, 1,5%, dan 2% pada paduan Ti-1100 didapatkan bahwa unsur Nb tidak mengubah klasifikasi struktur mikro paduan, dan jarak antara  $\alpha$ -laths berkurang terlebih dahulu dan kemudian meningkat seiring dengan peningkatan kandungan Nb. Selain itu, penambahan unsur Nb secara signifikan dapat meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi. Perilaku oksidasi paduan mengikuti model kinetik parabola. Laju oksidasi parabola mula-mula menurun dan kemudian meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan niobium. Paduan Ti-

1100-1.0Nb memiliki nilai  $k_p$  terendah yaitu  $5,7 \times 10^{-13}$  [28]. Lapisan oksida terdiri dari  $TiO_2$ ,  $Ti_xO$  ( $x = 3, 6$ ),  $NbO_2$  dan  $Al_2O_3$ .

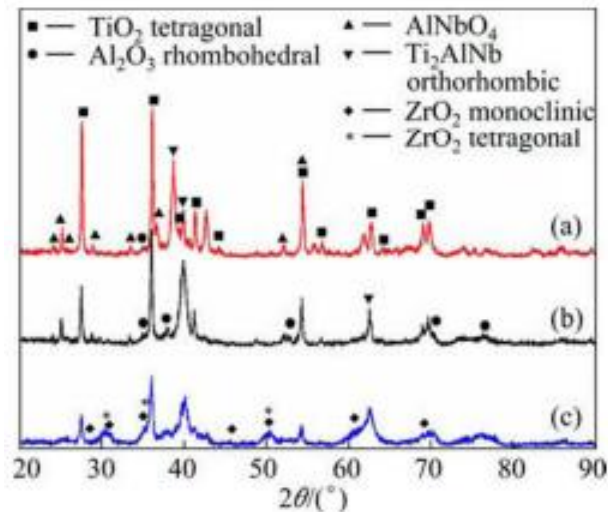
Hasil penelitian Gobel *et al.* yaitu pemakaian niobium dalam paduan titanium dapat secara signifikan dapat mengurangi laju oksidasi dan menstabilkan pembentukan lapisan nitrida yang terbentuk pada permukaan logam [29]. Pengaruh penambahan niobium dalam paduan berbasis Ti-Al juga didukung dalam jurnal penelitian Aniolek pada tahun 2020 menunjukkan bahwa ion niobium menggantikan ion titanium yang dapat menurunkan kekosongan oksigen, sehingga difusi oksigen menjadi lambat. Meningkatkan aktivasi termodinamika aluminium terhadap titanium, sehingga mendukung pembentukan lapisan oksida berupa alumina ( $Al_2O_3$ ) yang stabil. Selain itu, niobium juga dapat menurunkan kelarutan oksigen dalam paduan titanium, sehingga menahan oksidasi yang terjadi internal paduan [26].

#### 2.7.2 Pengaruh Penambahan Zr

Pada tahun 2015 Wei dan *et al.* [9], melakukan penelitian untuk paduan titanium berbasis  $Ti_2AlNb$  dengan penambahan unsur Zr yang berbeda-beda. Paduan titanium tersebut diberikan perilaku oksidasi temperatur tinggi dengan temperatur sebesar  $800\text{ }^\circ\text{C}$  dengan waktu selama 100 jam. Paduan dengan komposisi unsur Zr 1% memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dua paduan lainnya. Pada paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr, penambahan unsur Zr dapat mengubah mekanisme pertumbuhan skala oksidasi.

Hal tersebut dapat menghambat difusi oksigen. Ketika kandungan unsur Zr sebesar 6% dan bereaksi dengan oksigen akan membentuk  $ZrO_2$

tetragonal dan monoklinik yang dimana dapat mendorong masuknya oksigen ke dalam substrat. Pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa intensitas puncak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  meningkat di paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr, sedangkan beberapa puncak *Bragg* dari  $\text{AlNbO}_4$  dan  $\text{ZrO}_2$  monoklinik dan tetragonal di paduan Ti-22Al-21Nb-6Zr.

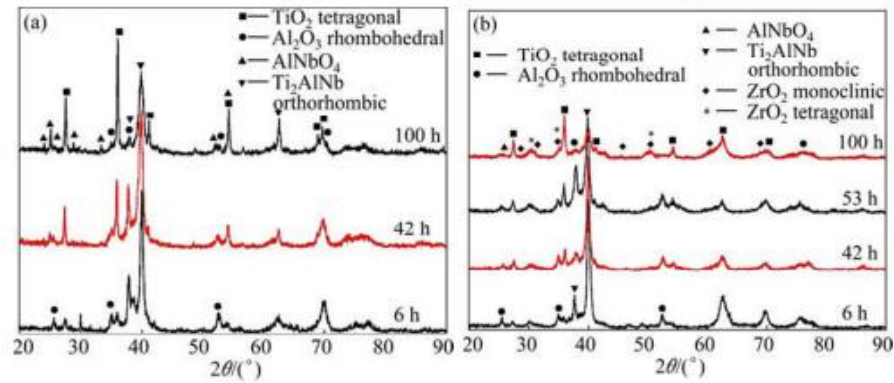


**Gambar 2.8** Hasil XRD Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr sesudah oksidasi pada 800 °C dengan 100 jam: (a)  $x = 0$ ; (b)  $x = 1$ ; (c)  $x = 6$  [8]

Pada Gambar 2.9(a) dapat dilihat bahwa paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr yang telah dioksidasi pada 800 °C untuk waktu yang berbeda-beda. Terlihat bahwa puncak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiO}_2$  dapat diamati pada paduan yang teroksidasi pada suhu 800 °C selama 6 jam. Selain itu, intensitas puncak  $\text{TiO}_2$  meningkat dan muncul pola difraksi  $\text{AlNbO}_4$  pada waktu 42 jam. Intensitas puncak  $\text{AlNbO}_4$  jelas meningkat dengan oksidasi dari 42 jam hingga 100 jam. Pada Gambar 2.7(b) dapat dilihat bahwa permukaan skala paduan Ti-22Al-21Nb-6Zr yang teroksidasi pada 800 °C untuk waktu yang berbeda. Jika dibandingkan dengan Gambar 2.7(a), puncak tambahan  $\text{ZrO}_2$  dengan intensitas sangat lemah muncul pada 6 jam. Dengan bertambahnya waktu oksidasi, intensitas puncak  $\text{TiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jelas meningkat untuk paduan

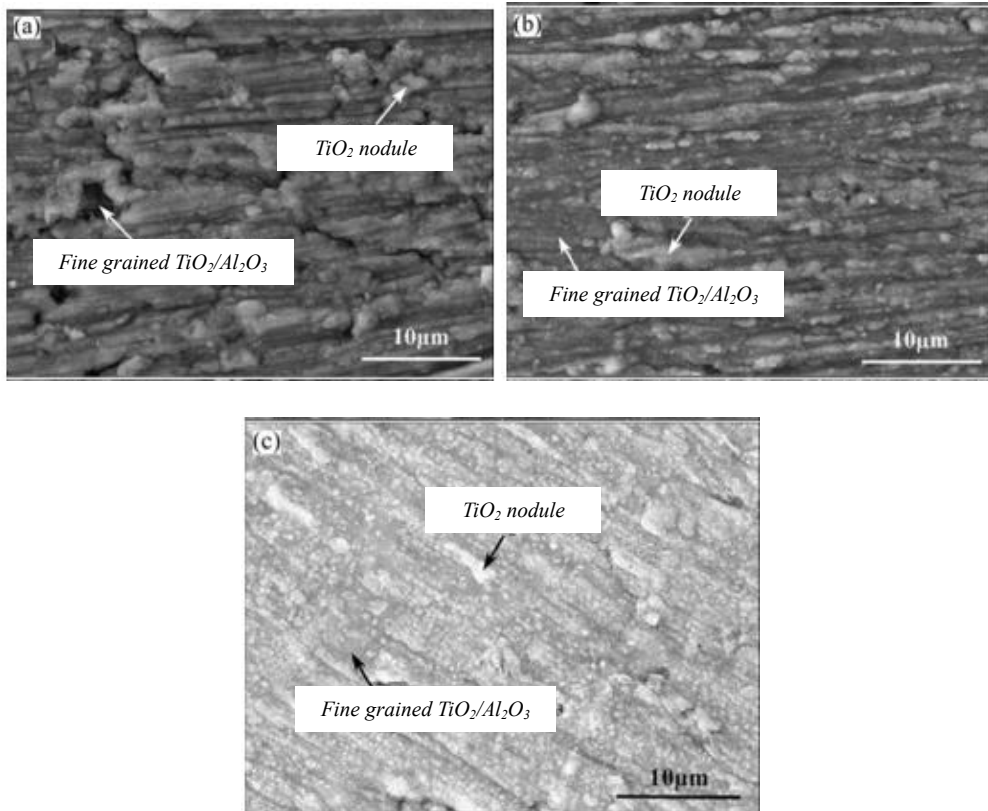


Ti-22Al-21Nb-6Zr. Setelah oksidasi pada 800 °C selama 100 jam, puncak *Bragg* dari monoklinik dan tetragonal-ZrO<sub>2</sub> meningkat.



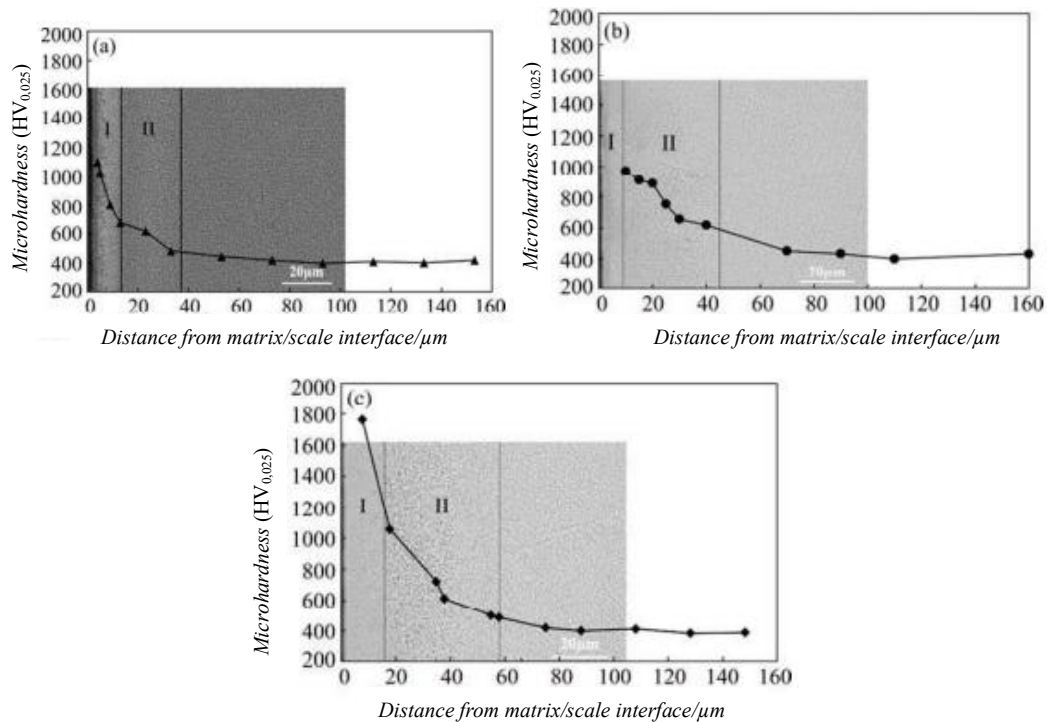
**Gambar 2.9** Hasil XRD setelah oksidasi pada 800 °C dengan perbedaan waktu: (a) Ti-22Al-26Nb-1Zr; (b) Ti-22Al-21Nb-6Zr [8]

Penelitian ini juga mendapatkan hasil morfologi permukaan yang terbentuk pada sampel Ti-22Al-27(Nb, Zr) yang dioksidasi pada 800 °C ditampilkan pada Gambar 2.9. Pada Gambar 2.10(a), bintik-bintik TiO<sub>2</sub> terbentuk dan butir-butir dalam bintik-bintik ini tumbuh dan terhubung menjadi area lebih besar, berikatan dengan titanium di sekitarnya. Namun, permukaan paduan ditutupi oleh lapisan tipis terputus-putus karena sambungan antar area yang berbeda. Terbentuknya lapisan ini menyebabkan disekitar kaya akan Aluminium. Jadi, di bawah lapisan ini, terbentuk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub> berbutir halus (*fine-grained* TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ketika dibandingkan dengan paduan Ti-22Al-27Nb, seperti dapat dilihat dari Gambar 2.10(b,c), terdapat lapisan oksida yang seragam atau sama yang berasal dari kombinasi nodul TiO<sub>2</sub> yang lebih sedikit dan butiran yang lebih halus.



**Gambar 2.10** Morfologi permukaan paduan Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr setelah oksidasi pada 800 °C selama 100 jam (a) x = 0; (b) x = 1; (c) x = 6 [8]

Fasa awal dan struktur mikro dengan menambahkan Zr dapat menghasilkan derajat zona pengaruh oksigen yang berbeda-beda. Paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr memiliki kemampuan larut yang lebih kuat. Selain itu, paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr memiliki jalur difusi oksigen yang lebih banyak karena parameter kisi fasa BCC/B2 dan O yang lebih besar menghasilkan lapisan oksidasi internal yang paling tipis, sedangkan untuk paduan Ti-6Al-21Nb-6Zr unsur oksigen akan mudah larut ke dalam substrat. Hal itu disebabkan karena adanya fasa  $\alpha_2$ . Kemudian, terjadi peningkatan parameter kisi untuk fasa O saat ditambahkan unsur Zr sebesar 6%.



**Gambar 2.11** Kekerasan mikro dan SEM penampang paduan Ti-22Al-(27-x)Nb-xZr: (a) x = 0; (b) x = 1; (c) x = 6 [8]

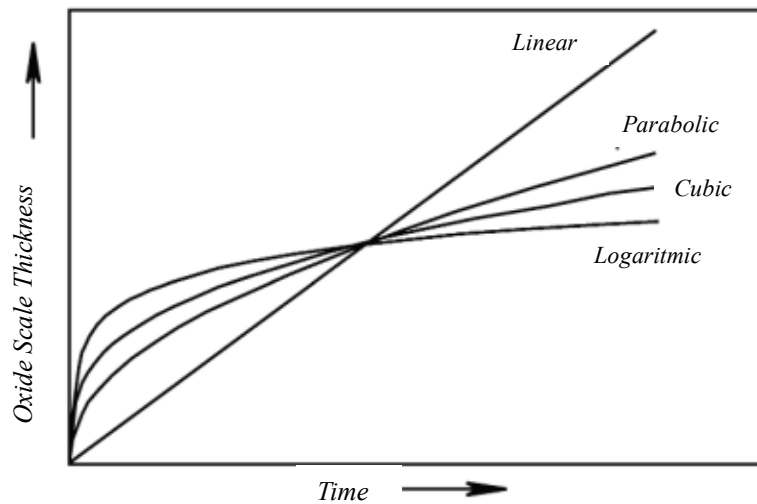
### 2.7.3 Pengaruh Penambahan Sn

Menurut Yu Pan *et al.* [13], pada tahun 2020 yang melakukan penelitian pengaruh penambahan Sn terhadap perilaku temperatur tinggi (1000 °C selama 100 jam). Penelitian tersebut menggunakan paduan Ti-45Al-8.5Nb-xSn (x = 1 - 3, at.%). Dalam jurnal tersebut dikatakan bahwa saat Sn ditambahkan dalam paduan TiAl dapat menambahkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi. Paduan TiAl-3Sn menunjukkan ketahanan oksidasi terbaik, dengan perolehan massa terendah sebesar 3,29 mg/cm<sup>2</sup>, kerak oksida tertipis sebesar 14 μm dan tidak terjadi spalasi [13]. Penambahan Sn dapat mengubah struktur lapisan oksida paduan TiAl. Struktur berlapis-lapis dari paduan TiAl-3Sn dibagi menjadi empat lapisan dengan komposisi yang berbeda-beda yang

tunggal dan berkesinambungan lapisan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  muncul pada skala oksida. Kehadiran fasa  $\text{Ti}_3\text{Sn}$  mendorong pembentukan lapisan oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ketahanan oksidasi yang unggul dari paduan TiAl-3Sn terutama disebabkan oleh pembentukan fasa  $\text{Ti}_3\text{Sn}$ . Kehadiran fasa  $\text{Ti}_3\text{Sn}$  menghambat difusi oksigen ke dalam dan menurun besarnya fluks keluar Titanium, secara relatif meningkatkan aktivitas Aluminium yang terdifusi ke luar hingga terbentuk lapisan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang kontinu. Selain itu, lapisan oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang dihasilkan memberikan penguncian mekanis antara skala oksida dan substrat, sehingga meningkatkan ketahanan *spallation*.

## 2.8 Laju Oksidasi

Dasar untuk menjelaskan mekanisme oksidasi adalah dengan mempelajari kinetika dan laju reaksi. Faktor-faktor yang mempengaruhi persamaan laju oksidasi dan laju reaksi yaitu temperatur, tekanan oksigen, waktu, preparasi permukaan logam, dan perlakuan awal logam. Temperatur dapat memengaruhi laju masuk oksigen ke lapisan oksida. Ketika temperatur lebih tinggi akan membuat ukuran butir lebih besar yang menyebabkan oksigen menjadi lebih mudah masuk di antara batas butir. Menurut penelitian Meilinda *et al.*, tahun 2014, menyatakan bahwa paduan Ti-6Al-4V yang dilakukan perilaku oksidasi menggunakan temperatur yang tinggi, maka permukaan paduan memiliki lapisan oksida baru dan lapisan oksida lebih tebal. Hal ini dapat dibuktikan dengan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop [30].



**Gambar 2.12** Variasi laju reaksi oksidasi [19]

Pengaruh unsur padu paduan titanium terhadap laju oksidasi menurut penelitian Peixuan *et al.*, yaitu unsur Zr memiliki pengaruh kecil terhadap laju oksidasi, Sn dapat menurunkan ketahanan oksidasi, Al meningkatkan laju oksidasi, sedangkan Nb dapat menurunkan laju oksidasi paduan titanium [31]. Menurut penelitian Song *et al.* tahun 2020 menunjukkan bahwa penambahan berat paduan akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu oksidasi [28]. Meningkatnya penambahan berat akan memengaruhi nilai laju oksidasi dari paduan titanium. Proses oksidasi titanium sangat kompleks karena selama pembentukan lapisan oksida, logam larut dalam oksigen, yang menyebabkan pembentukan larutan oksigen padat interstitial dalam paduan titanium

Hukum laju biasanya untuk oksidasi logam adalah linier, parabola dan logaritmik dapat dilihat pada Gambar 2.12. Laju oksidasi linier adalah konstan terhadap waktu dan tidak dipengaruhi oleh jumlah gas atau logam. Laju oksidasi parabola biasanya terdapat pada temperatur tinggi dan lajunya terus meningkat selama proses oksidasi. Laju oksidasi logaritmik biasanya pada temperatur dibawah

300 – 400 °C, laju reaksi awalnya sangat cepat, dan turun ke laju yang rendah. Studi oksidasi menunjukkan bahwa oksidasi terjadi secara bersamaan melalui dua mekanisme, salah satunya dominan pada waktu awal dan yang lain setelah waktu oksidasi berjalan cukup lama [32]. Selain itu, ada juga laju kubik yang terdiri dari kombinasi laju logaritmik dengan laju parabola dan terjadi pada temperatur rendah.

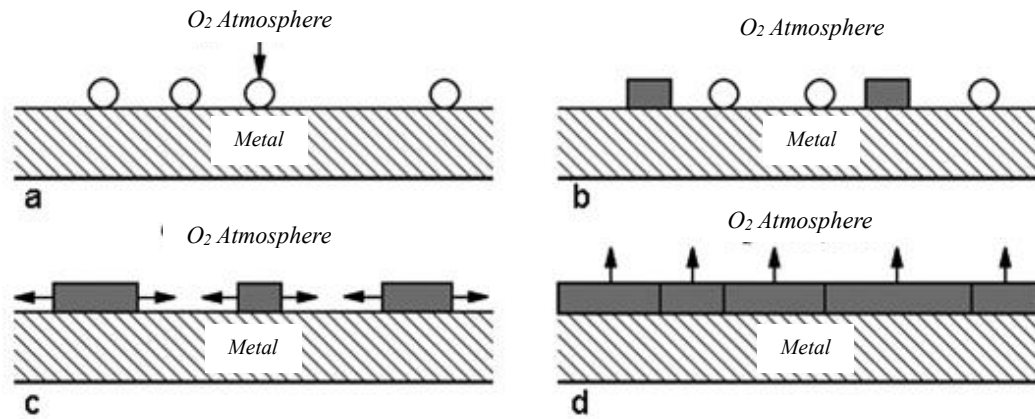
## 2.9 Lapisan Oksida

Permukaan logam mengalami empat tahap pembentukan lapisan oksida yaitu adsorpsi oksigen pada permukaan, pembentukan inti oksida, pertumbuhan inti lateral, dan pembentukan lapisan oksida padat [1]. Proses oksidasi diawali dengan pengikatan oksigen pada permukaan logam melalui proses kemisorpsi atau adsorpsi fisik disebut dengan adsorpsi oksigen. Dalam adsorpsi fisik, gas terikat dengan permukaan logam melalui gaya Van der Waals, sedangkan dalam adsorpsi kimia, ikatan kimia yang stabil terbentuk. Sebaliknya, kemisorpsi membutuhkan energi aktivasi dan berlangsung lambat.

Namun, kemisorpsi akan berlangsung dengan sangat cepat tanpa energi aktivasi, jika permukaan logam bersih. Setelah molekul oksigen teradsorpsi, keduanya akan berdisosiasi dan teradsorpsi sebagai atom. Atom oksigen dengan permukaan logam yang teradsorpsi mengalami kejenuhan. Hal itu membuat terbentuknya inti oksida yang tumbuh ke samping. Pertumbuhan inti secara lateral menyebabkan pembentukan lapisan oksida yang dapat melindungi permukaan logam. Mekanisme pertumbuhan lapisan oksida dapat dilihat pada Gambar 2.13.

Lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan sampel ini akan berfungsi sebagai pelindung logam. Biasanya lapisan oksida yang terbentuk pada paduan

titanium berupa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiO}_2$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$  membantu meningkatkan stabilitas fasa pada paduan titanium, terutama pada temperatur tinggi [33]. Untuk senyawa oksida  $\text{TiO}_2$ , menurut penelitian Shen *et al.* (2023), menunjukkan bahwa lapisan  $\text{TiO}_2$  yang terbentuk melalui proses sol-gel dapat meningkatkan ketahanan korosi paduan titanium hingga 80% pada temperatur 600 °C [34].



**Gambar 2.13** Mekanisme pertumbuhan lapisan oksida pada permukaan logam [1]

## BAB III

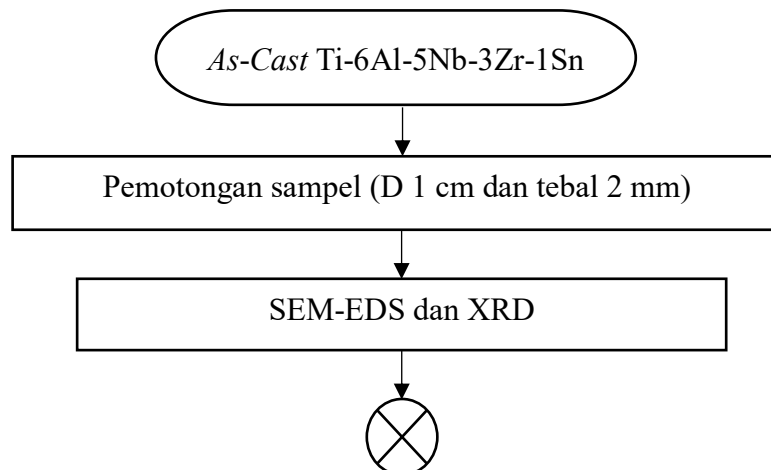
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu

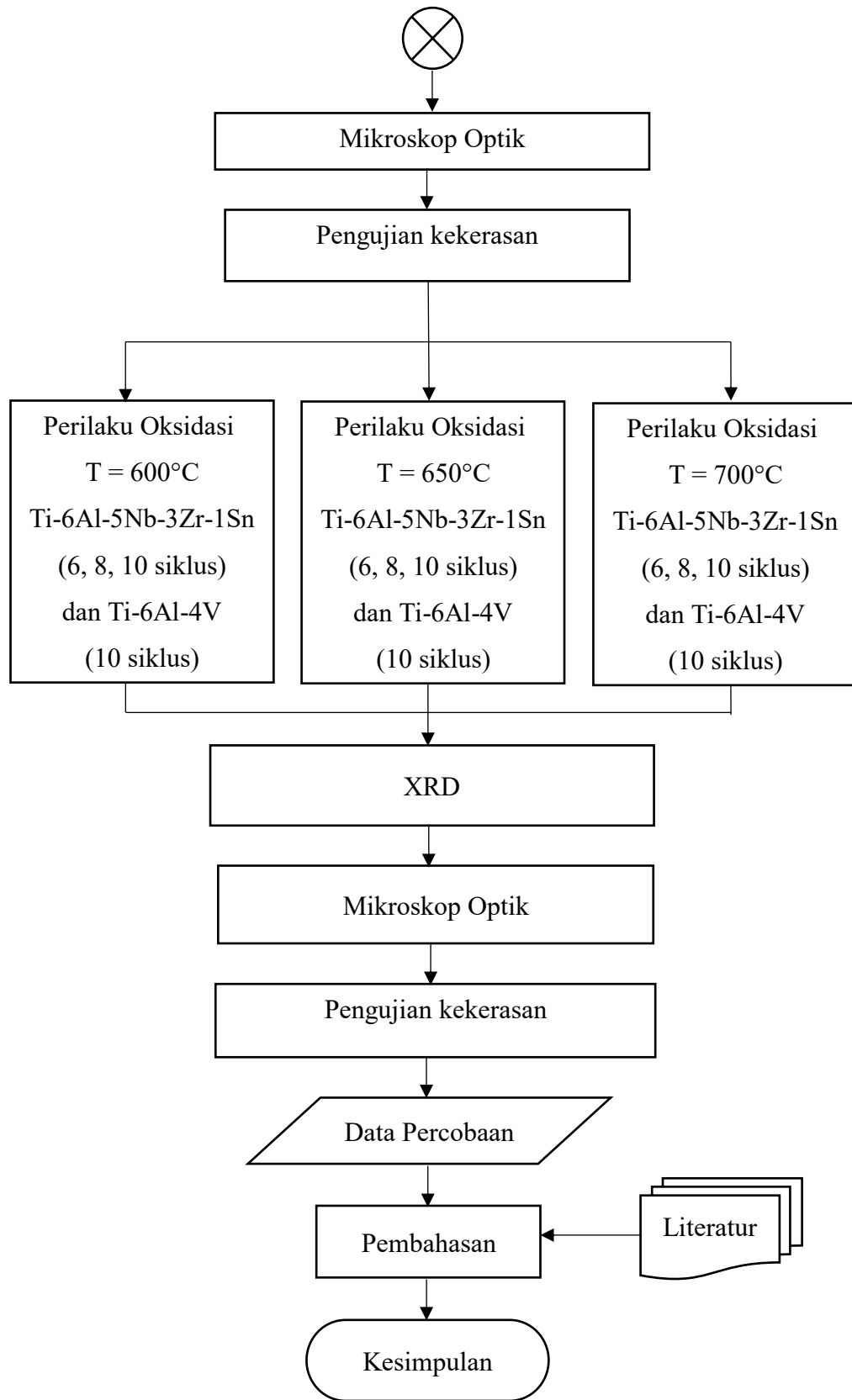
Penelitian dilakukan di Pusat Riset Metalurgi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Serpong, Tangerang Selatan. Penelitian ini dilaksanakan dari jangka waktu 8 Januari – 30 Juni 2024.

#### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, sampel dibuat menggunakan metode pengecoran khusus dilakukan sebanyak lima kali. Sampel dilakukan pengujian perilaku oksidasi dengan variasi temperatur (600 °C, 650 °C, dan 700 °C) dan jumlah siklus oksidasi siklik (6, 8, dan 10 siklus). Setelah itu, sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dibandingkan dengan paduan Ti-6Al-4V yang umumnya juga digunakan untuk material bilah kompresor bertekanan tinggi pada mesin pesawat terbang. Tahapan-tahapan penelitian tersebut dijelaskan dalam diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.







**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

## 3.2 Alat dan Bahan

### 3.2.1 Alat-alat yang Digunakan

Berikut ini merupakan alat-alat yang digunakan untuk melakukan penelitian ini yaitu:

- a. Cetakan *Mounting*
- b. Cawan Krusibel
- c. *Dryer*
- d. Gelas Kimia
- e. Mesin Bubut
- f. Mesin *Grinding*
- g. Mesin *Polishing*
- h. *Microhardness Vickers* (Mitutoyo)
- i. Mikroskop Optik Olympus
- j. Mistar
- k. *Muffle Furnace*
- l. Neraca Digital
- m. Pinset
- n. *Scanning Electron Microscope Spectroscopy* (SEM-EDS JED (JEOL)-2300)
- o. Tang Buaya
- p. *Vacuum Arc Remelting* (VAR)
- q. *Wire Cut Machine*
- r. *X-Ray Diffraction* (XRD TD-3500)

### 3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan

Berikut ini merupakan bahan-bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini yaitu:

- a. Aquades
- b. Etanol
- c. Gas Argon
- d. Kapas
- e. Kertas Ampelas (240#, 400#, 600#, 800#, 1200#, dan 2500#)
- f. Larutan *Colloidal Silica*
- g. Larutan Hidrogen Peroksida
- h. Larutan Kroll (5 mL HF, 15 mL HNO<sub>3</sub>, dan 80 mL H<sub>2</sub>O)
- i. Logam Ti, Al, Nb, Zr, dan Sn
- j. Resin Bening
- k. Sampel Ti-6Al-4V
- l. Sarung Tangan Latex

### 3.3 Prosedur Penelitian

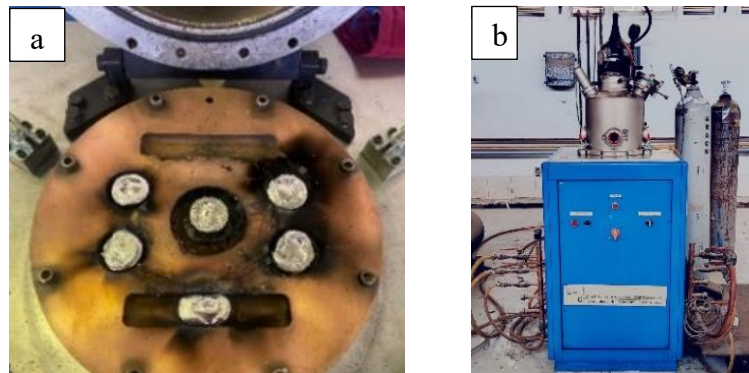
Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn akan dibuat menggunakan metode *casting* dengan alat VAR berjumlah 9 buah sampel. Setelah dilakukan karakterisasi menggunakan XRD, sampel akan dipotong menggunakan *wire cut* dengan diameter 1 cm dan tebal 2 mm.

#### 3.3.1 Prosedur Pembuatan Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

Umumnya titanium dapat dengan mudah teroksidasi. Titanium membutuhkan teknik khusus untuk proses pengecorannya. Oleh karena itu,

dalam penelitian ini digunakan VAR dengan tujuan agar menurunkan risiko terjadinya oksidasi dengan udara di saat titanium mencair. Logam-logam di timbang terlebih dahulu menggunakan neraca digital sebelum dilakukan pengecoran. Urutan logam yang dimasukkan ke dalam *copper mold* yaitu niobium dan zirkonium, serta dilanjutkan dengan titanium, aluminium, dan timah. Urutan ini disesuaikan menurut titik leleh masing-masing logam.

Prinsip kerja dari alat VAR menggunakan prinsip pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), dimana elektroda tungsten bersentuhan langsung dengan logam-logam tersebut. Sebelum proses pengecoran dilakukan, *vacuum* dan *backfill* dinyalakan pada *furnace* akan menghembuskan gas argon. Saat proses pengecoran khusus berjalan, pada *copper mold* dialiri dengan air. Hal ini dilakukan agar *copper mold* tidak ikut leleh. Proses pengecoran di ulang hingga lima kali. Logam-logam yang akan dibuat sampel dan alat VAR dapat dilihat pada Gambar 3.2.

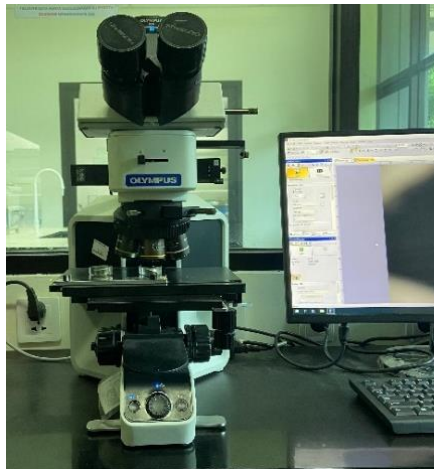


**Gambar 3.2** a) Pengecoran Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn; b) *Vacuum Arc Remelting*

### 3.3.2 Prosedur Metalografi

Pengamatan metalografi untuk mengetahui karakteristik struktur mikro. Sebelum proses pengamatan, sampel akan dilakukan *mounting* (pemingkaian) terlebih dahulu dengan menggunakan resin. Tahap

selanjutnya yaitu *grinding*. Tahap ini bertujuan untuk menghaluskan permukaan dari sampel dengan menggunakan kertas ampelas yang berukuran 240#, 400#, 600#, 800#, 1200#, dan 2500#. Tahap *polishing* (pemolesan) dengan menggunakan *Silica Colloidal*. Tahap *etching* (etsa) menggunakan larutan etsa berupa larutan Kroll dengan komposisi 5 mL HF, 15 mL HNO<sub>3</sub>, dan 80 mL H<sub>2</sub>O dengan cara sampel diusap selama 1 – 20 detik hingga menit (ASTM E407). Setelah itu, mengamati sampel menggunakan mikroskop optik. Pengamatan metalografi ini dilakukan dengan menggunakan Mikroskop Optik Olympus (Gambar 3.3).



**Gambar 3.3** Mikroskop Optik

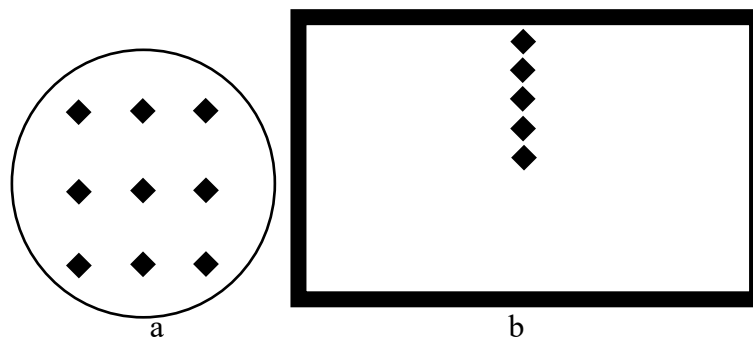
### 3.3.3 Prosedur Karakterisasi Komposisi Menggunakan SEM-EDS

Tahap karakterisasi dengan menggunakan SEM-EDS yang dapat mendeteksi unsur apa saja yang terkandung pada permukaan sampel yang disinari berkas elektron. Adapun mekanisme kerja dari SEM-EDS, yaitu sampel uji diberikan sinar-x pada permukaan. Permukaan sampel akan memantulkan berkas elektron yang sebelumnya diberikan ke segala arah. Banyaknya berkas elektron yang dipantulkan oleh sampel yang nantinya akan

dianalisis. Pengaturan luas daerah yang akan diamati dapat dibatasi dengan melakukan *zoom-in* dan *zoom-out*. Hasil yang akan dihasilkan dari SEM berupa dua sinyal penting. Sinyal penting pertama yaitu pada pantulan inelastis didapatkan sinyal elektron sekunder. Sinyal ini terdapat hasil topografi dari sampel uji. Sinyal penting kedua pada pantulan inelastis didapatkan sinyal *backscattered*. Sinyal tersebut memberikan informasi berupa perbedaan berat molekul dari atom yang menyusun permukaan sampel. *Output* dari karakterisasi material menggunakan SEM-EDS ini adalah grafik *peak* tertentu yang dapat mewakili setiap unsur yang terkandung.

#### 3.3.4 Prosedur Pengujian Kekerasan

Sebelum dilakukan pengujian kekerasan, sampel dipreparasi terlebih dahulu menggunakan *grinding* dan *polishing*. Setelah dilakukan preparasi, sampel sudah siap untuk masuk ke tahap uji kekerasan. Mesin uji *Microhardness Vickers* adalah yang terbaik dari banyak alat uji kekerasan saat ini karena memiliki kemampuan untuk mengukur kekerasan material dalam rentang kekerasan dari 5 hingga 1500 HV. Standar yang digunakan untuk uji *Microhardness Vickers* yaitu ASTM E384.



**Gambar 3.4** Skematis posisi pengujian kekerasan; a) sampel *as-cast* dan b) sampel setelah oksidasi

Gambar 3.4a merupakan skematik posisi pengujian kekerasan pada sampel *as-cast*, sedangkan Gambar 3.4b merupakan skematik posisi pengujian kekerasan pada sampel setelah perilaku oksidasi siklik. Uji *Microhardness Vickers* menggunakan indentor intan (*knoop*) piramida 136°. Pada monitor terdapat dua diagonal yang berbeda panjangnya dengan perbandingan 7:1. Selain itu, alat ini memiliki kemampuan untuk melakukan pengujian pada material hingga 0,006 inch. Untuk mendapatkan nilai kekerasan dengan cara menangkap gambar dari garis horizontal dan garis vertikal. Hasil kekerasan yang didapatkan akan dicari rata-ratanya. Gambar 3.5 merupakan alat uji *Microhardness Vickers*. Adapun tahapan-tahapan untuk mengoperasikan alat uji *Microhardness Vickers* yaitu:

1. Sampel yang telah dimetalografi diletakkan diatas meja kerja. Alat uji *Microhardness Vickers* dinyalakan. Lensa mikroskop diatur pada permukaan sampel dan ketinggian meja kerja. Tingkat fokus disesuaikan permukaan uji yang dapat di lihat pada layar monitor. Gaya yang ingin diberikan yaitu 1 F dengan waktu pembebanan 8 detik.
2. Tombol “*Start*” ditekan, indentor bergerak perlahan menuju sampel. Angka pada *setting* alat diperhatikan, dimana gaya penekanan akan meningkat hingga batas gaya yang telah ditentukan sebelumnya.
3. Mikroskop diputar kembali sehingga lensa dapat melihat area yang baru saja ditekan. Apabila area goresan mulai mendekati bentuk bujur sangkar, penekanan dianggap berhasil. Selanjutnya, dalam monitor dapat mengukur sudut lekukan pada masing-masing

diagonal. Mesin uji *Microhardness Vickers* ini akan dihitung dari hasil pengujian secara otomatis.



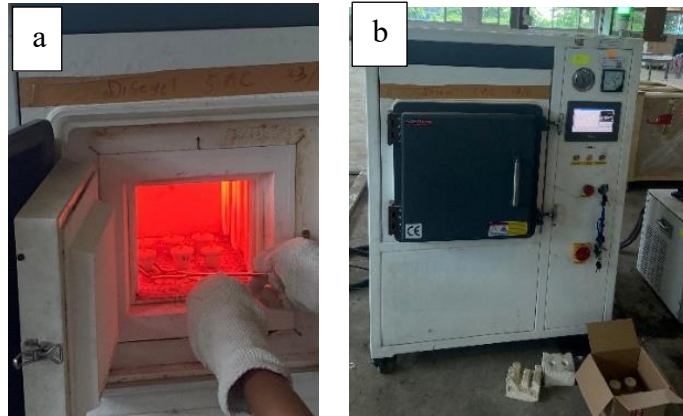
**Gambar 3.5** Mesin uji kekerasan

### 3.3.5 Prosedur Pengujian Oksidasi Siklik

Sebelum dilakukannya uji oksidasi siklik, sampel ditimbang terlebih dahulu massa awalnya dengan menggunakan neraca digital. Sampel dimasukkan ke dalam cawan krusibel (Gambar 3.6a) Uji oksidasi dilakukan di dalam *furnace* pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C dengan masing-masing jumlah siklus oksidasi sebanyak 6, 8, dan 10. Setiap siklus terdiri dari pemanasan sampel sampai temperatur kerja dan menahannya selama 5 jam di dalam *furnace*. *Furnace* yang digunakan berupa *muffle furnace* (Gambar 3.6b). Selanjutnya, sampel dikeluarkan dari *furnace* dan di dinginkan dengan udara. Setiap siklus, perubahan massa yang terjadi pada sampel diukur menggunakan neraca digital. Massa yang diukur nantinya akan dicatat setelah setiap siklus untuk mendapatkan nilai kinetika oksidasi sampel. Setelah itu,



sampel dimasukkan kembali ke dalam *furnace* untuk siklus selanjutnya. Prosedur ini diulangi hingga siklus terakhir [28].



**Gambar 3.6** a) Sampel dengan cawan; b) *Muffle Furnace*

### 3.3.6 Prosedur Karakterisasi Komposisi Kimia Lapisan Oksida Menggunakan XRD

Pada tahapan ini, karakterisasi yang dilakukan memiliki tujuan untuk mengetahui senyawa yang terdapat dalam sampel. Mekanisme kerja dari uji XRD, yaitu diawali dengan meletakkan sampel pada *sample holder*. Sampel yang akan dilakukan uji XRD harus dihaluskan terlebih dahulu, agar dapat diwakili oleh partikel-partikel yang halus tersebut. *Sample holder* diposisikan pada pegangan. Kemudian diberikan radiasi oleh sinar-x sehingga berbentuk difraktogram.

Pada karakterisasi awal, laju pemindaian sebesar 19,20 detik. *Diffraction source* menggunakan kobalt. Sudut 2 teta yang digunakan dari  $10^{\circ}$  -  $120^{\circ}$ . Untuk karakterisasi setelah perilaku oksidasi siklik, laju pemindaian sebesar 5,0985. *Diffraction source* menggunakan tembaga. Sudut 2 teta yang digunakan dari  $20^{\circ}$  -  $100^{\circ}$ . Informasi yang didapatkan dari data yang dihasilkan diambil dengan membandingkan nilai di sampel pada standar

mineral. Setelah selesai uji XRD, *sampel holder* diangkat dan dibersihkan. Data yang didapatkan dari hasil XRD di analisis menggunakan *software High Score Plus*.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Komposisi Hasil Pengecoran

Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada penelitian ini menggunakan metode pengecoran khusus yang dilakukan menggunakan VAR di Pusat Riset Metalurgi BRIN Serpong. Ti, Al, Nb, Zr, Sn yang digunakan untuk bahan pengecoran. Karakterisasi komposisi menggunakan SEM-EDS. Penelitian ini juga menggunakan sampel pembanding berupa Ti-6Al-4V dengan standar komposisi sesuai dengan aplikasinya untuk material bilah kompresor pada mesin pesawat. Tabel 4.1 menunjukkan komposisi kimia dari sampel Ti-6Al-4V yang digunakan memiliki komposisi yang homogen dengan toleransi sebesar  $\pm 1\%w.t$  berdasarkan ASTM B265 Gr5. Jadi dalam proses pengecoran sampel harus dipastikan bahwa komposisi masing-masing campuran homogen dengan toleransi  $\pm 1\%w.t$ .

**Tabel 4.1** Komposisi Ti-6Al-4V (ASTM B265 Gr5)

Unsur	Komposisi (%wt)
Karbon, maks.	0,08
Besi, maks.	0,03
Nitrogen, maks.	0,05
Oksigen, maks.	0,20
Aluminium	5,5 – 6,75
Vanadium	3,5 – 4,5
Titanium	<i>Balance</i>

Tabel 4.2 menunjukkan hasil komposisi kimia menggunakan SEM-EDS, yang dimana telah dilakukan 3 kali karakterisasi dengan 5 kali *remelting* saat proses pengecoran. Untuk mendapatkan hasil yang homogen perlu memperhatikan beberapa hal penting. Pertama, untuk mendapatkan hasil Al, Nb, Zr, dan Sn yang sesuai dengan komposisi yang diinginkan, diperlukan mengetahui titik lebur pada masing-masing unsur. Unsur-unsur dengan titik lebur yang tinggi dilakukan proses pengecoran terlebih dahulu. Kemudian, tambahkan unsur-unsur lainnya ke dalam VAR. Selain itu, pengaturan alat VAR juga dapat memengaruhi hasil pengecoran sampel.

Dalam situasi seperti ini, disarankan menggunakan *setting* “*remote*” untuk mengatur mesin las. Selain itu, kuat arus harus stabil pada 400 A dan memerlukan *holding time* selama 2 menit per sampel saat elektroda memercikan busur nyala apinya pada sampel. Sementara pada *setting* “*panel*”, di mana kuat arus maksimum adalah 200 A, tidak disarankan untuk meningkatkan homogenitas komposisi paduan karena panas yang dihasilkan dari kuat arus tersebut tidak merata pada *copper mold*.

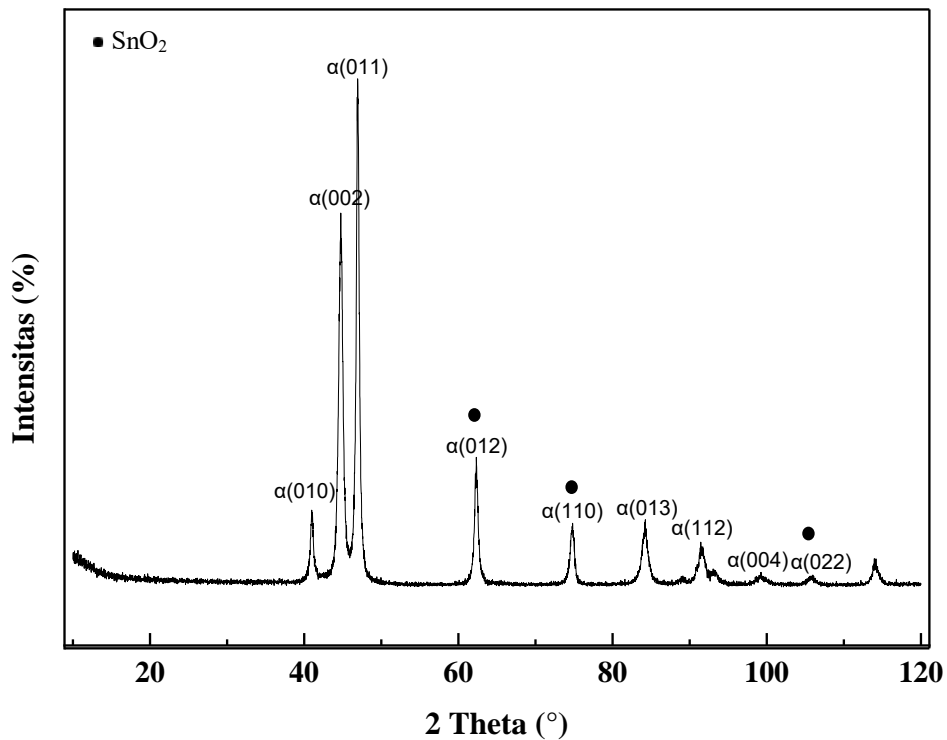
**Tabel 4.2** Komposisi Kimia Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn Hasil SEM-EDS

Al	Nb	Zr	Sn	Ti
4,6	4,3	2,5	0,9	<i>Balanced</i>

#### 4.2 Pengamatan Struktur Mikro

Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dilakukan karakterisasi komposisi dengan menggunakan SEM-EDS. Setelah itu, sampel dipreparasi sebelum dilakukan pengamatan metalografi. Pengamatan metalografi dilakukan menggunakan

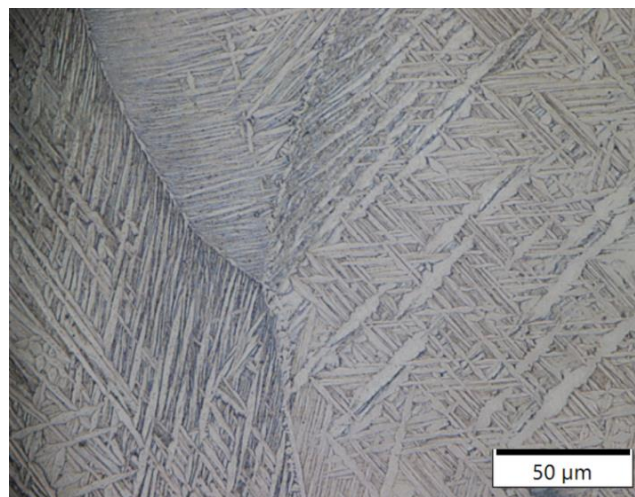
mikroskop optik yang bertujuan untuk melihat struktur mikro yang dimiliki oleh paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Kemudian dibandingkan dengan paduan titanium yang digunakan pada umumnya yaitu paduan Ti-6Al-4V. Hasil pengamatan metalografi ini juga didukung dengan data hasil XRD pada Gambar 4.1 yang menyatakan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki paduan titanium dengan fasa  $\alpha$ . Hal yang memengaruhi posisi puncak pada fasa  $\alpha$  pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn yaitu unsur niobium (Nb). Kandungan Nb yang tinggi dapat menurunkan temperatur transisi fasa  $\alpha$  ke  $\beta$ , sehingga memungkinkan fasa  $\beta$  untuk tetap stabil pada temperatur ruang [35].



**Gambar 4.1** Hasil XRD *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

Hal ini sangat penting untuk paduan titanium dalam aplikasi bilah kompresor mesin pesawat yang beroperasi pada temperatur tinggi, dimana paduan titanium yang stabil pada fasa  $\beta$  memiliki keuntungan karena dapat menahan material pada

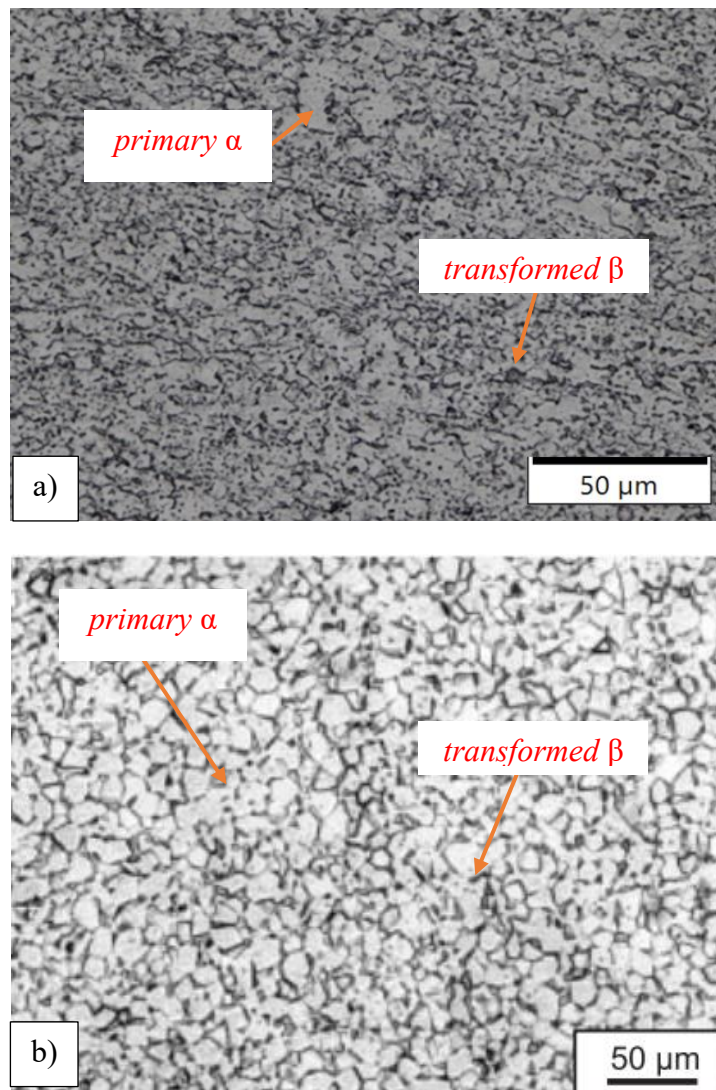
temperatur tinggi. Selain itu, *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki senyawa oksida berupa SnO<sub>2</sub>. SnO<sub>2</sub> memiliki sifat fisik dan kimia yang dapat meningkatkan logam dasar dengan lapisan oksida yang terbentuk. Struktur kristal SnO<sub>2</sub> dapat membentuk ikatan kovalen yang kuat dengan permukaan lain, sehingga meningkatkan kekutan gaya adhesinya [36]. Menurut penelitian tentang modifikasi interfase *aramid fiber* menggunakan *nano-coating solution* menunjukkan bahwa SnO<sub>2</sub> dapat meningkatkan *interfacial adhesion* dengan resin *epoxy*. Hal ini menunjukkan bahwa SnO<sub>2</sub> dapat meningkatkan adhesi pada permukaan [37].



**Gambar 4.2** Struktur mikro *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

Pada Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengamatan metalografi dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. *As-cast* Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki struktur mikro *hexagonal closed packed* (HCP) tetapi arah tumbuhnya tegak lurus dari garis butir dan berbentuk seperti jarum dan memiliki batas butir  $\beta$ . Hal ini sesuai dengan prediksi awal menggunakan *factsage*, dimana fasa yang dimiliki *as-cast* paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn berupa HCP. Struktur mikro ini memiliki pola *Widmanstätten*. Hal ini dikarenakan gerak pembekuan fase  $\alpha$  di satu titik akan bertemu dengan fase  $\alpha$  pada titik lain [15].

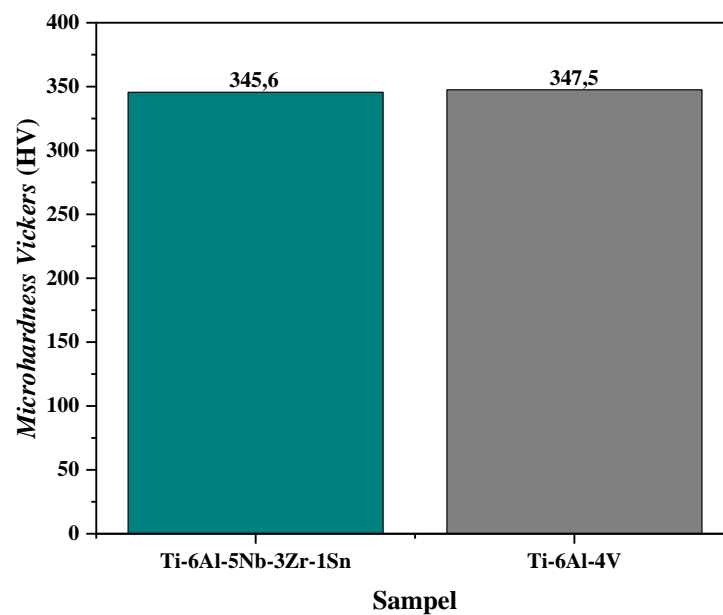
Pada Gambar 4.3a menunjukkan hasil pengamatan metalografi dari paduan Ti-6Al-4V berupa *as-cast* hasil pengecoran khusus dalam kondisi sebelum dilakukan perilaku oksidasi siklik. Pada Gambar 4.4b merupakan hasil struktur mikro dari penelitian Peters *et al.*, dapat dilihat bahwa *as-cast* Ti-6Al-4V memiliki struktur mikro berupa *coarse equiaxed* [38]. Struktur mikro paduan Ti-6Al-4V terdiri dari butiran *primary  $\alpha$*  dan *transformed  $\beta$* , di mana  $\beta$  yang bertransformasi terdiri dari jarum  $\alpha$  memanjang. Batas butir  $\beta$  pada paduan Ti-6Al-4V terbentuk seragam berwarna gelap dapat dilihat pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.3** Struktur mikro paduan Ti-6Al-4V [38]

### 4.3 Hasil Pengujian *Microhardness Vickers*

Untuk mengetahui nilai kekerasan dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan Ti-6Al-4V yang dihasilkan sebelum dan setelah dilakukannya perilaku oksidasi siklik dengan variasi jumlah siklus yang berbeda. Penelitian ini dilakukan pengujian *microhardness Vickers*. Nilai kekerasan awal untuk setiap sampel dihitung sebanyak 10 titik indentasi dengan gaya yang diberikan sebesar 1 N. Setelah itu, nilai kekerasan dihitung rata-ratanya. Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai kekerasan *as-cast* Ti-6Al-4V lebih tinggi sebesar 347,5 HV, daripada *as-cast* Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn sebesar 345,6 HV.

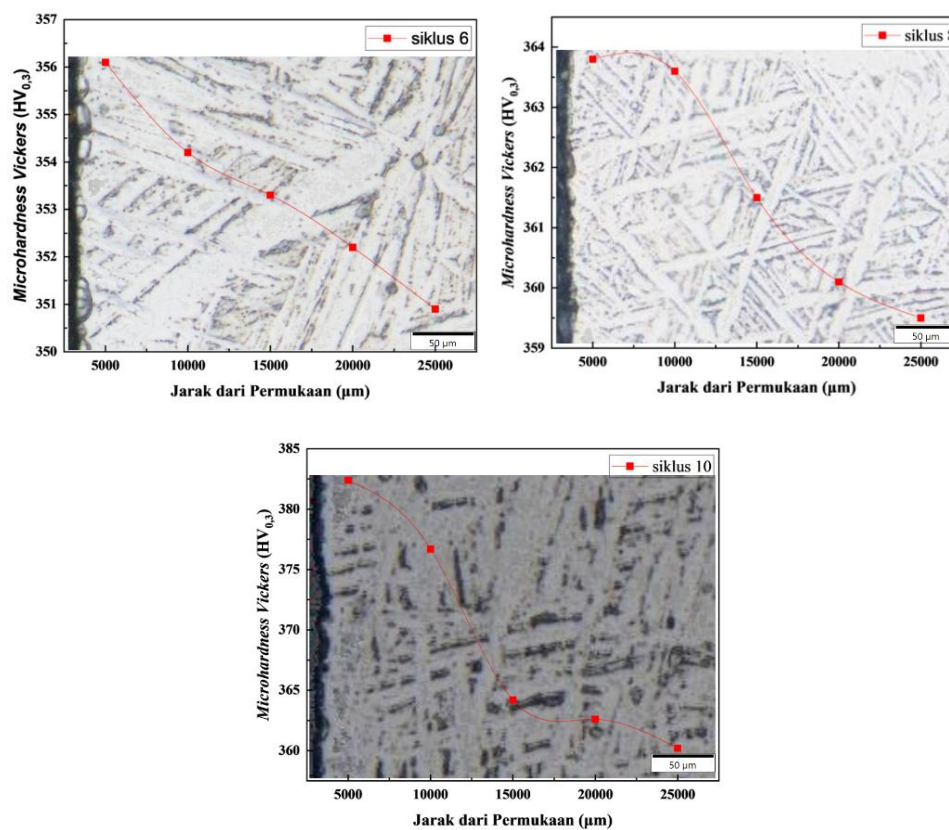


**Gambar 4.4** Nilai kekerasan sampel *as-cast*

Setelah dilakukan perilaku oksidasi siklik, sampel dihitung kembali nilai kekerasannya. Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn diberikan 5 titik indentasi dengan gaya yang diberikan sebesar 0,3 N. Jarak tiap antar titik berjarak sekitar 0,05 mm. Titik pertama diberikan pada permukaan pinggir dekat lapisan oksida hingga ke tengah sampel. Pada Gambar 4.5 merupakan hasil uji kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-



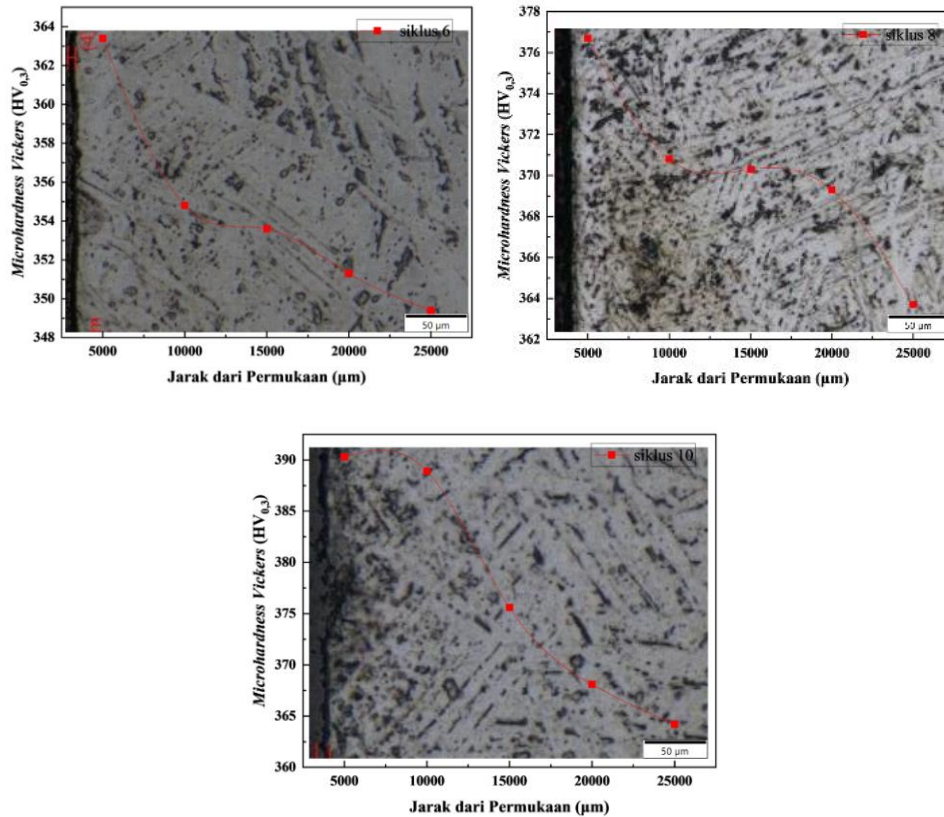
1Sn dengan variasi jumlah siklus ke-6 pada temperatur 600 °C. Dapat dilihat bahwa nilai kekerasan *as-cast* sebesar 345,6 HV mengalami kenaikan ketika sampel dilakukan perilaku oksidasi siklik. Nilai kekerasan pada permukaan sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn mengalami peningkatan hingga 382,4 HV. Peningkatan temperatur dan waktu oksidasi serta kandungan oksigen pada lapisan difusi meningkat, yang mengakibatkan peningkatan nilai kekerasan pada sampel yang dilakukan perilaku oksidasi [39].



**Gambar 4.5** Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 600 °C; a. 6 siklus, b. 8 siklus, dan c. 10 siklus

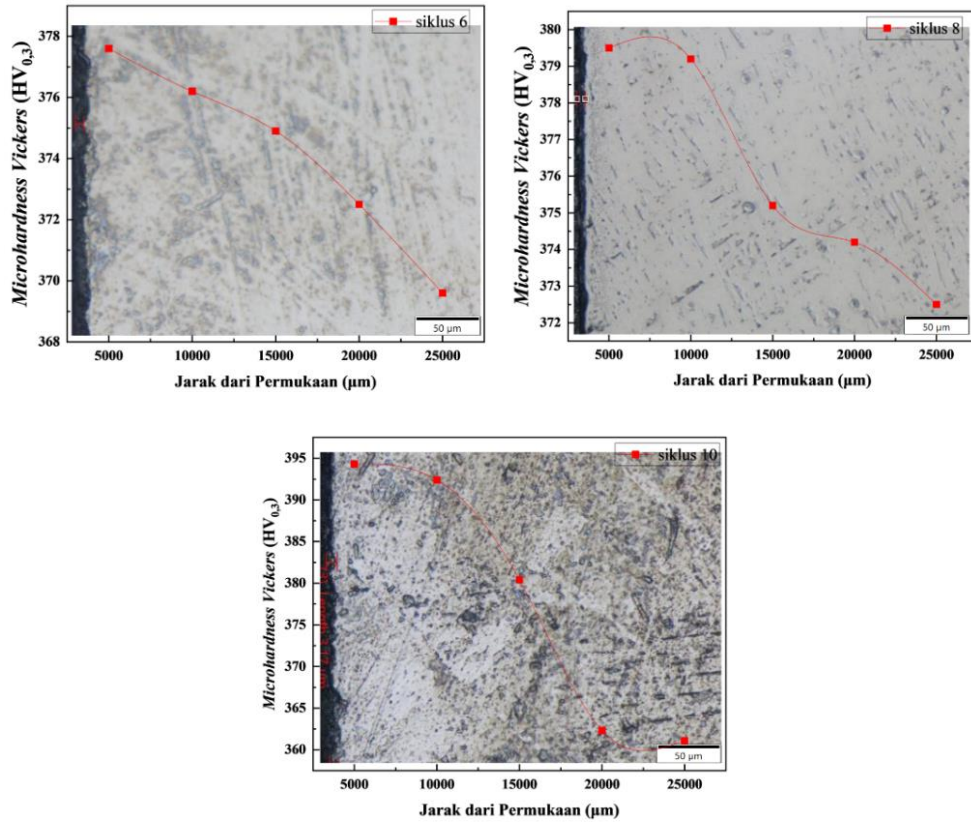
Gambar 4.6 merupakan sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn yang dilakukan perilaku oksidasi siklik dengan temperatur 650 °C. Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn diberikan 5 titik indentasi dengan gaya sebesar 0,3 N. Jarak tiap titik berjarak sekitar 0,05 mm. Titik pertama diberikan pada permukaan pinggir dekat lapisan oksida

hingga ke tengah sampel. Pada temperatur 650 °C, nilai kekerasan pada permukaan sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn mengalami peningkatan, dapat dilihat bahwa nilai kekerasan *as cast* sebesar 345,6 HV mengalami kenaikan hingga 390,3 HV.



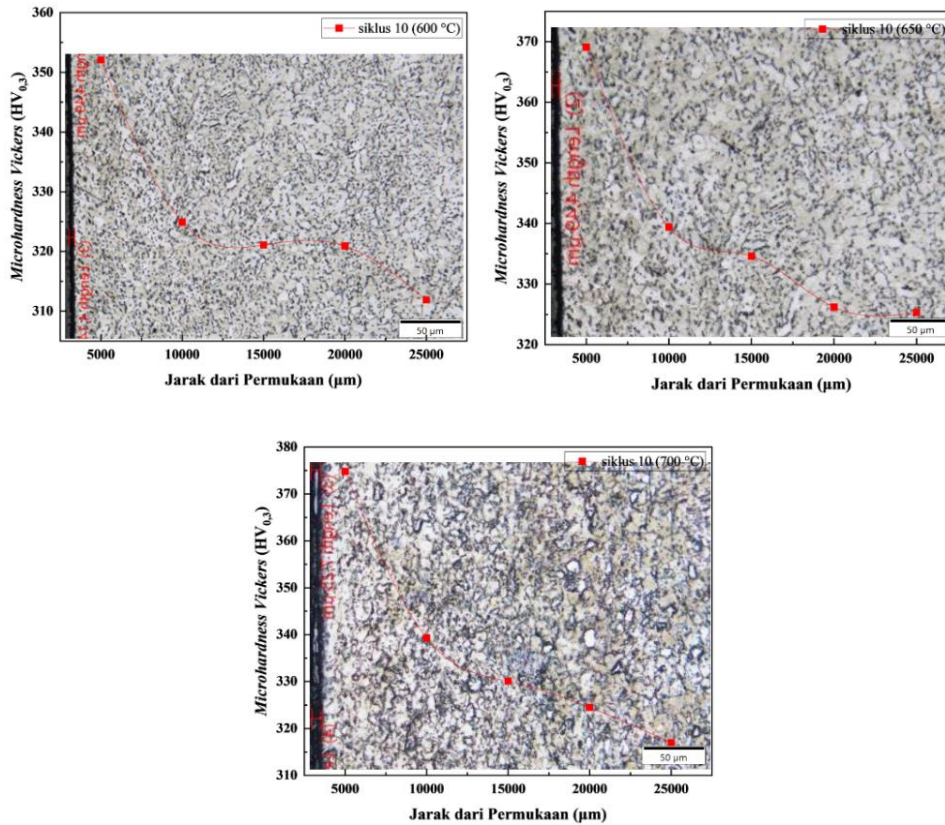
**Gambar 4.6** Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 650 °C; a) 6 siklus, b) 8 siklus, dan c) 10 siklus

Selanjutnya, Gambar 4.7 merupakan nilai kekerasan dari sampel yang telah dilakukan perilaku oksidasi siklik pada temperatur 700 °C. Nilai kekerasan pada permukaan sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn mengalami peningkatan hingga 394,3 HV. Untuk hasil perilaku oksidasi siklik dengan variasi temperatur dan variasi jumlah waktu oksidasi mengalami peningkatan. Peningkatan temperatur dan waktu oksidasi, kandungan oksigen pada pada lapisan difusi meningkat, yang mengakibatkan peningkatan nilai kekerasan pada sampel yang dilakukan perilaku oksidasi [39].



**Gambar 4.7** Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 700 °C; a) 6 siklus, b) 8 siklus, dan c) 10 siklus

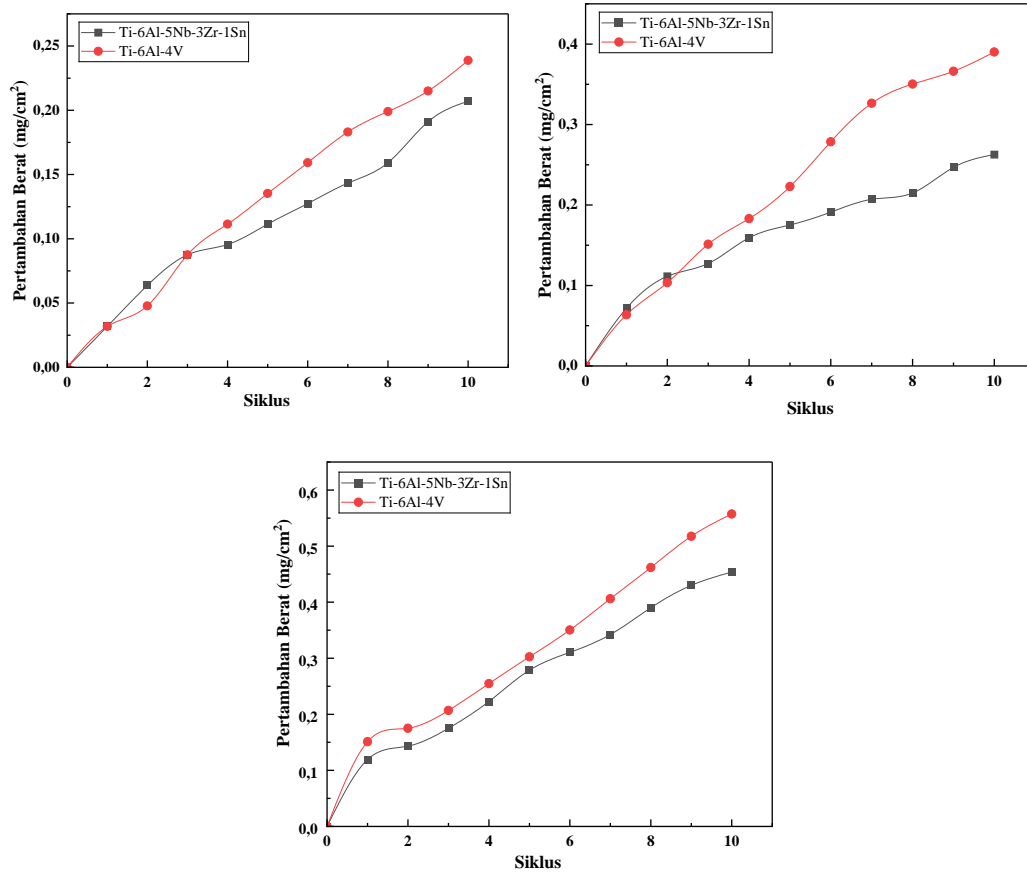
Selanjutnya, sampel Ti-6Al-4V diberikan juga 5 titik indentasi dengan gaya yang diberikan sebesar 0,3 N. Jarak tiap antar titik berjarak sekitar 0,05 mm. Titik pertama diberikan pada permukaan pinggir dekat lapisan oksida hingga ke tengah sampel. Pada Gambar 4.8 merupakan hasil uji kekerasan paduan Ti-6Al-4V siklus ke-10 dengan variasi temperatur (600 °C, 650 °C, dan 700 °C). Nilai kekerasan tertinggi sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada masing-masing temperatur yaitu 382,4 HV, 390,3 HV, dan 394,3 HV, sedangkan sampel Ti-6Al-4V pada masing-masing temperatur yaitu 352,1 HV, 369,1 HV, dan 374,8 HV. Peningkatan nilai kekerasan ini terjadi di daerah lapisan oksida yang terbentuk. Hal tersebut dikarenakan pengaruh dari ketebalan lapisan oksida. Bertambahnya waktu perilaku oksidasi pada temperatur tinggi, kekerasan lapisan oksida meningkat [40].



**Gambar 4.8** Nilai kekerasan paduan Ti-6Al-4V temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C

#### 4.4 Analisis Kinetika Oksidasi

Untuk mengetahui ketahanan material terhadap temperatur tinggi yang akan diaplikasikan sebagai bilah kompresor harus dilakukan perilaku oksidasi. Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan Ti-6Al-4V diberikan perilaku oksidasi dengan variasi jumlah siklus 6, 8, dan 10 dan variasi temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C. Satu siklus sama dengan 5 jam didalam tungku menyala. Setelah itu, sampel dikeluarkan dari *furnace*. Sampel ditimbang dengan tujuan untuk mengetahui pertambahan berat sampel yang dilakukan perilaku oksidasi siklik. penimbangan ini dilakukan tiap satu siklus. Hasil oksidasi siklik pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C disajikan dalam kurva pada Gambar 4.9 yang menunjukkan pertambahan berat sampel sebagai fungsi waktu uji.



**Gambar 4.9** Kinetika oksidasi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan Ti-6Al-4V pada temperatur; a. 600 °C, b. 650 °C, dan c. 700 °C

Nilai pertambahan berat paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C masing-masing sebesar 0,0026 g, 0,0033 g, dan 0,0057 g. Nilai pertambahan berat paduan Ti-6Al-4V pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C masing-masing sebesar 0,0030 g, 0,0049 g, dan 0,0070 g. Hasil menunjukkan bahwa dengan semakin bertambahnya berat rata-rata sampel akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah siklus oksidasinya. Selain itu, dapat juga dilihat bahwa grafik pertambahan berat paduan mengikuti model kinetika oksidasi parabola. Hal itu menunjukkan bahwa proses oksidasi dikendalikan oleh difusi [28].

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

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

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

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

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

$$\ln\left(\frac{\Delta W}{A}\right) = \frac{1}{n} \ln(t) + \frac{\ln(K_p)}{n} \dots\dots\dots(4.1)$$

Kinetika oksidasi dapat dijelaskan dengan  $\Delta W$  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 ( $K_p$ )

Temperatur (°C)	Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn			Ti-6Al-4V		
	600	650	700	600	650	700
<b>n</b>	2,0	1,4	1,6	2,3	2,1	1,5
<b><math>K_p</math> (<math>mg^2/cm^4.h</math>)</b>	$8 \times 10^{-4}$	$13 \times 10^{-4}$	$42 \times 10^{-4}$	$12 \times 10^{-4}$	$33 \times 10^{-4}$	$61 \times 10^{-4}$

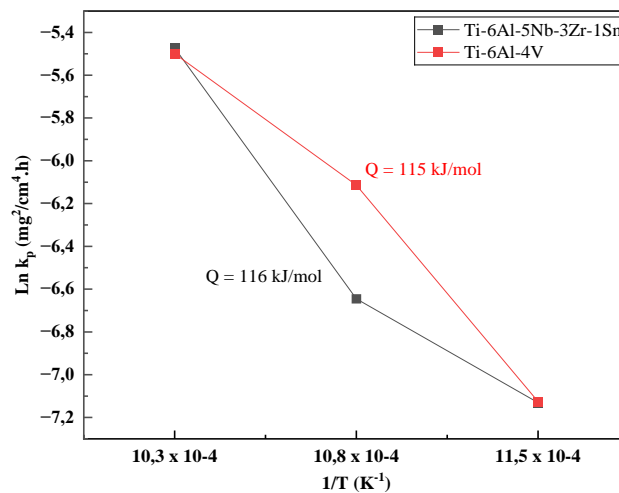
Adapun pernyataan bahwa jika  $n = 1$  kurva kinetika oksidasi mengikuti hukum linier, dan jika  $n = 2$ , kurva kinetika oksidasi mengikuti hukum parabola [41]. Dalam proses perilaku oksidasi siklik, tidak ada rumus yang jelas untuk

mengukur ketahanan oksidasi suatu material. Hasil yang tercantum pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai n untuk paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan paduan Ti-6Al-4V masing-masing dengan rata-rata sebesar 2, sehingga untuk menentukan laju oksidasi parabola ( $k_p$ ) dengan plot  $(\Delta W/A)^2$  per waktu. Nilai  $k_p$  terendah untuk paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn terdapat pada temperatur 600 °C adalah sebesar  $8 \times 10^{-4} \text{ mg}^2/\text{cm}^4.\text{h}$ , sedangkan untuk paduan Ti-6Al-4V terdapat pada temperatur 600 °C adalah sebesar  $12 \times 10^{-4} \text{ mg}^2/\text{cm}^4.\text{h}$ . Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki laju oksidasi lebih kecil dibandingkan dengan paduan Ti-6Al-4V. Hal tersebut terjadi karena adanya kandungan unsur niobium pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn. Laju oksidasi paduan Ti-Al secara signifikan menurun dengan adanya penambahan niobium dalam jumlah 5-10% [41]. Karena  $\theta$  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:

$$\begin{aligned} \theta &= t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \\ K_p &= t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \\ \ln(K_p) &= \ln\left(t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right) \\ \ln(K_p) &= \ln(t) + \ln\left(\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right) \\ \ln(K_p) &= \ln(t) - \frac{Q}{RT} \\ \ln(K_p) &= -\frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(t) \dots \dots \dots (4.2) \end{aligned}$$

Persamaan 4.2 didapatkan dengan melinearisasikan persamaan 2.2, dengan plot  $\ln(k_p)$  pada sumbu y terhadap  $\frac{1}{T}$  pada sumbu x. Kemiringan garis dalam grafik

tersebut adalah  $-\frac{Q}{R}$ , yang berhubungan dengan energi aktivasi (Q). Gambar 4.10 menunjukkan kesesuaian linier yang baik antara plot  $\ln k_p$  dan  $1/T$ . Energi aktivasi (Q) oksidasi sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan sampel Ti-6Al-4V yang diperoleh dari plot dihitung masing-masing sebesar 116 kJ/mol dan 115 kJ/mol. Energi aktivasi yang didapatkan memengaruhi kecepatan difusi reagen dalam fase produk reaksi dan laju difusi oksigen dalam substrat logam [26].



**Gambar 4.10** Plot Arrhenius konstanta laju parabola ( $k_p$ )

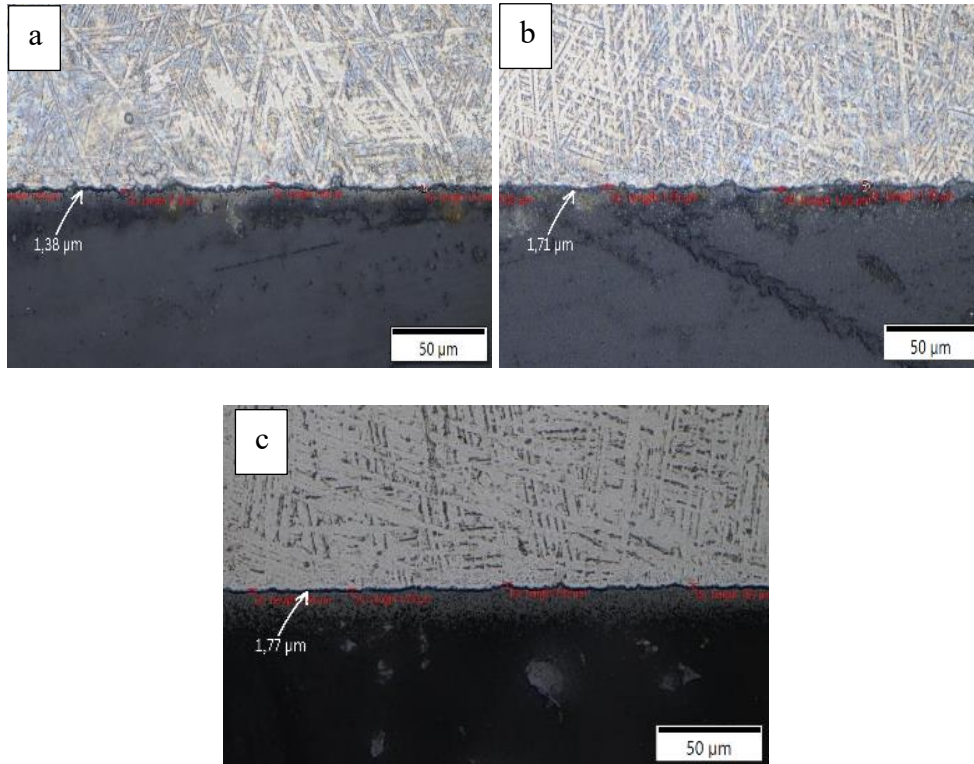
#### 4.5 Ketebalan Lapisan Oksida

Setelah sampel dilakukan perilaku oksidasi, sampel akan mengalami penambahan berat. Pertambahan berat ini dikarenakan terbentuknya lapisan oksida pada permukaan sampel. Lapisan oksida terbentuk dari beberapa senyawa oksida. Lapisan oksida ini berfungsi sebagai pelindung paduan titanium. Menurut literatur, lapisan oksidasi dipengaruhi oleh temperatur oksidasi dan lamanya waktu oksidasi [30]. Analisa dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik.

Hasil pengamatan struktur mikro memperlihatkan bahwa terdapat lapisan oksida baru yang muncul di atas permukaan paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan



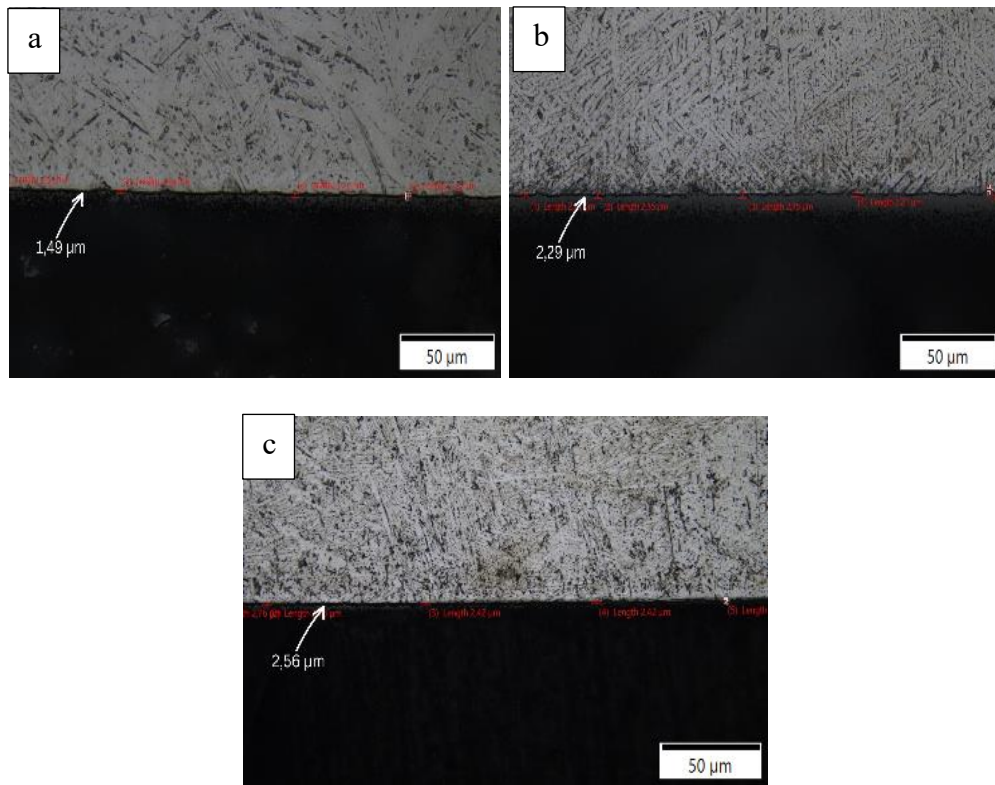
paduan Ti-6Al-4V, serta bertambahnya ketebalan dari lapisan oksida. Pengamatan dengan menggunakan mikroskop optik berupa gambar permukaan sampel menunjukkan bahwa lapisan oksida yang terbentuk selama oksidasi siklik pada sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C bersifat kontinyu dan homogen.



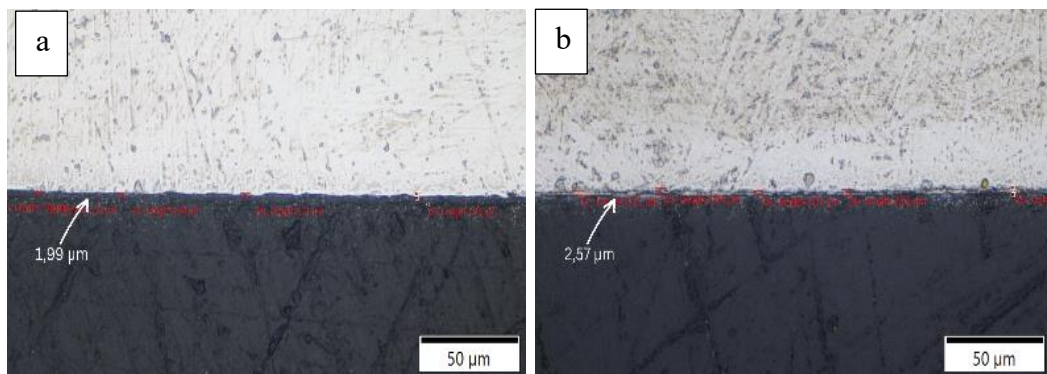
**Gambar 4.11** Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 600 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10)

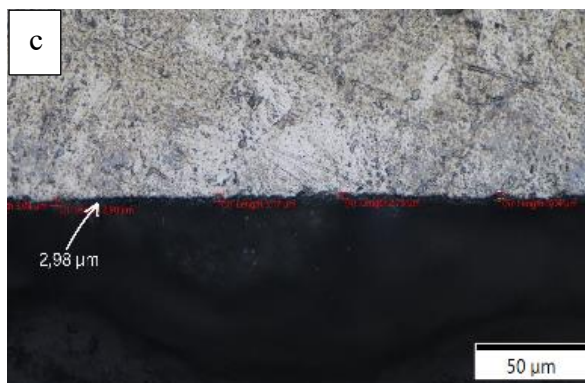
Pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 600 °C dengan siklus ke-6, 8, dan 10 memiliki ketebalan oksida masing-masing sebesar 1,38 μm, 1,71 μm, dan 1,77 μm. Gambar 4.12 menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 650 °C dengan siklus ke-6, 8, dan 10 memiliki ketebalan oksida masing-masing sebesar 1,49 μm, 2,29 μm, dan 2,56 μm. Gambar 4.13 menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur

700 °C dengan siklus ke-6, 8, dan 10 memiliki ketebalan oksida masing-masing sebesar 1,99  $\mu\text{m}$ , 2,57  $\mu\text{m}$ , dan 2,98  $\mu\text{m}$ . Menurut penelitian Aniolek tahun 2020, peningkatan temperatur dan perpanjangan waktu oksidasi akan menghasilkan penetrasi oksigen yang lebih dalam pada zona difusi oksigen [39]. Namun, dapat dilihat bahwa ketika ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-8 menuju siklus ke-10 peningkatannya kecil karena lapisan oksida sudah menahan oksigen yang masuk.



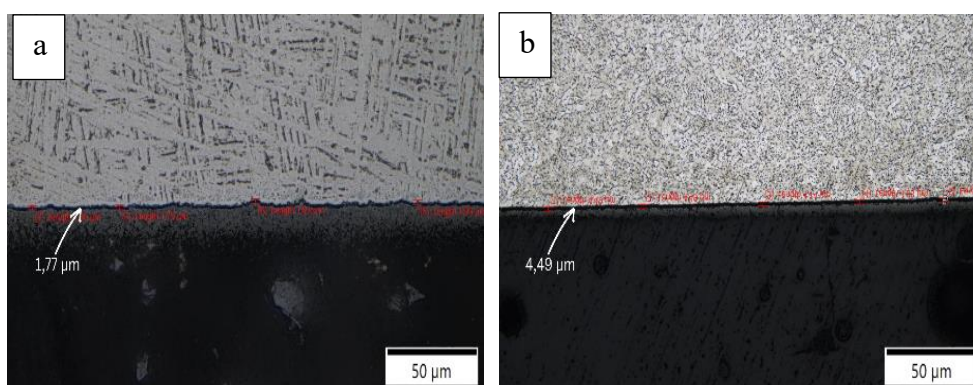
**Gambar 4.12** Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 650 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10)



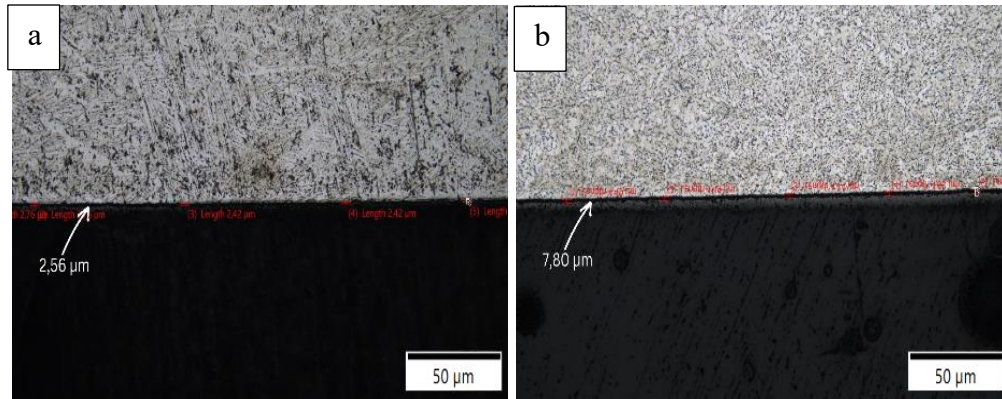


**Gambar 4.13** Ketebalan lapisan oksida dengan temperatur 700 °C (a. siklus 6, b. siklus 8, dan c. siklus 10)

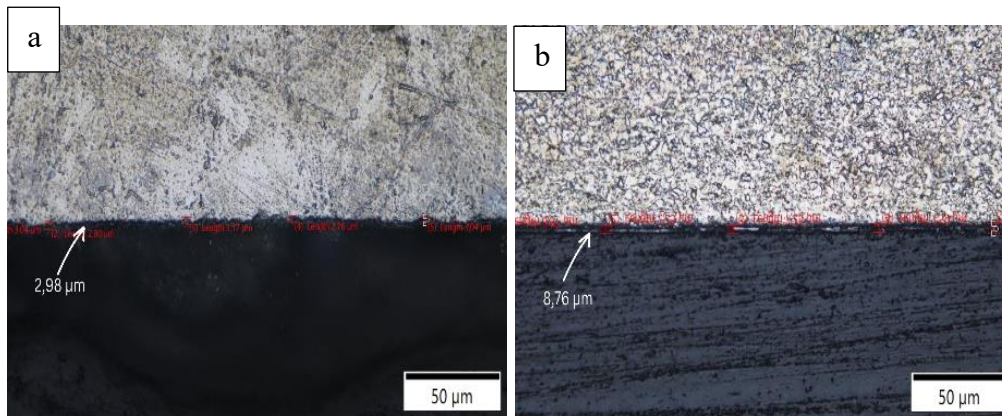
Gambar 4.14-16 menunjukkan bahwa ketebalan lapisan oksida dipengaruhi oleh temperatur dan unsur pepadu paduan. Ketebalan lapisan oksida paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada masing-masing temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C sebesar 1,77 μm, 2,56 μm, dan 2,99 μm. Ketebalan lapisan oksida paduan Ti-6Al-4V pada masing-masing temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C sebesar 4,49 μm, 7,80 μm, dan 8,76 μm. Hal ini dikarenakan unsur vanadium dalam paduan Ti-6Al-4V dapat mempercepat kinetika oksidasi, sehingga lebih cepat mengalami degradasi [10]. Selain itu, unsur niobium dalam paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dapat meningkatkan pembentukan  $Al_2O_3$  [7]. Ketebalan lapisan oksida disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.17.



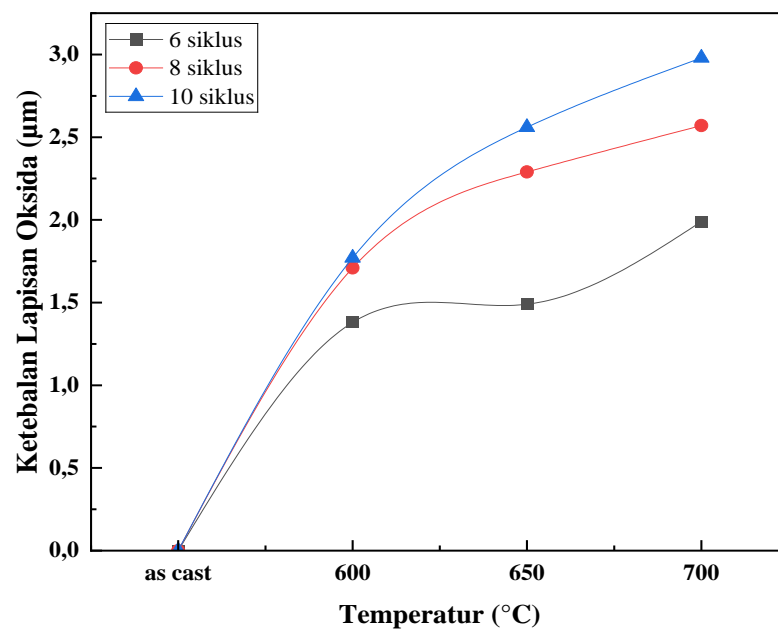
**Gambar 4.14** Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 600 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V)

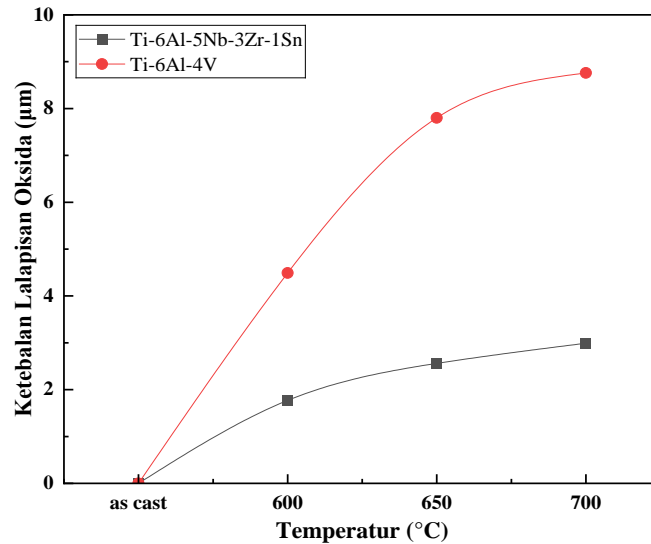


**Gambar 4.15** Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 650 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V)



**Gambar 4.16** Ketebalan lapisan oksida pada siklus ke-10 dengan temperatur 700 °C (a. Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan b. Ti-6Al-4V)





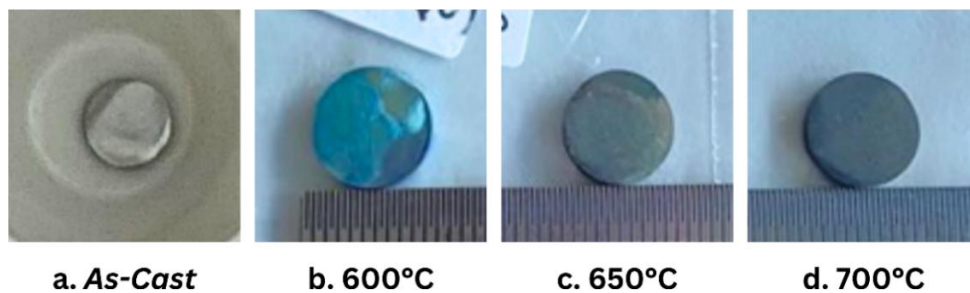
**Gambar 4.17** Ketebalan lapisan oksida

#### 4.6 Permukaan Sampel Setelah dilakukan Oksidasi Siklik

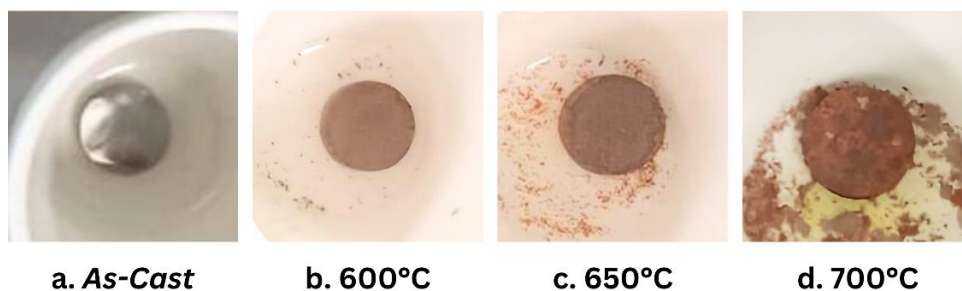
Paduan titanium yang terkena oksidasi akan mengalami perubahan warna. Oksidasi dapat menyebabkan terbentuknya lapisan oksida yang mengubah warna dari paduan tersebut. Ketebalan lapisan oksida yang terbentuk dapat memengaruhi warna yang dihasilkan pada permukaan. Ketika temperatur divariasikan akan menghasilkan warna pada sampel yang berbeda-beda.

Pada Gambar 4.18a merupakan sampel sebelum dilakukan oksidasi siklik berwarna putih keperakan. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn diberikan perilaku oksidasi sebanyak 10 siklus yaitu selama 50 jam dengan memvariasikan temperaturnya (600 °C, 650 °C, dan 700 °C). Sampel berubah warna menjadi warna biru setelah dilakukan oksidasi dengan temperatur 600 °C pada Gambar 4.18b. Saat temperatur 650 °C pada Gambar 4.18c, sampel menjadi warna abu-abu muda. Selanjutnya pada Gambar 4.18d sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn berubah menjadi warna abu-abu gelap. Perubahan warna ini dikarenakan ketebalan lapisan oksida

pada permukaan sampel paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn tidak sampai mengalami pengelupasan lapisan oksida. Menurut penelitian Matsunaga *et al.* menyatakan bahwa penambahan Zr dapat membuat lapisan oksida terkelupas (*spalling*), tetapi ketika unsur Zr dan Nb dipadukan secara bersamaan akan meningkatkan daya rekat lapisan oksida. Selain itu, Nb tidak hanya dapat mengurangi oksidasi saja, tetapi juga dapat meningkatkan adhesi oksida pada paduan titanium [42].



**Gambar 4.18** Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn



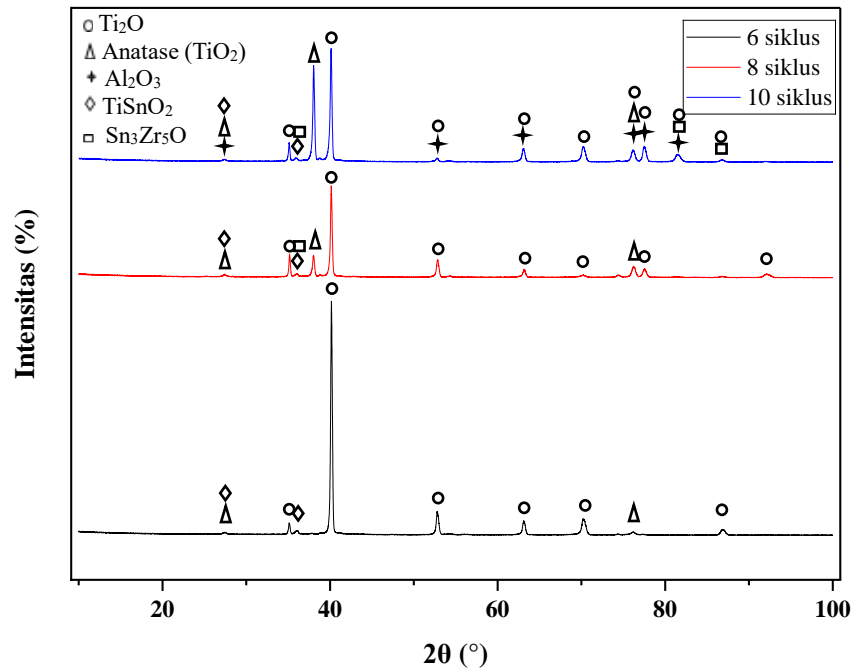
**Gambar 4.19** Sampel Ti-6Al-4V

Pada Gambar 4.19a merupakan sampel sebelum dilakukan oksidasi siklik berwarna putih keperakan. Paduan Ti-6Al-4V diberikan perilaku oksidasi sebanyak 10 siklus yaitu selama 50 jam dengan memvariasikan temperaturnya (600 °C, 650 °C, dan 700 °C). Terdapat perubahan warna ketika dilakukan perilaku oksidasi dengan temperatur 600°C dari putih keperakan menjadi coklat muda pada Gambar 4.19b. Namun, pada temperatur 650 °C pada Gambar 4.19c, sampel Ti-6Al-4V

mulai sedikit mengalami pengelupasan lapisan oksida (*spalling*). Pengelupasan ini juga terjadi pada temperatur 700 °C (Gambar 4.19d). Hal ini dikarenakan lapisan oksida yang terbentuk pada paduan Ti-6Al-4V tidak kuat menahan perilaku oksidasi siklik pada temperatur tersebut. Hasil penelitian ini sesuai dengan literatur yang menunjukkan bahwa paduan Ti-6Al-4V yang diberikan perilaku oksidasi pada temperatur tinggi dan waktu oksidasi yang lama menghasilkan lapisan oksida yang cenderung terkelupas dan retak [30]. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn memiliki ketahanan oksidasi lebih baik, dibandingkan dengan paduan Ti-6Al-4V.

#### 4.7 Senyawa Lapisan Oksida

Setelah mengetahui ketebalan dari lapisan oksida, sampel dilakukan pengujian XRD. Pengujian bertujuan untuk mengetahui senyawa-senyawa oksida yang membentuk lapisan oksida. Gambar 4.20 merupakan hasil pengujian XRD sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada temperatur 650 °C. Ketika sampel diberikan perilaku oksidasi dengan siklus 6, lapisan oksida yang terbentuk terdiri dari Ti<sub>2</sub>O, anatase (TiO<sub>2</sub>), dan TiSnO<sub>2</sub>. Pada siklus ke-8 dan 10 mulai muncul Sn<sub>3</sub>Zr<sub>5</sub>O. Fasa anatase (TiO<sub>2</sub>) memiliki kinerja fotokatalis yang sangat baik [43]. Fotokatalis ini membantu laju reaksi oksidasi lebih cepat, sehingga sampel terlindungi oleh lapisan oksida yang telah terbentuk. Senyawa aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) baru terbentuk pada temperatur 650 °C saat siklus ke-10. Penelitian yang dijelaskan dalam artikel ilmiah Aniolek tahun 2020 [26] menunjukkan bahwa aluminium oksida terbentuk sangat lambat, hal ini disebabkan karena keberadaan bentuk oksida yang stabil ini memerlukan waktu oksidasi lebih lama atau temperatur oksidasi lebih tinggi.

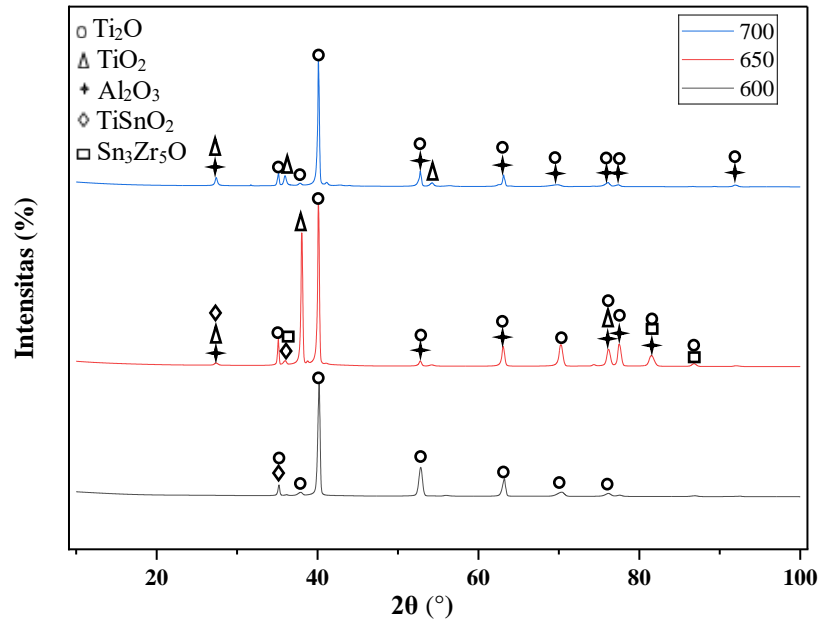


**Gambar 4.20** Senyawa-senyawa oksida yang terbentuk pada temperatur 650 °C

Gambar 4.21 menunjukkan pola XRD yang representatif dari skala oksida yang terbentuk dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn setelah dilakukan perilaku oksidasi selama 10 siklus (50 jam) pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C. Analisis pola XRD menunjukkan bahwa lapisan oksida pada temperatur 600 °C terdiri dari Ti<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> tipe anatase, dan TiSnO<sub>2</sub>. Salah satu fasa mengalami perubahan, pada temperatur 650 °C adalah TiO<sub>2</sub> tipe anatase dan sedikit rutil, sedangkan pada temperatur 700 °C terdiri dari TiO<sub>2</sub> tipe rutil. Perubahan struktur ini disebabkan oleh peningkatan temperatur yang terjadi pada sampel yang telah diberikan perilaku oksidasi siklik. Menurut literatur dari Aniolek tahun 2020, ketika paduan diberikan oksidasi temperatur lebih tinggi menyebabkan peningkatan fasa rutil yang signifikan. Peningkatan tersebut dapat dilihat dari pola difraksi [26]. Hal itu juga terjadi pada hasil difraksi penelitian ini, dimana rutil meningkat bersamaan dengan meningkatnya temperatur oksidasi siklik. Fasa rutil diidentifikasi sebagai



fasa yang paling stabil secara termodinamika, sedangkan fasa anatase bersifat metastabil dan dapat diubah menjadi fasa rutil secara ireversibel pada temperatur tinggi [44]



**Gambar 4.21** Senyawa-senyawa oksida yang terbentuk pada temperatur 600 °C, 650 °C, dan 700 °C

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui struktur mikro, nilai kekerasan, lapisan oksida yang terbentuk, dan kinetika oksidasi dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dengan perilaku oksidasi siklik, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn termasuk paduan titanium *near  $\alpha$*  memiliki struktur mikro  *$\alpha$ -colony* dengan pola *Widmanstätten*, sedangkan paduan Ti-6Al-4V termasuk paduan titanium  $\alpha+\beta$  dengan struktur mikro *coarse equiaxed*.
2. Semakin tinggi temperatur yang digunakan saat perilaku oksidasi akan semakin tinggi nilai kekerasan karena terjadi proses difusi termal yang mengakibatkan terbentuknya lapisan oksida.
3. Penambahan berat pada tiap lamanya waktu oksidasi akan sebanding dengan ketebalan lapisan oksida yang terbentuk. Lapisan oksida yang terbentuk pada paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn terdiri dari  $Ti_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiSnO_2$ , dan  $Sn_3Zr_5O$ .
4. Kinetika oksidasi paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dan Ti-6Al-4V mengikuti hukum parabola. Energi aktivasi dari masing-masing paduan sebesar 116 kJ/mol dan 115 kJ/mol.

5. Paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn dapat menjadi alternatif bahan material bilah kompresor bertekanan tinggi pada mesin pesawat terbang.

## 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik serupa yaitu sebagai berikut:

1. Penambahan perlakuan panas sebelum dilakukannya perilaku oksidasi siklik agar mengetahui perubahan struktur mikro.
2. Perlu ditambahkan pengujian aus agar mengetahui tingkat ketahanan aus dari paduan Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 685. Elsevier Ltd, pp. 784–798, 2016. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.212.
- [2] J. Dai, S. Li, H. Zhang, H. Yu, C. Chen, and Y. Li, "Microstructure and high-temperature oxidation resistance of Ti-Al-Nb coatings on a Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser surface alloying," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 344, no. 2017, pp. 479–488, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.060.
- [3] T. Zhang *et al.*, "A new  $\alpha + \beta$  Ti-alloy with refined microstructures and enhanced mechanical properties in the as-cast state," *Scr. Mater.*, vol. 207, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2021.114260.
- [4] W. Chen *et al.*, "Oxidation mechanism of a near  $\beta$ -Ti alloy," *Mater. Des.*, vol. 223, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111144.
- [5] S. L. Wei, L. J. Huang, X. T. Li, Q. An, and L. Geng, "Interactive effects of cyclic oxidation and structural evolution for Ti-6Al-4V/(TiC+TiB) alloy composites at elevated temperatures," *J. Alloys Compd.*, vol. 752, pp. 164–178, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.04.118.
- [6] E. Dong, W. Yu, Q. Cai, L. Cheng, and J. Shi, "High-Temperature Oxidation Kinetics and Behavior of Ti-6Al-4V Alloy," *Oxid. Met.*, vol. 88, no. 5–6, pp. 719–732, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11085-017-9770-0.
- [7] M. Mitoraj-Królikowska and E. Drożdż, "Some Aspects of Oxidation and Reduction Processes in Ti-Al and Ti-Al-Nb Systems," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/ma15051640.
- [8] J. Haubrich, E. Kaxiras, and C. M. Friend, "The role of surface and subsurface point defects for chemical model studies on TiO<sub>2</sub>: A first-principles theoretical study of formaldehyde bonding on rutile TiO<sub>2</sub>(110)," *Chem. - A Eur. J.*, vol. 17, no. 16, pp. 4496–4506, 2011, doi: 10.1002/chem.201002588.

- [9] W. Dang, J. S. Li, T. B. Zhang, and H. C. Kou, "Oxidation behavior of Zr-containing Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy at 800 °C," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 25, no. 3, pp. 783–790, Mar. 2015, doi: 10.1016/S1003-6326(15)63664-0.
- [10] B. Vincent *et al.*, "Comparison Between the Oxidation Behaviors of Ti6242S, Ti6246, TiXT Alloys, and Pure Titanium," *Oxid. Met.*, vol. 96, no. 3–4, pp. 283–294, 2021, doi: 10.1007/s11085-021-10051-w.
- [11] Z. Dong, A. Feng, H. Wang, and S. Qu, "Thermodynamic Study on Initial Oxidation Behavior of TiAl-Nb Alloys at High Temperature," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/met13030485.
- [12] H. Alloys, "Effects of Zr Content on The Microstructure and Performance of TiMoNbZr x High-Entropy Alloys," *High-Entropy Alloys, Metals*, pp. 1–12, 2021, doi: 10.3390/met11081315.
- [13] 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.
- [14] S. Gosavi, S. Gosavi, and R. Alla, "Titanium: A Miracle Metal in Dentistry," 2013. [Online]. Available: <http://www.sbaoi.org/tibao>
- [15] C. Sutowo, F. Rokhmanto, G. Senopati, dan K. Ardian Ilman, "Pembentukan Struktur Mikro Paduan Titanium Ti6Al6Mo As Cast Sebagai Bahan Dasar Implan," pp. 1–5, 2016.
- [16] G. Lutjering and J. C. Williams, "Titanium 2<sup>nd</sup> Edition," New York : S. pringer, 2006.
- [17] E. Reverte, S. A. Tsipas, and E. Gordo, "Oxidation and corrosion behavior of new low-cost Ti-7Fe-3Al and Ti-7Fe-5Cr alloys from titanium hydride powders," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/met10020254.
- [18] Y. Su, W. Li, X. Wang, T. Ma, X. Yang, and A. Vairis, "On microstructure and property differences in a linear friction welded near-alpha titanium alloy joint," *J. Manuf. Process.*, vol. 36, pp. 255–263, 2018, doi:

10.1016/j.jmapro.2018.10.017.

- [19] Vahid salimian Rizi, “High temperature oxidation and corrosion resistances of Ti-4Si-xZr- yY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/5TiO<sub>2</sub> composites prepared by high-energy milling and cold pressed sintering,” *Mater. Res. Express*, pp. 0–12, 2019.
- [20] J. C. Williams and R. R. Boyer, “Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components,” *Metals (Basel)*., vol. 10, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/met10060705.
- [21] S. Jakati, V. Koti, P. S. Kataraki, M. Mazlan, and M. F. Hamid, “A Deep Study on Machine Learning Techniques for Tool Condition Monitoring in Turning of Titanium-based Superalloys,” *J. Mines, Met. Fuels*, pp. 261–266, Mar. 2023, doi: 10.18311/jmmf/2022/31235.
- [22] I. Aniekan, O. Ikechukwu, P. O. Ebunilo, and E. Ikpe, “Material Selection for High Pressure (HP) Compressor Blade of an Aircraft Engine,” *Int. J. Adv. Mater. Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 59–65, 2016, [Online]. Available: <http://www.aiscience.org/journal/ijamrhttp://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [23] B. Mohammadi and A. S. Khoddami, “Representative volume element-based simulation of multiple solid particles erosion of a compressor blade considering temperature effect,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 234, no. 8, pp. 1173–1184, Aug. 2020, doi: 10.1177/1350650119884825.
- [24] I. Isranuri, M. Sabri, and S. Abda, “Analisa Simulasi Distribusi Temperatur dan Tekanan Menggunakan Aplikasi Ansys 15.0 pada Ruang Bakar Turbin Gas Untuk Mengetahui Tingkat Keadaan,” *J. Din.*, vol. 7, no. 3, 2019.
- [25] V. M. Tabie, C. Li, W. Saifu, J. Li, and X. Xu, “Mechanical properties of near alpha titanium alloys for high-temperature applications - a review,” *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 92, no. 4, pp. 521–540, 2020, doi: 10.1108/AEAT-04-2019-0086.
- [26] K. Aniołek, “Structure and properties of titanium and the Ti-6Al-7Nb alloy after isothermal oxidation,” *Surf. Eng.*, vol. 36, no. 8, pp. 847–858, 2020, doi: 10.1080/02670844.2020.1711631.

- [27] J. Philibert, “High temperature oxidation of metals,” *Rev. Metall. Cah. D’Informations Tech.*, vol. 90, no. 12, pp. 1601–1606, 1993, doi: 10.1051/metal/199390121601.
- [28] Y. Song *et al.*, “Effect of Nb content on cyclic oxidation behavior of as-cast Ti-1100 alloys,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 5, Mar. 2020, doi: 10.3390/ma13051082.
- [29] M. Göbel, J. D. Sunderkötter, D. I. Mircea, H. Jenett, and M. F. Stroosnijder, “Study of the high-temperature oxidation behaviour of Ti and Ti4Nb with SNMS using tracers,” *Surf. Interface Anal.*, vol. 29, no. 5, pp. 321–324, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1096-9918(200005)29:5<321::AID-SIA872>3.0.CO;2-Q.
- [30] M. Nurbanasari, D. Hadi Prajitno, dan Hendra Chany, S. Jurusan Teknik Mesin, and P. Tenaga Nuklir BATAN Jl Tamansari -Bandung Abstrak, “PERILAKU OKSIDASI PADUAN Ti-6Al-4V PADA TEMPERATUR TINGGI.”
- [31] P. Ouyang, G. Mi, P. Li, L. He, J. Cao, and X. Huang, “Non-isothermal oxidation behavior and mechanism of a high temperature near- $\alpha$  Titanium Alloy,” *Materials (Basel)*., vol. 11, no. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11112141.
- [32] A. S. Khanna, “High-temperature oxidation,” *Handb. Environ. Degrad. Mater. Third Ed.*, vol. 2, pp. 117–132, 2018, doi: 10.1016/B978-0-323-52472-8.00006-X.
- [33] Y. duo Ma *et al.*, “Microstructure and properties evolution of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings during high temperature and thermal shock resistance,” *Mater. High Temp.*, vol. 37, no. 4, pp. 256–267, 2020, doi: 10.1080/09603409.2020.1773203.
- [34] J. Shen *et al.*, “Effect of Y Content on Precipitation Behavior, Oxidation and Mechanical Properties of As-Cast High-Temperature Titanium Alloys,” *Materials (Basel)*., vol. 16, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/ma16134784.
- [35] Y. Guo, K. Georganakis, Y. Yokoyama, and A. R. Yavari, “On the mechanical properties of TiNb based alloys,” *J. Alloys Compd.*, vol. 571, pp. 25–30, 2013, doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.192.

- [36] W. J. Li *et al.*, “Effects of dopants on the adhesion and electronic structure of a SnO<sub>2</sub>/Cu interface: A first-principles study,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 23, pp. 15618–15625, 2018, doi: 10.1039/c8cp00744f.
- [37] T. Li *et al.*, “Non-destructive modification of aramid fiber by building nanoscale-coating solution to enhance the interfacial adhesion properties of the fiber-reinforced composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no. 13, pp. 1823–1834, 2021, doi: 10.1177/0021998320962845.
- [38] M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, and C. Leyens, *Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys*. 2003. doi: 10.1002/3527602119.ch1.
- [39] K. Aniołek, A. Barylski, M. Kupka, and G. Dercz, “Cyclic oxidation of titanium grade 2,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 23, pp. 1–14, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13235431.
- [40] Z. C. Li *et al.*, “High-temperature oxidation behaviors of ta15 titanium alloy after mechanical grinding and laser cleaning,” *Coatings*, vol. 11, no. 9, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/coatings11091090.
- [41] 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.
- [42] S. Matsunaga, A. Serizawa, and Y. Yamabe-Mitarai, “Effect of Zr on microstructure and oxidation behavior of  $\alpha$  and  $\alpha + \alpha_2$  Ti-Al-Nb alloys,” *Mater. Trans.*, vol. 57, no. 11, pp. 1902–1907, 2016, doi: 10.2320/matertrans.MAW201603.
- [43] L. Pan *et al.*, “Manipulating spin polarization of titanium dioxide for efficient photocatalysis,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-14333-w.
- [44] C. Byrne, R. Fagan, S. Hinder, D. E. McCormack, and S. C. Pillai, “New approach of modifying the anatase to rutile transition temperature in TiO<sub>2</sub> photocatalysts,” *RSC Adv.*, vol. 6, no. 97, pp. 95232–95238, 2016, doi: 10.1039/c6ra19759k.



**LAMPIRAN A**  
**CONTOH PERHITUNGAN**

**Lampiran A. Contoh Perhitungan**

1. Komposisi Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

Komposisi masing-masing unsur

Ti = 99,70%

Al = 99,95%

Nb = 99,95%

Zr = 99,95%

Sn = 99,95%

Tiap satu sampel memiliki berat sebesar 20 g.

a.  $Al = \frac{6}{100} \times 20 \text{ g} = 1,2 \text{ g}$

b.  $Nb = \frac{5}{100} \times 20 \text{ g} = 1 \text{ g}$

c.  $Zr = \frac{3}{100} \times 20 \text{ g} = 0,6 \text{ g}$

d.  $Sn = \frac{1}{100} \times 20 \text{ g} = 0,2 \text{ g}$

e.  $Ti = 20 - (1,2 + 1 + 0,6 + 0,2) = 17 \text{ g}$

**Tabel A.1** Komposisi Bahan Baku Secara Perhitungan

Komposisi	Ti	Al	Nb	Zr	Sn	Jumlah
Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn	17	1,2	1	0,6	0,2	20

2. Pertambahan Berat Sampel Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

$$\frac{(\Delta W \times 1000)}{\pi r^2} \dots\dots\dots (A.1)$$

a. Temperatur 600 °C

- $\frac{(0,0004 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0319 \text{ mg/cm}^2$

- $\frac{(0,0008 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0637 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0011 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0876 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0012 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0955 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0014 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1115 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0016 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1274 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0018 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1433 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,002 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1592 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0024 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1911 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0026 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2070 \text{ mg/cm}^2$

b. Temperatur 650 °C

- $\frac{(0,0009 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0717 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0014 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1115 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0016 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1274 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,002 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1592 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0022 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1752 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0024 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1911 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0026 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2070 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0027 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2150 \text{ mg/cm}^2$

- $\frac{(0,0031 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2468 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0033 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2627 \text{ mg/cm}^2$

c. Temperatur 700 °C

- $\frac{(0,0015 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1194 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0018 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1433 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0022 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1752 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0028 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2229 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0035 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2787 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0039 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3105 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0043 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3424 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0049 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3901 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0054 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,4299 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0057 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,4538 \text{ mg/cm}^2$

3. Pertambahan Berat Sampel Ti-6Al-4V

a. Temperatur 600 °C

- $\frac{(0,0004 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0319 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0006 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0478 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0011 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0876 \text{ mg/cm}^2$

- $\frac{(0,0014 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1115 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0017 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1354 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,002 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1592 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0023 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1831 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0025 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1990 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0027 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2150 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,003 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2389 \text{ mg/cm}^2$

b. Temperatur 650 °C

- $\frac{(0,0008 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,0637 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0013 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1035 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0019 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1513 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0023 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1831 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0028 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2229 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0035 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2787 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0041 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3264 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0044 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3503 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0046 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3662 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0049 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3901 \text{ mg/cm}^2$

c. Temperatur 700 °C

- $\frac{(0,0019 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1513 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0022 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,1752 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0026 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2070 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0032 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,2548 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0038 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3026 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0044 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,3503 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0051 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,4061 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0058 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,4618 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,0065 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,5175 \text{ mg/cm}^2$
- $\frac{(0,007 \times 1000)}{3,14 \times 0,5 \times 0,5} = 0,5573 \text{ mg/cm}^2$

#### 4. Energi Aktivasi

$$\text{Slope} = \frac{-E_a}{R} \dots \dots \dots (A.2)$$

- Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn

$$-13.971 = \frac{-E_a}{8,314}$$

$$-E_a = -13.971 \times 8,314$$

$$-E_a = -116.154,89 \text{ J}$$

$$E_a = 116 \text{ kJ}$$

- Ti-6Al-4V

$$-13.863 = \frac{-E_a}{8,314}$$

$$-E_a = -13.863 \times 8,314$$

$$-E_a = -115.256,98 \text{ J}$$

$$E_a = 115 \text{ kJ}$$

**LAMPIRAN B**  
**DATA PENELITIAN**



## Lampiran B. Data Penelitian

### 1. Data Hasil SEM-EDS

**Tabel B.1** Hasil SEM-EDS *As-Cast*

Unsur	Komposisi (%wt)			Rata-rata Komposisi (%wt)
	I	II	III	
Oksigen	13,81	16,42	16,61	15,61
Aluminium	4,01	3,85	3,69	3,85
Niobium	3,17	2,92	3,70	3,26
Zirkonium	1,69	1,82	1,78	1,76
Timah	0,89	0,62	1,04	0,85
Titanium	76,44	74,37	73,18	74,66

### 2. Data Hasil XRD

**Tabel B.2** *Peak List* Hasil XRD *As-Cast*

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
40,9321	212(71)	0,5984	2,55827	25,37
41,0254	106(40)	0,5984	2,55825	12,62
44,7120	216(173)	0,5984	2,35173	25,76
44,8148	107(91)	0,5984	2,35171	12,81
46,9279	837(194)	0,5984	2,24653	100,00
47,0364	416(103)	0,5984	2,24651	49,74
62,2866	110(94)	0,5984	1,72958	13,18
62,4376	55(49)	0,5984	1,72957	6,55
74,6831	122(71)	0,5984	1,47471	14,56
74,8738	61(45)	0,5984	1,47470	7,24

**Tabel B.2** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
84,1690	129(79)	0,5984	1,33463	15,42
84,3947	64(47)	0,5984	1,33463	7,68
88,9561	19(21)	0,5984	1,27670	2,25
89,2016	9(13)	0,5984	1,27670	1,12
91,5315	142(68)	0,5984	1,24845	16,93
91,7883	71(44)	0,5984	1,24844	8,45
93,1256	103(45)	0,5984	1,23188	12,29
93,3897	51(30)	0,5984	1,23188	6,13
99,2993	21(26)	0,5984	1,17374	2,47
99,5937	10(14)	0,5984	1,17373	1,23
105,8329	29(28)	0,5984	1,12127	3,49
106,1640	15(16)	0,5984	1,12127	1,75
114,0655	29(41)	0,5984	1,06618	3,46
114,4517	15(22)	0,5984	1,06617	1,74

**Tabel B.3** *Pattern List Hasil XRD As-Cast*

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i> <i>Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i> <i>Name</i>	<i>Displacement</i> [°2Th.]	<i>Scale</i> <i>Factor</i>	<i>Chemical</i> <i>Formula</i>
*	98-005-2522	66	<i>Titanium -</i> <i>Alpha</i>	0,000	0,979	Ti <sub>1</sub>

**Tabel B.4** *Peak List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 600 °C

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
18,6679	0,7(4)	0,4036	4,74940	0,03
18,7148	0,4(2)	0,4036	4,74938	0,02
23,2015	-0,0011(3)	0,1000	3,83060	0,00
23,2601	-0,0005(1)	0,1000	3,83059	0,00
24,1264	47(11)	0,1436	3,68582	2,10
24,1873	24(6)	0,1436	3,68580	1,04
25,1228	-0,04(1)	0,1000	3,54183	0,00
25,1864	-0,021(6)	0,1000	3,54182	0,00
27,0520	26(6)	0,1000	3,29347	1,13
27,1206	13(3)	0,1000	3,29346	0,56
29,0541	202(43)	0,1436	3,07091	8,90
29,1280	100(21)	0,1436	3,07090	4,43
30,0929	-0,015(4)	0,1000	2,96723	0,00
30,1695	-0,007(2)	0,1000	2,96722	0,00
30,8622	424(99)	0,1436	2,89499	18,70
30,9409	211(51)	0,1436	2,89498	9,30
33,1092	-0,020(5)	0,1000	2,70348	0,00
33,1939	-0,010(3)	0,1000	2,70347	0,00
35,1218	16(3)	0,1000	2,55303	0,72
35,1228	-0,041(8)	0,1000	2,55296	0,00
35,1356	74(33)	0,4036	2,55206	3,28
35,1356	74(33)	0,4036	2,55206	3,28
35,2120	8(2)	0,1000	2,55303	0,36
35,2130	-0,021(4)	0,1000	2,55296	0,00
35,2258	37(17)	0,4036	2,55206	1,63
35,2258	37(17)	0,4036	2,55206	1,63
35,8064	-0,026(9)	0,1000	2,50577	0,00
35,8985	-0,013(4)	0,1000	2,50577	0,00

**Tabel B.4** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
36,6030	-0,0027(9)	0,1000	2,45305	0,00
36,6973	-0,0014(4)	0,1000	2,45304	0,00
37,3516	-0,008(3)	0,1000	2,40559	0,00
37,4479	-0,004(2)	0,1000	2,40558	0,00
37,7833	-0,08(1)	0,1000	2,37909	0,00
37,8808	-0,038(4)	0,1000	2,37908	0,00
37,8923	216(66)	0,4036	2,37249	9,51
37,9901	107(33)	0,4036	2,37249	4,73
38,2806	-0,0033(7)	0,1000	2,34931	0,00
38,3795	-0,0016(4)	0,1000	2,34931	0,00
38,4503	566(177)	0,1436	2,33933	24,99
38,5497	281(89)	0,1436	2,33933	12,42
38,6459	4(1)	0,1000	2,32795	0,17
38,7458	2(1)	0,1000	2,32794	0,09
38,9901	-0,0008(3)	0,1000	2,30818	0,00
39,0911	-0,0004(2)	0,1000	2,30817	0,00
39,0934	551(150)	0,1436	2,30232	24,33
39,1946	274(80)	0,1436	2,30232	12,09
40,0899	329(49)	0,4036	2,24736	14,51
40,0899	1146(172)	0,4036	2,24736	50,56
40,1918	2266(138)	0,1436	2,24189	100,00

**Tabel B.5** *Pattern List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 600 °C

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i>	<i>Displacement</i>	<i>Scale</i>	<i>Chemical</i>
	<i>Code</i>		<i>Name</i>	[°2Th.]	<i>Factor</i>	<i>Formula</i>
*	98-009-9784	18	<i>Titanium Oxide (2/1)</i>	0,000	0,116	O <sub>1</sub> Ti <sub>2</sub>
*	98-009-0863	10	<i>Titanium Tin Oxide (0.6/0.4/2)</i>	0,000	0,187	O <sub>2</sub> Sn <sub>0,4</sub> Ti <sub>0,6</sub>
*	98-009-3098	3	<i>Anatase</i>	0,000	0,161	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-015-1590	7	<i>Aluminium Oxide - Hp</i>	0,000	0,936	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
*	98-005-7151	2	<i>Tin Zirconium Oxide (3/5/0.92)</i>	0,000	0,054	O <sub>0,92</sub> Sn <sub>3</sub> Zr <sub>5</sub>

**Tabel B.6** *Peak List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-6 pada 650 °C

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM Left</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	[°2Th.]	[Å]	[%]
18,7741	1(1)	0,3485	4,72276	0,06
18,8212	0,6(3)	0,3485	4,72277	0,03
21,8222	0,3(4)	1,0465	4,06950	0,02
21,8771	0,1(2)	1,0465	4,06951	0,01
24,9688	8(11)	1,0465	3,56333	0,45
25,0318	4(5)	1,0465	3,56334	0,23
25,3398	-0,04(1)	0,1000	3,51200	0,00
25,4038	-0,021(6)	0,1000	3,51200	0,00
27,0167	51(10)	0,1000	3,29770	2,89
27,0851	26(6)	0,1000	3,29770	1,44
27,4238	143(24)	0,1000	3,24966	8,04

**Tabel B.6** (Lanjutan)

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM Left</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	[°2Th.]	[Å]	[%]
27,4932	71(14)	0,1000	3,24967	4,00
28,6789	12(16)	1,0465	3,11023	0,68
28,7516	6(8)	1,0465	3,11024	0,34
34,9466	34(6)	0,1000	2,56543	1,94
35,0362	17(3)	0,1000	2,56543	0,96
35,1228	116(42)	0,3485	2,55296	6,50
35,2128	57(20)	0,3485	2,55297	3,23
36,1075	68(14)	0,1000	2,48557	3,84
36,1693	65(80)	1,0465	2,48146	3,64
36,2003	34(7)	0,1000	2,48557	1,91
36,2016	13(24)	1,0465	2,47932	0,72
36,2623	32(40)	1,0465	2,48146	1,81
36,2946	6(12)	1,0465	2,47932	0,36
37,0040	-0,0028(9)	0,1000	2,42738	0,00
37,0992	-0,0014(5)	0,1000	2,42738	0,00
37,2613	21(25)	1,0465	2,41121	1,16
37,3572	10(14)	1,0465	2,41121	0,58
37,8564	-0,009(1)	0,1000	2,37466	0,00
37,9540	-0,0043(4)	0,1000	2,37466	0,00
38,1605	166(29)	0,3485	2,36229	9,33
38,5727	9(3)	0,1000	2,33219	0,49
38,6166	-0,003(1)	0,1000	2,32964	0,00
38,6723	4(2)	0,1000	2,33220	0,24
38,7163	-0,0016(6)	0,1000	2,32965	0,00
39,1660	10(4)	0,1000	2,29822	0,54
39,2673	5(2)	0,1000	2,29822	0,27
39,4178	2(3)	1,0465	2,28411	0,12
39,5198	1(2)	1,0465	2,28412	0,06

**Tabel B.6** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
40,0787	3,6(3)	0,1000	2,24796	0,20
40,1128	510(101)	0,3485	2,24613	28,69
40,1128	1779(353)	0,3485	2,24613	100,00
40,1825	1,8(2)	0,1000	2,24796	0,10
40,2168	254(54)	0,3485	2,24613	14,26
40,2168	884(188)	0,3485	2,24613	49,71
40,8928	12(25)	1,0465	2,20507	0,68
40,9989	6(12)	1,0465	2,20507	0,34

**Tabel B.7** *Pattern List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-6 pada 650 °C

<i>Visible</i>	<i>Ref. Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i> <i>Name</i>	<i>Displacement</i> [°2Th.]	<i>Scale</i> <i>Factor</i>	<i>Chemical</i> <i>Formula</i>
*	98-005-1932	28	<i>Rutile</i>	0,000	0,011	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-009-9784	19	<i>Titanium</i> <i>Oxide (2/1)</i>	0,000	0,037	O <sub>1</sub> Ti <sub>2</sub>
*	98-009-9784	19	<i>Titanium</i> <i>Oxide (2/1)</i>	0,000	0,037	O <sub>1</sub> Ti <sub>2</sub>
*	98-009-0864	11	<i>Titanium Tin</i> <i>Oxide</i> <i>(0.5/0.5/2)</i>	0,000	0,085	O <sub>2</sub> Sn <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.5</sub>
*	98-020-2243	7	<i>Anatase</i>	0,000	0,006	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-016-1061	9	<i>Aluminium</i> <i>Oxide</i>	0,000	0,025	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

**Tabel B.8** *Peak List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-8 pada 650 °C

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
11,9876	3(1)	0,1000	7,37684	0,14
12,0179	1,7(5)	0,1000	7,37664	0,07
18,6789	2(1)	0,2467	4,74664	0,06
18,7260	0,8(3)	0,2467	4,74656	0,03
20,9388	0,7(2)	0,1000	4,23915	0,03
20,9918	0,34(8)	0,1000	4,23908	0,01
22,0322	0,15(4)	0,1000	4,03120	0,01
22,0879	0,08(2)	0,1000	4,03114	0,00
24,2450	0,25(6)	0,1000	3,66805	0,01
24,3065	0,12(3)	0,1000	3,66800	0,01
24,9018	5(1)	0,1000	3,57277	0,19
24,9650	2(1)	0,1000	3,57272	0,09
26,0491	7(2)	0,1000	3,41796	0,27
26,1153	3(1)	0,1000	3,41791	0,14
26,8714	12(3)	0,1000	3,31520	0,50
26,9397	6(1)	0,1000	3,31516	0,25
27,3028	128(21)	0,1000	3,26379	5,30
27,3723	64(13)	0,1000	3,26375	2,64
28,5047	7(2)	0,1000	3,12884	0,28
28,5774	3(1)	0,1000	3,12880	0,14
30,8789	16(4)	0,1000	2,89347	0,65
30,9579	8(2)	0,1000	2,89343	0,33
32,3043	18(4)	0,1000	2,76898	0,75
32,3871	9(2)	0,1000	2,76895	0,38
33,2749	5(1)	0,1000	2,69040	0,22
33,3603	3(1)	0,1000	2,69037	0,11



**Tabel B.8** (Lanjutan)

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM Left</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	[°2Th.]	[Å]	[%]
34,8013	8(2)	0,1000	2,57580	0,33
34,8909	4(1)	0,1000	2,57578	0,17
35,1099	157(50)	0,2467	2,55387	6,51
35,1099	157(50)	0,2467	2,55387	6,51
35,2003	78(29)	0,2467	2,55385	3,24
35,2003	78(29)	0,2467	2,55385	3,24
35,9421	81(16)	0,1000	2,49662	3,37
35,9449	57(11)	0,1000	2,49643	2,38
36,0348	40(9)	0,1000	2,49660	1,68
36,0377	29(6)	0,1000	2,49641	1,18
36,0426	36(8)	0,1000	2,48989	1,51
36,1345	12(4)	0,1000	2,48377	0,49
36,1356	18(5)	0,1000	2,48986	0,75
36,2278	6(2)	0,1000	2,48375	0,24
36,7938	31(8)	0,1000	2,44076	1,28
36,8889	15(4)	0,1000	2,44074	0,64
36,8929	7(2)	0,1000	2,43443	0,30
36,9883	4(1)	0,1000	2,43441	0,15
37,6630	54(15)	0,1000	2,38640	2,23
37,7605	27(8)	0,1000	2,38638	1,11
38,0215	451(129)	0,2467	2,36473	18,72
38,1199	224(61)	0,2467	2,36471	9,30
38,3513	1,2(3)	0,1000	2,34515	0,05
38,4274	2(1)	0,1000	2,34068	0,08

**Tabel B.9** *Pattern List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-8 pada 650 °C

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i>	<i>Displacement</i>	<i>Scale</i>	<i>Chemical</i>
	<i>Code</i>		<i>Name</i>	[°2Th.]	<i>Factor</i>	<i>Formula</i>
*	98-001-6636	34	<i>Rutile</i>	0,000	0,027	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-009-9784	17	<i>Titanium</i> <i>Oxide (2/1)</i>	0,000	0,065	O <sub>1</sub> Ti <sub>2</sub>
*	98-016-1061	6	<i>Aluminium</i> <i>Oxide</i>	0,000	0,039	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
*	98-016-1061	6	<i>Aluminium</i> <i>Oxide</i>	0,000	0,039	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
*	98-009-0864	8	<i>Titanium Tin</i> <i>Oxide</i> <i>(0.5/0.5/2)</i>	0,000	0,144	O <sub>2</sub> Sn <sub>0,5</sub> Ti <sub>0,5</sub>
*	98-005-7151	9	<i>Tin</i> <i>Zirconium</i> <i>Oxide</i> <i>(3/5/0.92)</i>	0,000	0,043	O <sub>0,92</sub> Sn <sub>3</sub> Zr <sub>5</sub>

**Tabel B.10** *Peak List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 650 °C

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	<i>Left</i> [°2Th.]	[Å]	[%]
11,9017	5(5)	0,6124	7,42994	0,14
11,9317	2(3)	0,6124	7,42972	0,07
18,7068	90(21)	0,2212	4,73960	2,63
18,7541	45(10)	0,2212	4,73951	1,31
20,7998	1(1)	0,6124	4,26718	0,03
20,8524	0,5(4)	0,6124	4,26710	0,01
24,0859	0,3(3)	0,6124	3,69191	0,01
24,1471	0,2(2)	0,6124	3,69185	0,00

**Tabel B.10** (Lanjutan)

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	<i>Left</i> [°2Th.]	[Å]	[%]
25,7774	9,1(1)	0,0100	3,45336	0,26
25,8430	4,50(7)	0,0100	3,45331	0,13
26,1083	9(7)	0,6124	3,41034	0,27
26,1747	5(4)	0,6124	3,41029	0,13
27,0249	43(9)	0,1000	3,29672	1,27
27,0937	22(5)	0,1000	3,29667	0,63
27,4910	62(16)	0,1000	3,24187	1,82
27,5610	31(8)	0,1000	3,24183	0,91
28,6031	42(1)	0,0100	3,11830	1,24
28,6761	21,1(3)	0,0100	3,11826	0,62
31,4587	21(15)	0,6124	2,84145	0,62
31,5393	11(8)	0,6124	2,84141	0,31
32,0954	25(19)	0,6124	2,78652	0,74
32,1778	13(9)	0,6124	2,78648	0,37
32,4445	82(1)	0,0100	2,75733	2,39
32,5278	41(1)	0,0100	2,75730	1,19
33,7906	7(6)	0,6124	2,65050	0,21
33,8775	4(3)	0,6124	2,65047	0,10
34,7119	29(8)	0,1000	2,58224	0,86
34,8012	15(5)	0,1000	2,58221	0,43
35,0549	236(52)	0,2212	2,55775	6,91
35,1452	117(31)	0,2212	2,55772	3,44
35,5928	31(7)	0,1000	2,52032	0,90
35,6846	15(3)	0,1000	2,52029	0,45
35,9748	56(35)	0,6124	2,50062	1,65
36,5563	43(34)	0,6124	2,45607	1,27

**Tabel B.10** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM</i> <i>Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
36,6508	21(18)	0,6124	2,45604	0,63
38,0779	73(203)	0,6124	2,36136	2,14
38,0966	806(504)	0,2212	2,36024	23,58
38,1765	36(93)	0,6124	2,36133	1,07
38,1953	401(351)	0,2212	2,36021	11,72
38,6581	7(3)	0,1000	2,32724	0,21
38,7583	4(2)	0,1000	2,32722	0,11
39,2613	114(8)	0,0100	2,29286	3,34
39,3378	4(2)	0,1000	2,28858	0,13
39,3633	57(5)	0,0100	2,29284	1,66
39,4400	2(1)	0,1000	2,28856	0,06
39,9119	3,1(3)	0,1000	2,25697	0,09
40,0157	1,52(7)	0,1000	2,25695	0,04

**Tabel B.11** *Pattern List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 650 °C

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i> <i>Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i> <i>Name</i>	<i>Displacement</i> [°2Th.]	<i>Scale</i> <i>Factor</i>	<i>Chemical</i> <i>Formula</i>
*	98-016-1909	37	<i>Rutile</i>	0,000	0,020	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-002-4081	12	<i>Titanium</i> <i>Oxide (2/1)</i>	0,000	0,090	O <sub>1</sub> Ti <sub>2</sub>
*	98-005-7151	7	<i>Tin</i> <i>Zirconium</i> <i>Oxide</i> <i>(3/5/0.92)</i>	0,000	0,082	O <sub>0,92</sub> Sn <sub>3</sub> Zr <sub>5</sub>

**Tabel B.11 (Lanjutan)**

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i>	<i>Displacement</i>	<i>Scale</i>	<i>Chemical</i>
	<i>Code</i>		<i>Name</i>	[°2Th.]	<i>Factor</i>	<i>Formula</i>
*	98-015-1590	6	<i>Aluminium</i>	0,000	0,799	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
			<i>Oxide - Hp</i>			
*	98-005-7151	7	<i>Tin</i>	0,000	0,082	O <sub>0,92</sub> Sn <sub>3</sub>
			<i>Zirconium</i>			Zr <sub>5</sub>
			<i>Oxide</i>			
			(3/5/0.92)			
*	98-015-1590	6	<i>Aluminium</i>	0,000	0,799	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
			<i>Oxide - Hp</i>			
*	98-009-0864	7	<i>Titanium Tin</i>	0,000	0,099	O <sub>2</sub> Sn <sub>0,5</sub>
			<i>Oxide</i>			Ti <sub>0,5</sub>
			(0.5/0.5/2)			

**Tabel B.12 Peak List Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 700 °C**

<i>Pos.</i>	<i>Height</i>	<i>FWHM Left</i>	<i>d-spacing</i>	<i>Rel. Int.</i>
[°2Th.]	[cts]	[°2Th.]	[Å]	[%]
19,5886	5(1)	0,0882	4,52821	1,68
19,6377	3(1)	0,0882	4,52822	0,83
22,4654	1(1)	0,7156	3,95443	0,28
22,5219	0,5(5)	0,7156	3,95444	0,14
24,0725	28(29)	0,7156	3,69394	8,60
24,1332	14(14)	0,7156	3,69394	4,28
25,6727	325(315)	0,8854	3,46720	100,00
25,7376	161(155)	0,8854	3,46721	49,73
26,8183	2,3(4)	0,0882	3,32165	0,69
26,8861	1,1(2)	0,0882	3,32165	0,34

**Tabel B.12** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
27,1469	6(1)	0,0882	3,28217	1,77
24,1332	14(14)	0,7156	3,69394	4,28
27,2156	2,9(4)	0,0882	3,28218	0,88
27,3106	102(26)	0,2568	3,26287	31,44
27,3797	51(13)	0,2568	3,26288	15,64
27,4470	158(41)	0,2732	3,24696	48,81
27,5165	79(22)	0,2732	3,24697	24,27
28,4031	41(29)	0,7156	3,13980	12,72
28,4751	21(14)	0,7156	3,13981	6,33
31,7032	40(9)	0,0882	2,82010	12,34
31,7840	20(4)	0,0882	2,82010	6,14
34,7159	74(76)	0,7156	2,58195	22,76
34,8048	37(32)	0,7156	2,58195	11,32
35,0651	28(6)	0,0882	2,55703	8,67
35,1550	14(3)	0,0882	2,55703	4,31
35,4661	221(180)	0,7156	2,52903	68,21
35,5174	209(210)	0,8854	2,52550	64,50
35,5572	110(90)	0,7156	2,52903	33,91
35,6086	104(102)	0,8854	2,52550	32,07
35,9201	52(16)	0,2568	2,49810	16,03
36,0069	72(23)	0,2732	2,49228	22,17
36,0123	26(8)	0,2568	2,49811	7,97
36,0993	36(13)	0,2732	2,49229	11,03
36,6160	54(83)	0,8854	2,45221	16,76
36,7101	27(40)	0,8854	2,45221	8,33
36,8444	8(12)	0,7156	2,43752	2,55
36,6160	54(83)	0,8854	2,45221	16,76

**Tabel B.12** (Lanjutan)

<i>Pos.</i> [°2Th.]	<i>Height</i> [cts]	<i>FWHM Left</i> [°2Th.]	<i>d-spacing</i> [Å]	<i>Rel. Int.</i> [%]
36,7101	27(40)	0,8854	2,45221	8,33
36,8444	8(12)	0,7156	2,43752	2,55
36,9392	4(6)	0,7156	2,43753	1,27
37,7378	7(3)	0,0882	2,38185	2,12
37,8351	3(1)	0,0882	2,38185	1,05
38,4114	42(54)	0,7156	2,34162	13,08
38,5105	21(28)	0,7156	2,34162	6,50
38,8193	14(4)	0,0882	2,31794	4,36
38,9196	7(2)	0,0882	2,31794	2,17
38,9991	10(5)	0,2568	2,30767	2,98
39,0999	5(3)	0,2568	2,30767	1,48
39,1981	11(7)	0,2732	2,29641	3,24
39,2994	5(4)	0,2732	2,29642	1,61
39,7611	7(4)	0,0882	2,26518	2,15

**Tabel B.13** *Pattern List* Hasil XRD Setelah Siklus ke-10 pada 700 °C

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i> <i>Code</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i> <i>Name</i>	<i>Displacement</i> [°2Th.]	<i>Scale</i> <i>Factor</i>	<i>Chemical</i> <i>Formula</i>
*	98-003-3838	52	<i>Rutile</i>	0,000	0,074	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-015-4036	12	<i>Titanium</i> <i>Oxide - Hp</i>	0,000	0,061	O <sub>2</sub> Ti <sub>1</sub>
*	98-009-0864	7	<i>Titanium Tin</i> <i>Oxide</i> (0.5/0.5/2)	0,000	0,106	O <sub>2</sub> Sn <sub>0,5</sub> Ti <sub>0,5</sub>

**Tabel B.13 (Lanjutan)**

<i>Visible</i>	<i>Ref.</i>	<i>Score</i>	<i>Compound</i>	<i>Displaceme</i>	<i>Scale</i>	<i>Chemical</i>
	<i>Code</i>		<i>Name</i>	<i>nt [°2Th.]</i>	<i>Factor</i>	<i>Formula</i>
*	98-009-0860	35	<i>Titanium Tin</i>	0,000	0,054	O <sub>2</sub> Sn <sub>0,1</sub>
			<i>Oxide</i>			Ti <sub>0,9</sub>
			(0.9/0.1/2)			
*	98-016-1061	5	<i>Aluminium</i>	0,000	0,059	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
			<i>Oxide</i>			

3. Data Hasil Pengujian *Microhardness Vickers*

**Tabel B.14 Hasil Pengujian *Microhardness Vickers As-Cast***

<b>Pengujian <i>Microhardness Vickers</i></b>			<b>Pengujian <i>Microhardness Vickers</i></b>		
<b>Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn (<i>as-cast</i>)</b>			<b>Ti-6Al-4V (<i>as-cast</i>)</b>		
<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>HV</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>HV</b>
72,52	74,50	343,2	39,56	39,48	356,2
72,75	74,34	342,9	39,11	41,72	340,6
71,59	73,75	351,2	40,49	39,45	348,1
73,66	73,98	340,3	38,70	41,45	346,3
73,23	72,61	348,7	39,66	39,45	351,7
73,45	73,83	342,0	39,88	40,58	343,7
73,83	73,03	343,9	40,55	39,55	346,9
72,33	73,11	345,9	40,26	40,55	340,8
72,84	72,23	352,4	39,65	39,75	353,0
Rata-rata		345,6111	Rata-rata		347,4778



**Tabel B.15** Hasil Pengujian *Microhardness Vickers* pada 600 °C

Titik	Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn			Ti-6Al-4V
	Indentor	6 siklus	8 siklus	10 siklus
1		356,1	363,8	382,4
2		354,2	363,6	376,7
3		353,3	361,5	364,2
4		352,2	360,1	362,6
5		350,9	359,5	360,2
				352,1
				324,9
				321,1
				320,9
				311,9

**Tabel B.16** Hasil Pengujian *Microhardness Vickers* pada 650 °C

Titik	Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn			Ti-6Al-4V
	Indentor	6 siklus	8 siklus	10 siklus
1		363,4	376,7	390,3
2		354,8	370,8	388,9
3		353,6	370,3	375,6
4		351,3	369,3	368,1
5		349,4	363,7	364,2
				369,1
				339,4
				334,6
				326,2
				325,3

**Tabel B.17** Hasil Pengujian *Microhardness Vickers* pada 700 °C

Titik	Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn			Ti-6Al-4V
	Indentor	6 siklus	8 siklus	10 siklus
1		377,6	379,5	394,3
2		376,2	379,2	392,4
3		374,9	375,2	380,4
4		372,5	374,2	362,3
5		369,6	372,5	361,1
				374,8
				339,3
				330,1
				324,5
				317

4. Data Hasil Perilaku Oksidasi

**Tabel B.18** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 600 °C

<b>Temperatur 600 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b>ΔW (gr)</b>	<b>Weight Gain (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6705	0	0
1	0,6709	0,0004	0,0319
2	0,6713	0,0008	0,0637
3	0,6716	0,0011	0,0876
4	0,6717	0,0012	0,0955
5	0,6719	0,0014	0,1115
6	0,6721	0,0016	0,1274
7	0,6723	0,0018	0,1433
8	0,6725	0,002	0,1592
9	0,6729	0,0024	0,1911
10	0,6731	0,0026	0,2070

**Tabel B.19** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 650°C

<b>Temperatur 650 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b>ΔW (gr)</b>	<b>Weight Gain (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6747	0	0
1	0,6756	0,0009	0,0717
2	0,6761	0,0014	0,1115
3	0,6763	0,0016	0,1274
4	0,6767	0,002	0,1592
5	0,6769	0,0022	0,17516
6	0,6771	0,0024	0,1911
7	0,6773	0,0026	0,2070
8	0,6774	0,0027	0,2150
9	0,6778	0,0031	0,2468

**Tabel B.19** (Lanjutan)

<b>Temperatur 650 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
10	0,678	0,0033	0,2627

**Tabel B.20** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-5Nb-3Zr-1Sn pada 700°C

<b>Temperatur 700 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6782	0	0
1	0,6797	0,0015	0,1194
2	0,68	0,0018	0,1433
3	0,6804	0,0022	0,1752
4	0,681	0,0028	0,2229
5	0,6817	0,0035	0,2787
6	0,6821	0,0039	0,3105
7	0,6825	0,0043	0,3424
8	0,6831	0,0049	0,3901
9	0,6836	0,0054	0,4299
10	0,6839	0,0057	0,4538

**Tabel B. 21** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 600 °C

<b>Temperatur 600 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6150	0	0
1	0,6154	0,0004	0,0318
2	0,6156	0,0006	0,0478
3	0,6161	0,0011	0,0876
4	0,6164	0,0014	0,1115

**Tabel B.21** (Lanjutan)

<b>Temperatur 600 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
5	0,6167	0,0017	0,1354
6	0,6170	0,0020	0,1592
7	0,6173	0,0023	0,1831
8	0,6175	0,0025	0,1990
9	0,6177	0,0027	0,2150
10	0,6180	0,0030	0,2389

**Tabel B.22** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 650 °C

<b>Temperatur 650 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6644	0	0
1	0,6652	0,0008	0,0637
2	0,6657	0,0013	0,1035
3	0,6663	0,0019	0,1513
4	0,6667	0,0023	0,1831
5	0,6672	0,0028	0,2229
6	0,6679	0,0035	0,2787
7	0,6685	0,0041	0,3264
8	0,6688	0,0044	0,3503
9	0,669	0,0046	0,3662
10	0,6693	0,0049	0,3901

**Tabel B.23** Hasil Perilaku Oksidasi Siklik Ti-6Al-4V pada 700 °C

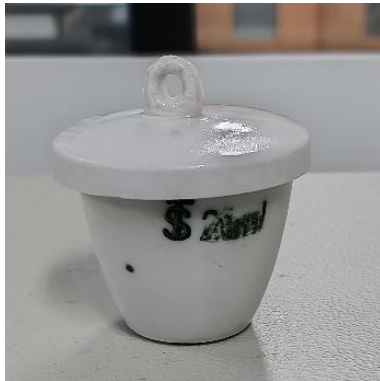
<b>Temperatur 700 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
0	0,6121	0	0

**Tabel B.23 (Lanjutan)**

<b>Temperatur 700 °C</b>			
<b>Siklus</b>	<b>W (gr)</b>	<b><math>\Delta W</math> (gr)</b>	<b><i>Weight Gain</i> (mg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	0,614	0,0019	0,1513
2	0,6143	0,0022	0,1752
3	0,6147	0,0026	0,2070
4	0,6153	0,0032	0,2548
5	0,6159	0,0038	0,3026
6	0,6165	0,0044	0,3503
7	0,6172	0,0051	0,4061
8	0,6179	0,0058	0,4618
9	0,6186	0,0065	0,5175
10	0,6191	0,007	0,5573

**LAMPIRAN C**  
**GAMBAR ALAT DAN BAHAN**

**Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan**



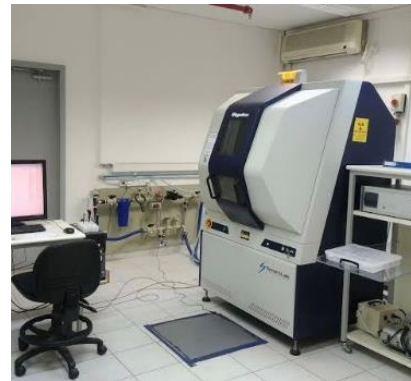
**Gambar C.1** Cawan krusibel



**Gambar C.2** Cetakan *mounting*



**Gambar C.3** *Dryer*



**Gambar C.4** *X-Ray Diffraction (XRD)*



**Gambar C.5** Gelas kimia



**Gambar C.6** Mesin bubut



**Gambar C.7** Mesin *grinding*



**Gambar C.8** Mesin *polishing*



**Gambar C.9** *Microhardness* Vickers



**Gambar C.10** Mikroskop optik



**Gambar C.11** Mistar



**Gambar C.12** *Muffle furnace*





**Gambar C.13** Neraca digital



**Gambar C.14** Pinset



**Gambar C.15** *Scanning Electron Microscopy (SEM-EDS)*



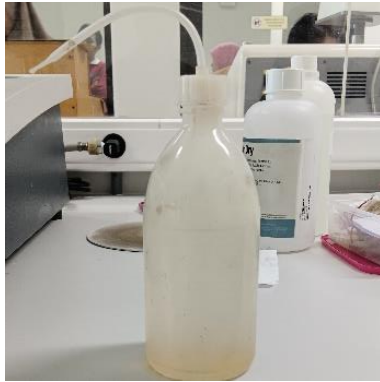
**Gambar C.16** Tang buaya



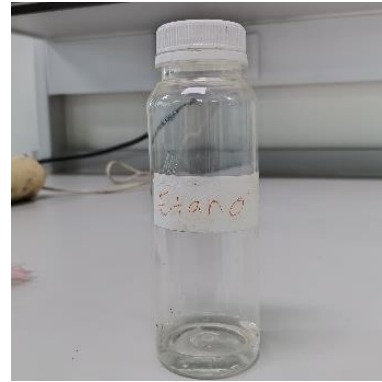
**Gambar C.17** *Vacuum Arc Remelting (VAR)*



**Gambar C.18** *Wire Cut Machine*



**Gambar C.19** Aquades



**Gambar C.20** Etanol



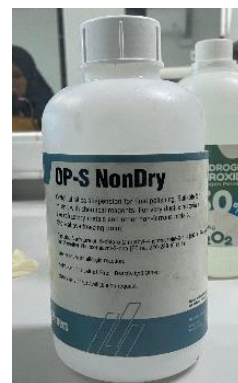
**Gambar C.21** Gas argon



**Gambar C.22** Kapas



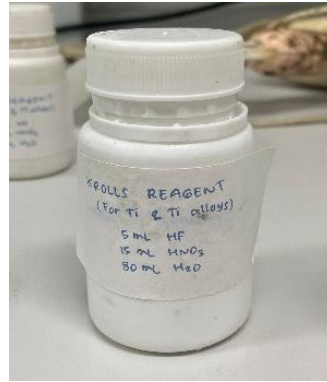
**Gambar C.23** Kertas ampelas



**Gambar C.24** Larutan *colloidal silica*



**Gambar C.25** Larutan hidrogen peroksida



**Gambar C.26** Larutan kroll



**Gambar C.27** Logam aluminium



**Gambar C.28** Logam niobium



**Gambar C.29** Logam timah



**Gambar C.30** Logam titanium



**Gambar C.31** Logam zirkonium



**Gambar C.32** Resin bening



**Gambar C.33** Sampel Ti-6Al-4V



**Gambar C.34** Sarung tangan latex