

**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


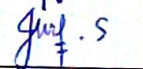
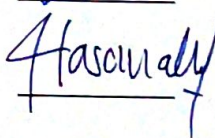
Susunan Dewan Penguji

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 Ti₂O, TiO₂, Al₂O₃, TiSnO₂, dan Sn₃Zr₅O. 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 α -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

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Titanium.....	10
2.2 Paduan Titanium.....	11
2.2.1 Fasa α	12
2.2.2 Fasa β	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
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN	72
LAMPIRAN B DATA PENELITIAN	79
LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN	101

DAFTAR TABEL

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

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

DAFTAR GAMBAR

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

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

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

Gambar C.21 Gas argon	105
Gambar C.22 Kapas	105
Gambar C.23 Kertas ampelas.....	105
Gambar C.24 Larutan <i>colloidal silica</i>	105
Gambar C.25 Larutan hidrogen peroksida	106
Gambar C.26 Larutan kroll	106
Gambar C.27 Logam aluminium.....	106
Gambar C.28 Logam niobium.....	106
Gambar C.29 Logam timah.....	106
Gambar C.30 Logam titanium.....	106
Gambar C.31 Logam zirkonium.....	107
Gambar C.32 Resin bening	107
Gambar C.33 Sampel Ti-6Al-4V.....	107
Gambar C.34 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 α 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*, *1st*, dan *2st* *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 (TiO_2) secara spontan ketika terpapar oksigen, menurut penelitian tentang adsorpsi *fibronectin* pada permukaan titanium oksida (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 Ti_2AlNb pada temperatur diatas $650\text{ }^\circ\text{C}$, 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 Ti_2AlNb . 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 TiNb_2O_7 atau fase 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 Al_2O_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 Ti_3Al 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 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.

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 β -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 TiO₂: A first-principles theoretical study of formaldehyde bonding on rutile TiO₂(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 Ti₂AlNb-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 2nd 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- yY₂O₃/5TiO₂ 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- α 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 Al₂O₃-ZrO₂-TiO₂ 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. Georgarakis, 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 SnO₂/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 α 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 TiO₂ photocatalysts,” *RSC Adv.*, vol. 6, no. 97, pp. 95232–95238, 2016, doi: 10.1039/c6ra19759k.