

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

SKRIPSI

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



Oleh:

Zaidan Ilhami
3334200101

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

2024

LEMBAR PENGESAHAN

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

SKRIPSI

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

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



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

NIP. 197406292003121001

Pembimbing II



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

NIP. 198907012014011001

LEMBAR PERSETUJUAN

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

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Zaidan Ilhami

3334200101

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

11 Oktober 2024

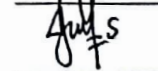
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

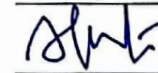
Penguji I : Prof. Alfirano, S.T., M.T., Ph.D.



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



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



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

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



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

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut :

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

Nama Mahasiswa : Zaidan Ilhami

NIM : 3334200101

Fakultas : Teknik

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

Cilegon, 23 Oktober 2024



Zaidan Ilhami

NIM.3334200101

ABSTRAK

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

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

KATA PENGANTAR

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

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

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

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

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

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

Cilegon, 23 Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

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

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

BAB III METODE PENELITIAN

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

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

BAB IV PEMBAHASAN

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

BAB V KESIMPULAN

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

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2 Rumusan Masalah

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

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

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut.

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

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

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

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

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

1.5 Manfaat Penelitian

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

1.6 Sistematika Penulisan

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

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

DAFTAR PUSTAKA

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

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

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

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

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

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

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

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