

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

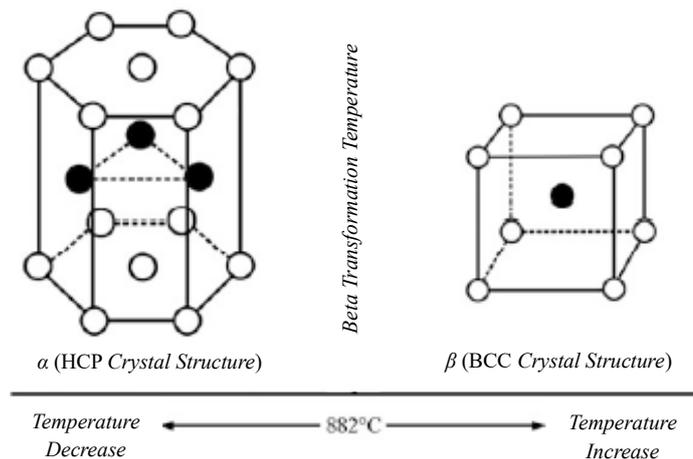
#### **2.1 Titanium**

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

##### **2.1.1 Titanium Murni**

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

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



**Gambar 2.1** Struktur Kristal Titanium [24].

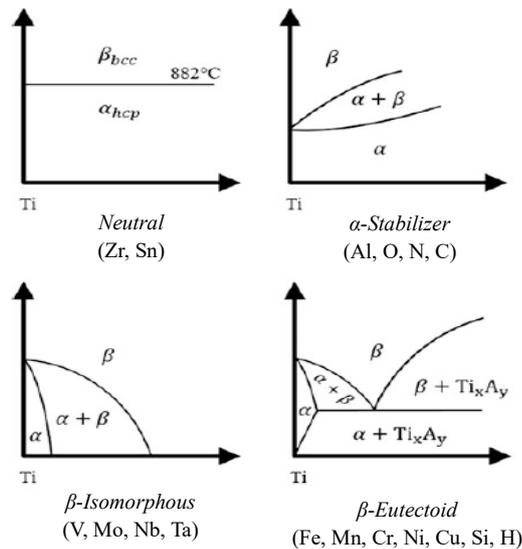
### 2.1.2 Titanium Paduan

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

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

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

## 2.2 Fasa Titanium



**Gambar 2.2** Pengaruh Unsur Paduan Pada Titanium [26].

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

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

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

### **2.2.1 *Alpha ( $\alpha$ ) Alloys***

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

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

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

### **2.2.2 Near-Alpha ( $\alpha$ ) Alloys**

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

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

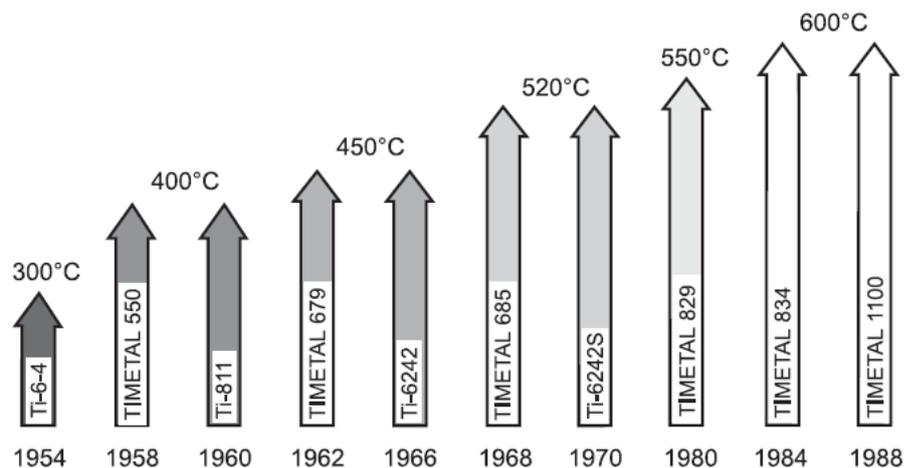
Paduan  $\alpha+\beta$  adalah penggabungan (amalgamasi) penstabil  $\alpha$  dan  $\beta$ , struktur mikronya merupakan kombinasi fase  $\alpha$  dan  $\beta$  dan bersifat metastabil [24]. Paduan titanium  $\alpha+\beta$  terbentuk saat fasa  $\alpha$  mengendap sebagai presipitat dalam fasa  $\beta$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

### 2.2.4 *Betha ( $\beta$ ) Alloys*

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

### 2.3 Titanium Temperatur Tinggi

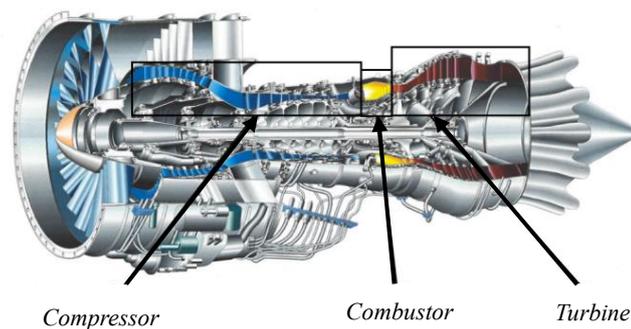
Industri kedirgantaraan telah menjadi salah satu pendorong terbesar pengembangan paduan titanium sejak tahun 1950an. Titanium temperatur tinggi mengacu pada kemampuan titanium dan paduannya untuk mempertahankan struktural dan performa mekaniknya pada temperatur tinggi. Sifat ini mencakup kekuatan mekanik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



**Gambar 2.3** Peningkatan Temperatur Titanium Paduan [32].

## 2.4 *Turbine Jet Engine*

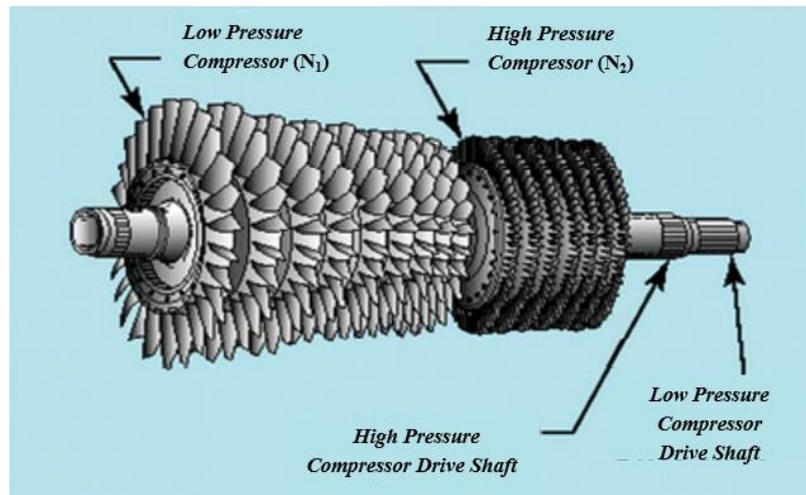
Aplikasi mesin turbin gas mencakup berbagai industri, termasuk pembangkit listrik, minyak dan gas, serta industri dirgantara. Dalam industri dirgantara, mesin turbin gas (mesin pesawat terbang modern) merupakan mesin pembakaran dalam yang terdiri dari lima bagian utama yaitu *fan* (kipas), kompresor,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



**Gambar 2.4** Mesin Turbin Jet [34].

### 2.4.1 Compressor

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



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

## 2.5 Oksidasi

Salah satu faktor keberhasilan paduan logam dalam aplikasi yang memerlukan temperatur tinggi ini ialah paduan harus memiliki ketahanan oksidasi saat terpapar pada temperatur tinggi. Dalam sebagian besar kondisi lingkungan, logam umumnya tidak stabil secara termodinamika [36]. Ketidakstabilan ini mungkin tidak signifikan pada temperatur kamar karena reaksi berlangsung dengan lambat, namun menjadi lebih berpengaruh pada temperatur tinggi. Pemahaman terhadap alasan proses oksidasi, produk reaksinya, serta kinetika dan mekanisme oksidasi sangatlah penting. Ketahanan oksidasi disini merujuk pada kemampuan titanium paduan untuk tetap mempertahankan keutuhan strukturalnya ketika terpapar oksigen pada temperatur tinggi. Proses oksidasi dapat dianggap sebagai bentuk khusus degradasi yaitu korosi pada logam dan paduan yang terjadi ketika terpapar udara atau lingkungan pengoksidasi lainnya, seperti  $\text{SO}_2$  dan  $\text{CO}_2$ .

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

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

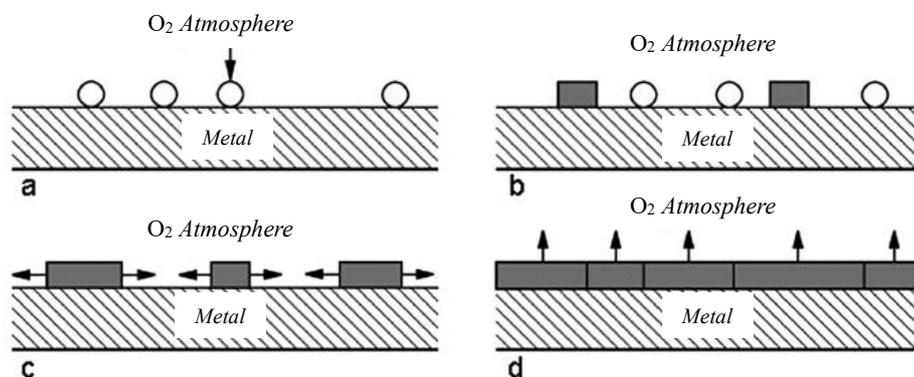
<i>Properties</i>	<i>Class Of Titanium Alloys</i>		
	$\alpha$	$\alpha+\beta$	$\beta$
<i>Density</i>	+	+	-
<i>Strength</i>	-	+	++
<i>Ductility</i>	- /+	+	+/-
<i>Fracture Toughness</i>	+	-/+	+/-
<i>Creep Resistance</i>	+	+/-	-
<i>Corrosion Resistance</i>	++	+	+/-
<i>Oxidation Resistance</i>	++	+/-	-
<i>Weldability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

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

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

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

Pada titanium murni, dalam atmosfer yang oksidatif pada temperatur yang rendah, lapisan oksida  $\text{TiO}_2$  padat yang terbentuk oleh reaksi antara titanium dan oksigen dapat sepenuhnya menutupi permukaan logam, mengisolasi logam dari lingkungan gas. Namun, pada temperatur tinggi lapisan oksida  $\text{TiO}_2$  yang padat tadi dapat menjadi longgar dan berpori. Aktivitas dan kecepatan difusi oksigen menjadi kuat. Atom oksigen dapat masuk ke dalam substrat, sementara atom titanium berdifusi ke permukaan dari dalam dan retakan pada skala oksida. Ini mengakibatkan peningkatan ketebalan lapisan oksida dan melemahnya ikatan antara lapisan oksida dan substrat. Pertambahan massa terus meningkat seiring dengan peningkatan temperatur [2].



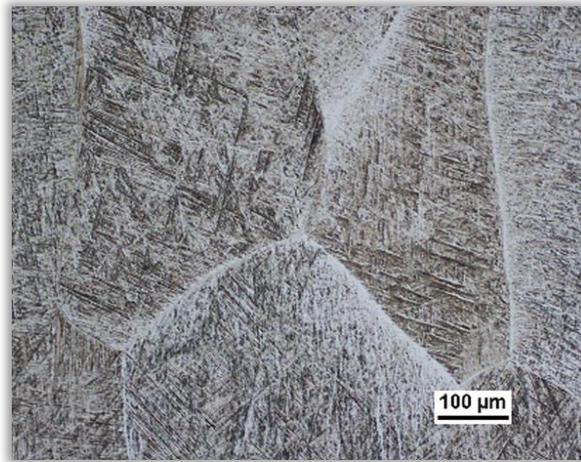
**Gambar 2.6** Skematik Proses Oksidasi Titanium [37].

Untuk paduan titanium konvensional, unsur penyusun utamanya adalah Ti dan Al. Dengan meningkatnya kandungan Al, keuletan dan kapasitas deformasi paduan titanium menurun. Oleh karena itu, kandungan Al dibatasi hanya 6% berat pada paduan titanium konvensional. Aktivitas aluminium yang rendah dan aktivitas titanium yang tinggi menghalangi oksidasi selektif Al untuk membentuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Pada temperatur tinggi, produk oksidasi utama paduan titanium adalah  $\text{TiO}_2$ . Temperatur aplikasi maksimum dibatasi oleh ketahanan oksidasi yang buruk dari struktur skala oksida paduan titanium ini.

## 2.6 Pengaruh *Solution Treatment* Terhadap Struktur Mikro

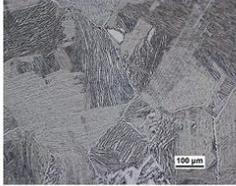
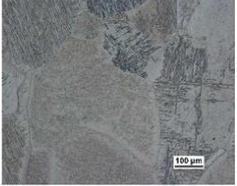
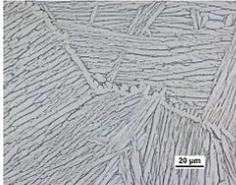
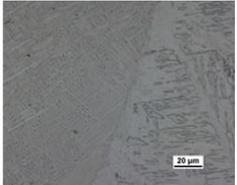
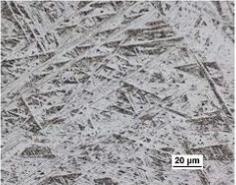
*Solution treatment* adalah proses perlakuan panas yang digunakan untuk melarutkan fasa dibawahnya dalam matriks logam dengan memanaskan material hingga temperatur tertentu dan kemudian mendinginkannya dengan cepat (*quenching*). Pada saat perlakuan panas *solution treatment*, fasa  $\alpha$  berubah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



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

## **2.7 Pengaruh *Solution Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan**

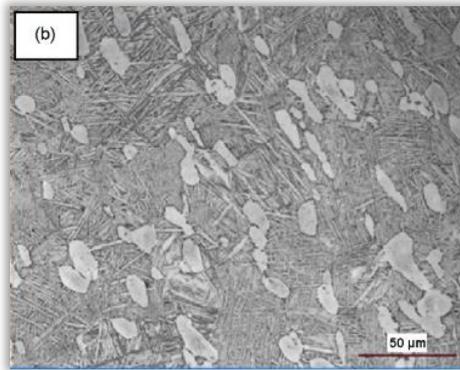
*Solution treatment* merupakan salah satu perlakuan panas yang dikenal mampu mempengaruhi sifat kekerasan pada material. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa proses *solution treatment* dapat meningkatkan kekerasan material secara signifikan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Galarraga tahun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

	1100°C/30min + furnace-cooling	1100°C/30min + air-cooling	1100°C/30min + water-cooling
100x			
500x			
Properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UTS=913 MPa (±38 MPa)</li> <li>• YS=774 MPa (±112 MPa)</li> <li>• el=13% (±2 %)</li> <li>• 378 HV (±44 HV)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UTS=998 MPa (±52 MPa)</li> <li>• YS=847 MPa (±90 MPa)</li> <li>• el=13% (±7%)</li> <li>• 365 HV (±31 HV)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UTS=1200 MPa (±50 MPa)</li> <li>• YS=932 MPa (±80 MPa)</li> <li>• el=1.8% (±1.5%)</li> <li>• 414 HV (±33 HV)</li> </ul>

**Gambar 2.8** Perbedaan Nilai Kekerasan Setiap Sampel [39]

## 2.8 Pengaruh *Aging Treatment* Terhadap Struktur Mikro

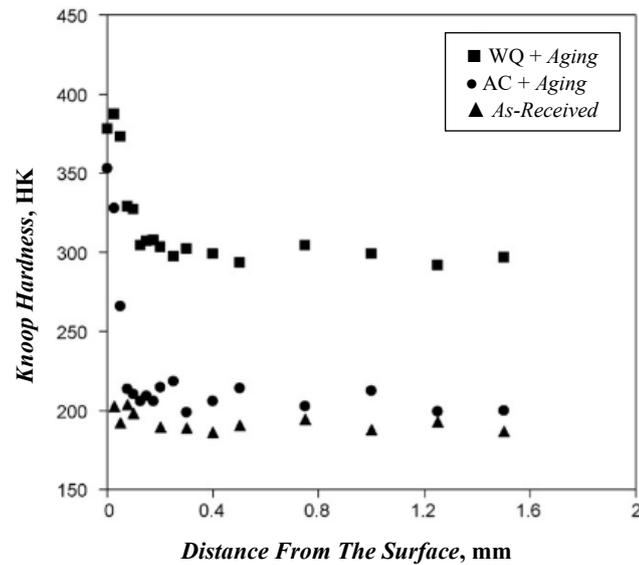
*Aging treatment* adalah proses perlakuan panas yang dilakukan setelah *solution treatment*. Perlakuan ini dimana sampel dipanaskan pada temperatur yang lebih rendah (di bawah  $T_{\beta}$ ) dalam waktu tertentu dan akan terjadi pengendapan (presipitasi) fasa sekunder dari larutan padat. *Aging treatment*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



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

## 2.9 Pengaruh *Aging Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan

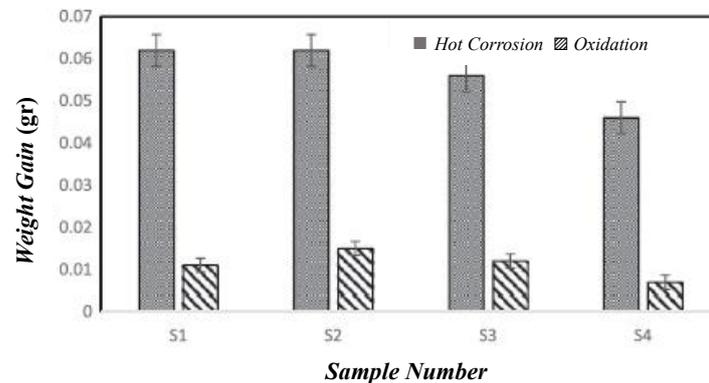
*Aging treatment* merupakan salah satu perlakuan panas yang juga dikenal mampu mempengaruhi sifat kekerasan pada material. Banyak penelitian telah menunjukkan bahwa proses *aging treatment* setelah *solution treatment* dapat meningkatkan kekerasan material secara signifikan. Dalam penelitian yang dilakukan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



**Gambar 2.10** Nilai Kekerasan Dengan Perbedaan Perlakuan Panas [41]

## 2.10 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi

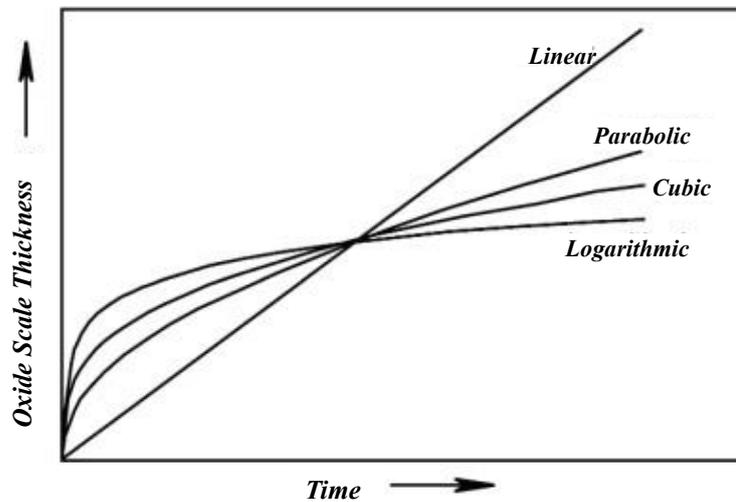
Oksidasi adalah proses di mana material dapat bereaksi dengan unsur oksigen untuk membentuk lapisan oksida. Proses ini dapat mempengaruhi sifat mekanis dan penampilan material tentunya. Oksidasi dapat mengurangi ketahanan material seperti korosi, keausan dan juga kegetasan yang berlebih (membuat material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



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

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

## 2.11 Laju dan Kinetika Oksidasi



**Gambar 2.12** Variasi laju reaksi oksidasi [42].

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

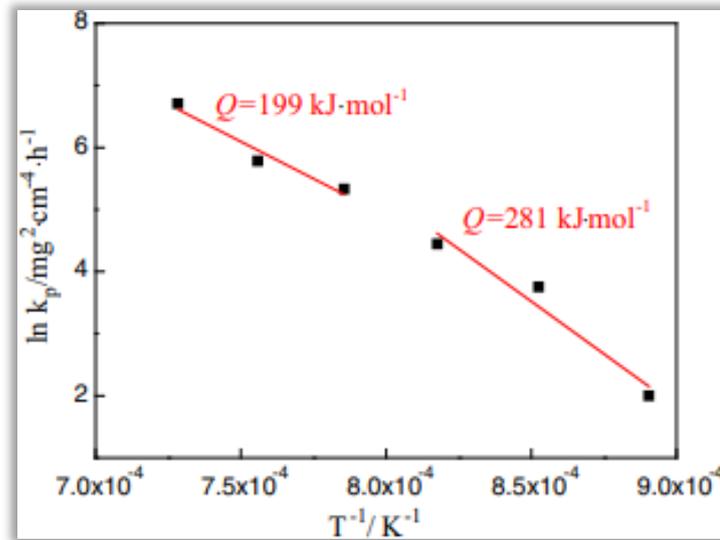
$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p \cdot t \dots\dots\dots(2.1)$$

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

Adapun keterangannya yaitu  $\Delta W$  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 Dong et.al, pada dalam penelitiannya menyatakan bahwa kinetika oksidasi dari paduan Ti-6Al-4V diperkirakan mengikuti persamaan parabola [44]. Selain itu, nilai energi aktivasi oksidasi dibawah dan diatas yang didapatkan dari paduan Ti-6Al-4V yang diberikan perilaku oksidasi dengan temperatur tinggi (850 °C dan 1100 °C) sebesar 281 dan 199 kJ/mol.

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

<b>Temperatur (°C)</b>	1100	1050	1000	950	900	850
<b>n</b>	1,7	2,2	1,8	1,5	1,1	1,7
<b><math>K_p</math> (<math>mg^2/cm^4.h</math>)</b>	816	324	206	85	43	7



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

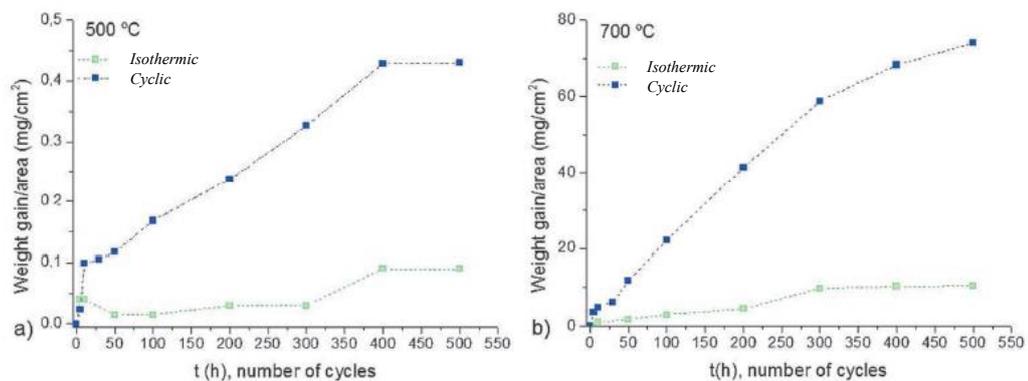
## 2.12 Ti-6Al-4V

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

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

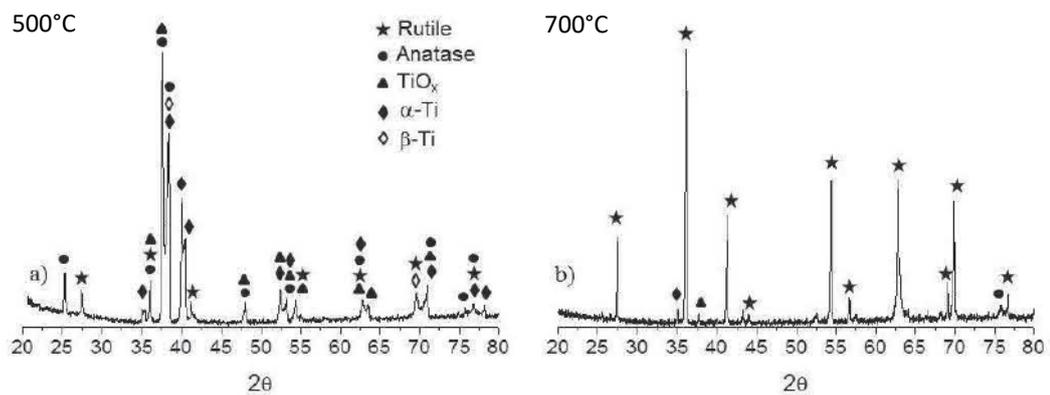
Keterbatasan temperatur ini berkaitan erat dengan oksidasi nyata ketika paduan titanium terpapar pada temperatur tinggi di lingkungan yang mengandung oksigen [9].

Oksidasi berlangsung sebagai dua reaksi secara bersamaan yang melibatkan yaitu pembentukan lapisan oksida  $\text{TiO}_2$  yang tipis (5-10 nm) pada permukaan dan difusi oksigen ke dalam logam utama. Lapisan yang diperkaya oksigen biasanya disebut sebagai *alpha-case*. *Alpha-case* berasal dari oksigen yang mengendap dalam logam, oksigen adalah elemen penstabil  $\alpha$  yang kuat dan kandungannya yang tinggi dalam titanium dan paduannya mendorong peningkatan temperatur  $\beta$ -transus [9]. Dalam jurnal Fargas *et al.*, 2017, melakukan percobaan uji oksidasi siklik dengan sampel Ti-6Al-4V. Uji oksidasi siklik dilakukan pada dua temperatur yaitu  $500^\circ\text{C}$  dan  $700^\circ\text{C}$ . Selain itu, uji oksidasi siklik juga dilakukan dengan satu siklus selama 1 jam dan 15 menit pendinginan temperatur kamar. Jumlah siklusnya adalah 5, 10, 50, 100, 200, 300, 400 dan 500. Gambar 2.14 berikut adalah hasil dari uji oksidasinya.



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

Pada temperatur 500°C pertambahan berat maksimum per area kurang dari 0,5 mg/cm<sup>2</sup>, sedangkan pada temperatur 700°C mencapai hampir 80 mg/cm<sup>2</sup>. Seperti pada jurnal, untuk kedua temperatur, perlakuan siklik menyebabkan peningkatan pertambahan berat yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan isothermal. Perbedaan lebih nyata dapat terlihat untuk sampel yang terkena temperatur 700 °C dibandingkan 500°C [9]. Dapat dikatakan bahwa, semakin tinggi temperatur uji maka semakin banyak juga pertambahan berat oksida yang akan terbentuk nantinya.



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

Dari hasil uji oksidasi juga dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan diantara temperatur 500°C dan 700°C. Pada temperatur 500°C terdapat lima fasa atau bentuk kimia yang dapat terbentuk yaitu TiO<sub>2</sub> dalam bentuk *rutile* dan *anatase*, TiO<sub>x</sub>, α-Ti, dan β-Ti. Keberadaan fase α dan β-Ti disebabkan oleh penetrasi sinar-X melalui skala oksida (<5 μm) ke dalam substrat paduan. Fasa tertinggi (terbanyak) pada 500°C yaitu TiO<sub>2</sub> dalam bentuk *anatase* dan TiO<sub>x</sub>. Sedangkan pada 700°C hanya

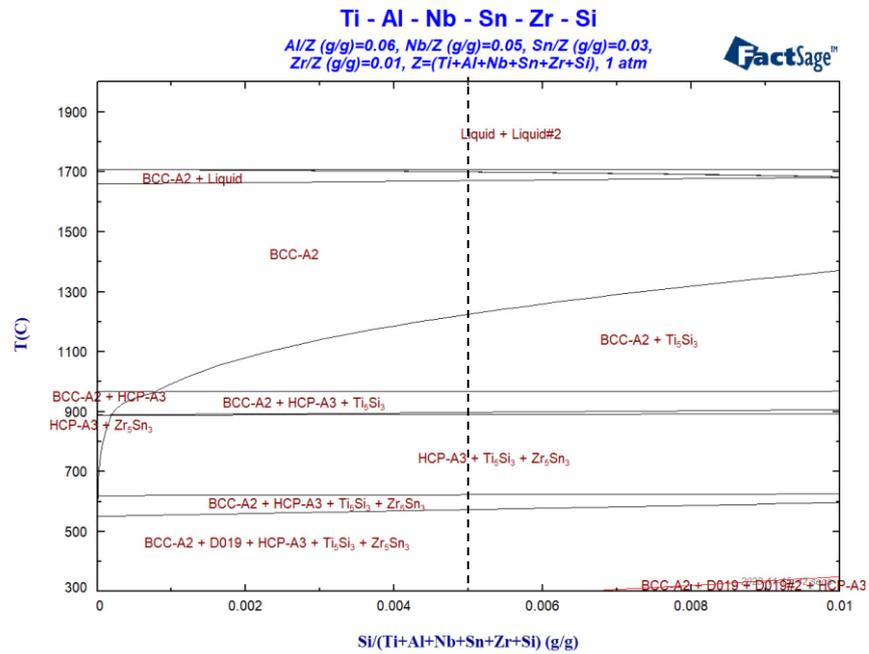
terdapat tiga fasa saja yaitu  $\text{TiO}_2$  dalam bentuk *rutile*,  $\text{TiO}_x$ , dan  $\alpha\text{-Ti}$ . Fasa tertinggi (terbanyak) pada  $700^\circ\text{C}$  yaitu  $\text{TiO}_2$  dalam bentuk *rutile* [9].

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

Skripsi ini bertujuan untuk menginvestigasi potensi paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si sebagai material yang memiliki ketahanan oksidasi tinggi pada temperatur tinggi. Dengan mempertimbangkan kombinasi unsur paduan seperti Al, Nb, Sn, Zr, dan Si. Unsur Al dapat membentuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Lapisan ini secara efektif dapat menghambat difusi Ti dan oksigen secara signifikan meningkatkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi dari paduan titanium dan titanium aluminida. Unsur Nb dapat menyerap atom O untuk menahan difusi internal atom O. Unsur Sn berpengaruh terhadap penguatan lapisan TiN dan  $\text{Ti}_2\text{AlN}$ . Sejumlah kecil unsur Zr dapat menghaluskan partikel oksida karena mendorong nukleasi butir oksida, yang dapat menghambat difusi oksigen pada paduan titanium. Unsur Si dapat lebih memurnikan  $\text{TiO}_2$  untuk terbentuk dan meningkatkan rasio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [2].

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

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



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