

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data Komposisi Hasil Pengecoran

Penelitian kali ini menggunakan material yang dihasilkan dari proses pengecoran khusus dengan menggunakan alat *Vacuum Arc Remelting* (VAR) *Furnace*. *Furnace* ini dipilih karena prosesnya dapat dilakukan dalam lingkungan yang hampa udara (vakum). Dimana nantinya akan dihembuskan gas argon yang membantu menghindari kontaminasi dari oksigen (O₂) dan nitrogen (N₂) yang dapat terlarut dalam logam pada saat dilakukannya pengecoran. Proses pengecoran ini menggunakan *raw material* berupa *shot* titanium dan titanium *block*, *shot* aluminium, niobium *wire*, timah *block*, zirkonium, dan silikon.

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

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

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

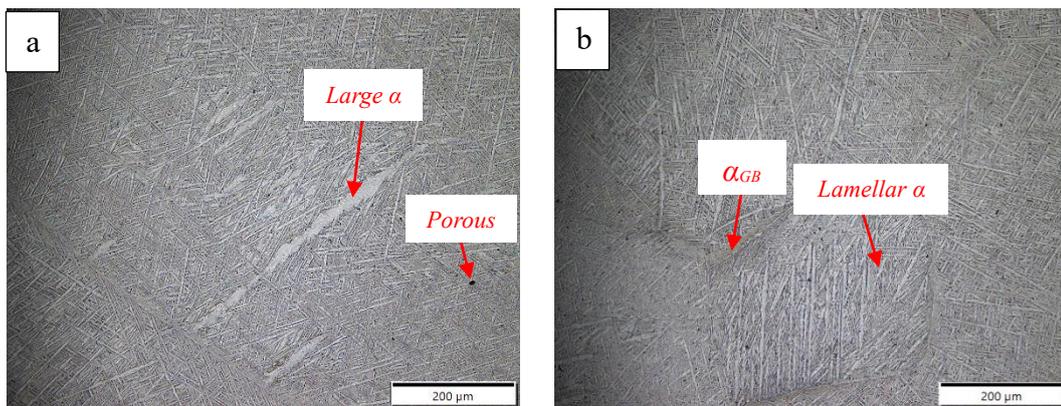
Pengujian EDS dilakukan sebanyak 4 kali karakterisasi dengan perbedaan pengambilan titik pada sampel dan perhitungan dilakukan dengan merata-ratakan pada semua titik tersebut. Didapatkan data kandungan unsur-unsur yang terdapat pada tabel 4.1 diatas. Dari hasil didapatkan bahwa terdapat beberapa kesalahan,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

4.2 Pengamatan Struktur Mikro

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

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

4.2.1 Pengamatan Struktur Mikro Hasil *As-Cast*



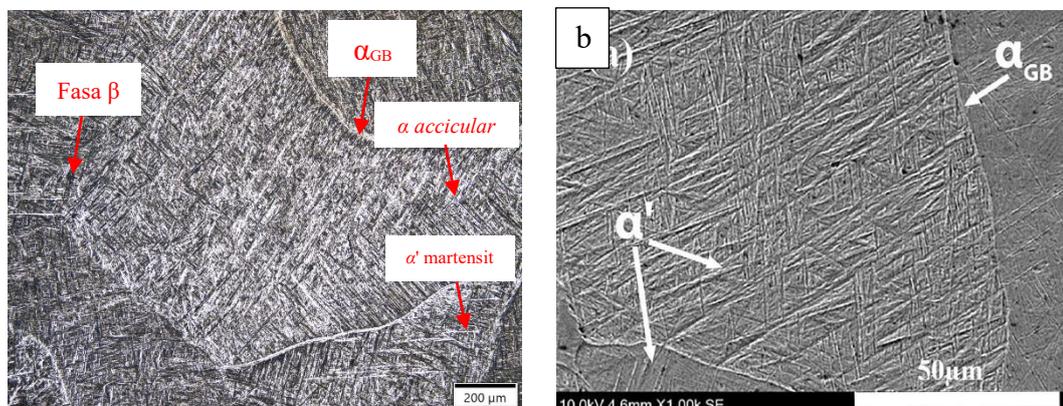
Gambar 4.1 Struktur Mikro *As-Cast* Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

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

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

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

4.2.2 Pengamatan Struktur Mikro Hasil Perlakuan Panas

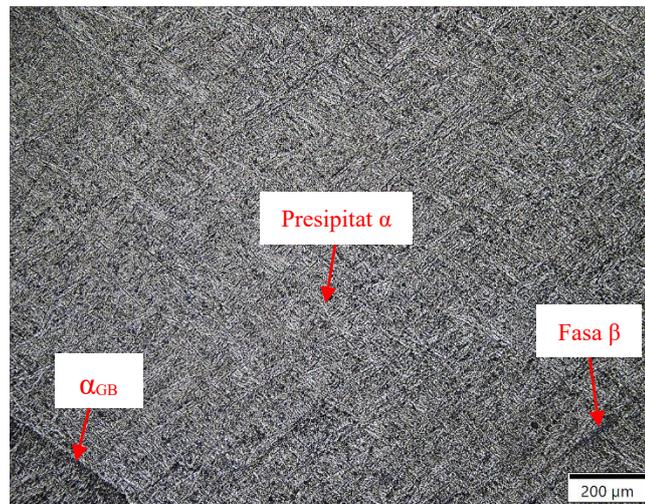


Gambar 4.2 Struktur Mikro Paduan : a) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *Solution Treatment* , b) Ti-6Al-4V *Solution Treatment* [50].

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

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

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



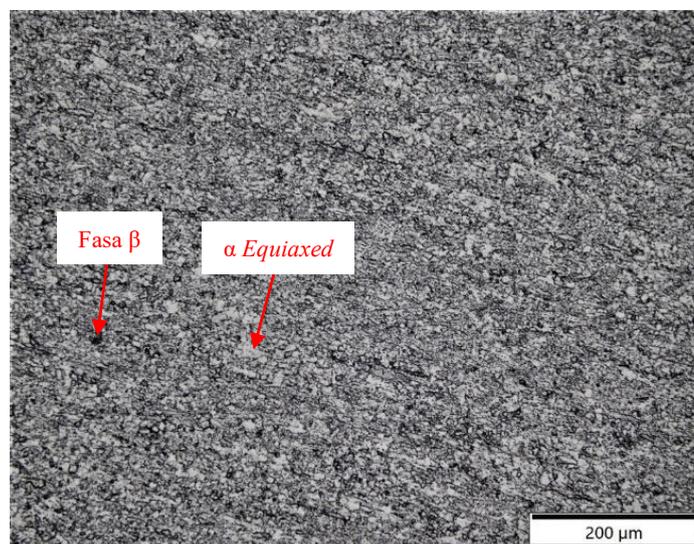
Gambar 4.3 Struktur Mikro Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *Aging Treatment*

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

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

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

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



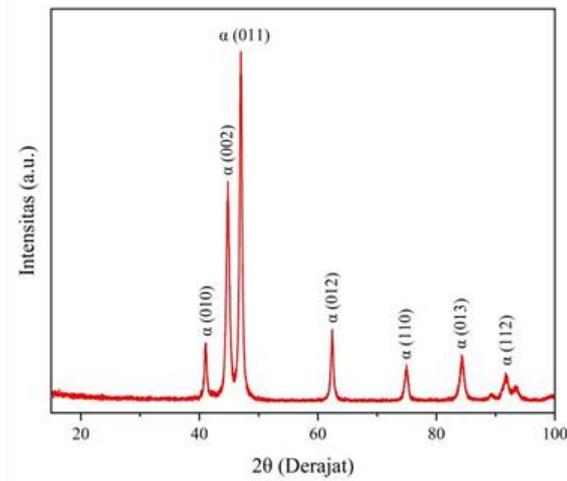
Gambar 4.4 Struktur Mikro *As-Cast* Paduan Ti-6Al-4V

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

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

4.3 Hasil Pengujian XRD Sebelum Perlakuan Oksidasi

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

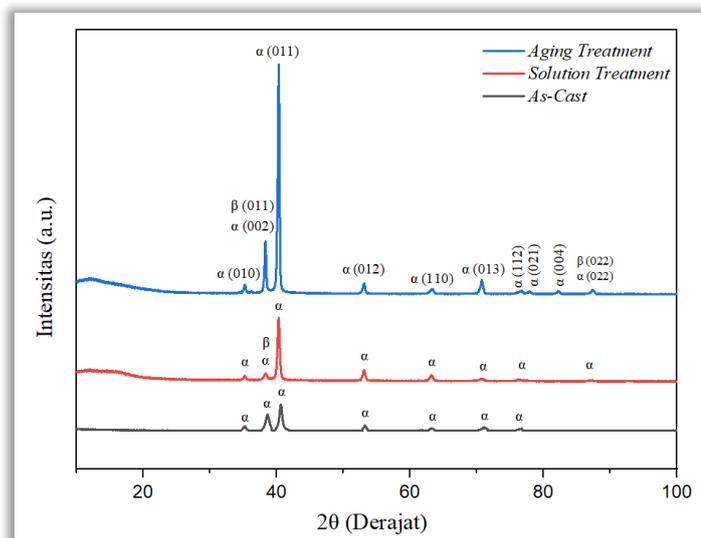


Gambar 4.5 Data XRD Sampel *As-Cast* Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si

Tabel 4.2 Hasil Analisis XRD Parameter Kisi Paduan

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

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

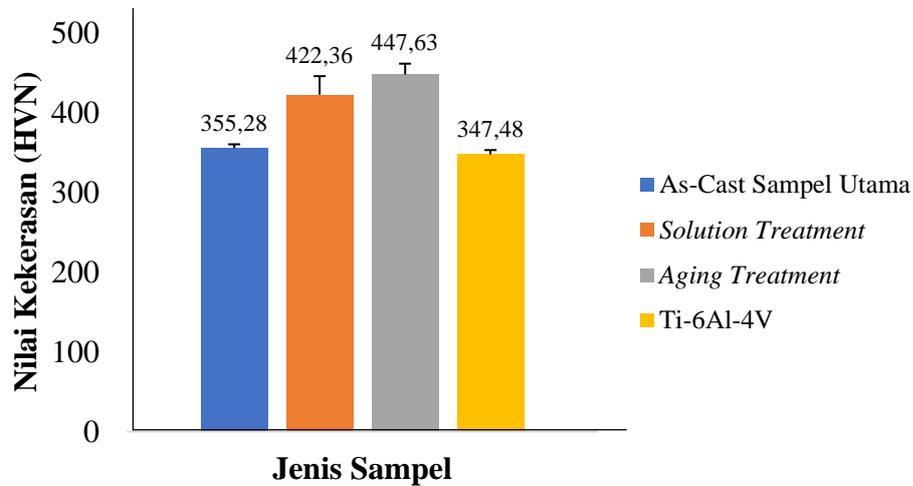


Gambar 4.6 Hasil Analisis XRD Dengan Perbedaan Sampel

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

4.4 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik

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



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

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

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

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

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

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

4.5 Hasil Perlakuan Oksidasi Temperatur Tinggi

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

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

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

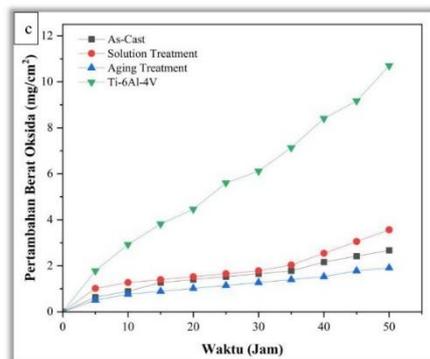
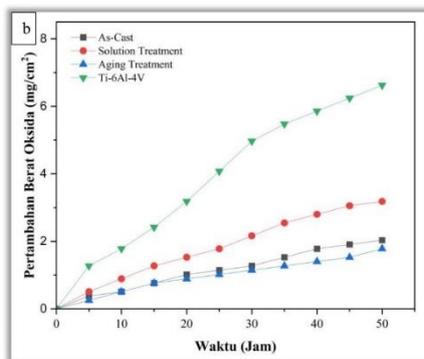
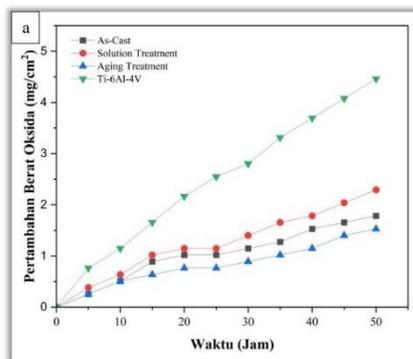
$$\ln\left(\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n\right) = \ln(K_p \cdot t)$$

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

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

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

4.5.1 Hasil Kinetika Oksidasi



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

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

Paduan Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dibandingkan dengan Ti-6Al-4V dikarenakan perbedaan kadungan unsur yang pada paduannya. Perbedaan unsur tersebut ialah unsur Nb, Sn, Zr, dan Si dalam paduan yang berperan dalam pembentukan lapisan oksida yang lebih stabil dan tahan terhadap difusi oksigen. Unsur Nb cenderung membentuk senyawa intermetalik dengan unsur-unsur lain. Unsur Nb dapat mendukung pertumbuhan lapisan oksida TiO₂ khususnya adalah TiO₂ jenis rutil [61]. Disamping itu juga, penambahan unsur Nb dapat juga dapat mendorong difusi unsur Al ke permukaan dan dapat meningkatkan aktivitas Al dan menurunkan aktivitas unsur Ti secara signifikan. Secara tidak langsung unsur Nb dapat membentuk lapisan oksida Al₂O₃ yang kontinu dan sangat padat pada permukaan paduan titanium [62]. Dengan kata lain, unsur Nb dapat menurunkan kecepatan difusi ion oksigen.

Unsur Sn diketahui dapat mempercepat atau mendorong pertumbuhan lapisan oksida TiO₂ dan juga lapisan oksida Al₂O₃ [63]. Lapisan oksida tersebutlah yang menyebabkan paduan lebih tahan dari oksidasi. Lalu, unsur Zr sendiri dapat membentuk lapisan ZrO₂. Bahkan dalam penelitian Matsunaga [64] menyebutkan bahwa unsur Zr dapat meningkatkan ketahanan oksidasi paduan *near-α* titanium lebih efektif daripada Nb, dikarenakan penambahan unsur Zr dapat menurunkan juga laju pertumbuhan TiO₂ yang berlebih. Unsur Si diketahui juga dapat mendorong difusi Al juga ke permukaan untuk membentuk lapisan oksidasi Al₂O₃.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

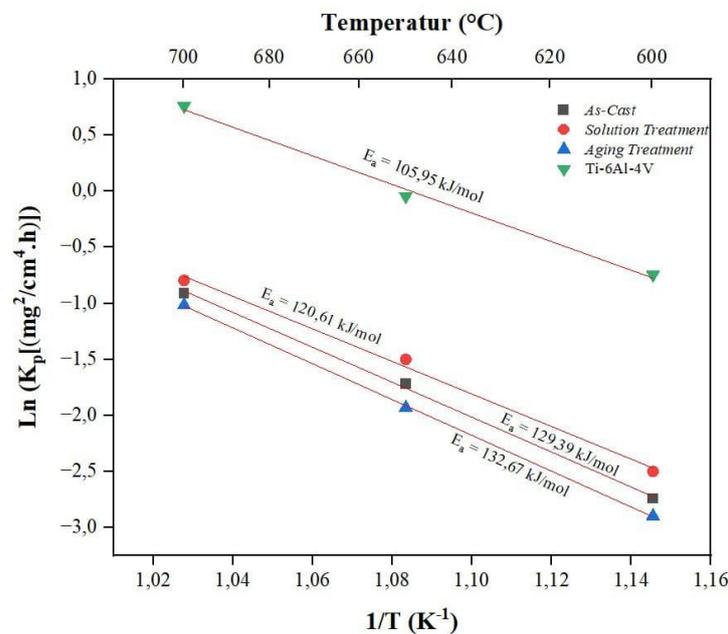
$$\ln(K_p) = \ln\left(t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right)$$

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

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

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

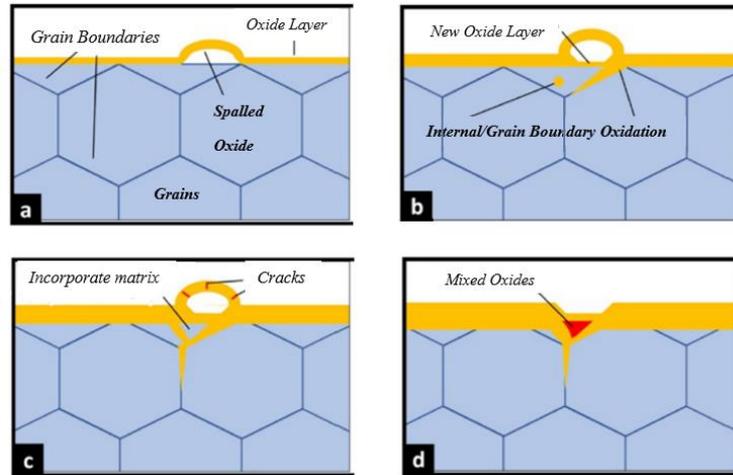
Persamaan 4.2 didapatkan dengan melinearisasikan persamaan 2.2 antara logaritma natural konstanta laju oksidasi ($\ln K_p$) dengan *invers* temperatur ($1/T$). Kemiringan garis dalam grafik tersebut adalah $-\frac{Q}{R}$, yang berhubungan dengan energi aktivasi (E_a). Gambar 4.9 menunjukkan kesesuaian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



Gambar 4.9 Plot Arrhenius Oksidasi

4.5.2 Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Oksidasi

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



Gambar 4.10 Mekanisme Oksidasi Pada Batas Butir [67].

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

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

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

4.5.3 Pengamatan Visual Hasil Pengujian Oksidasi





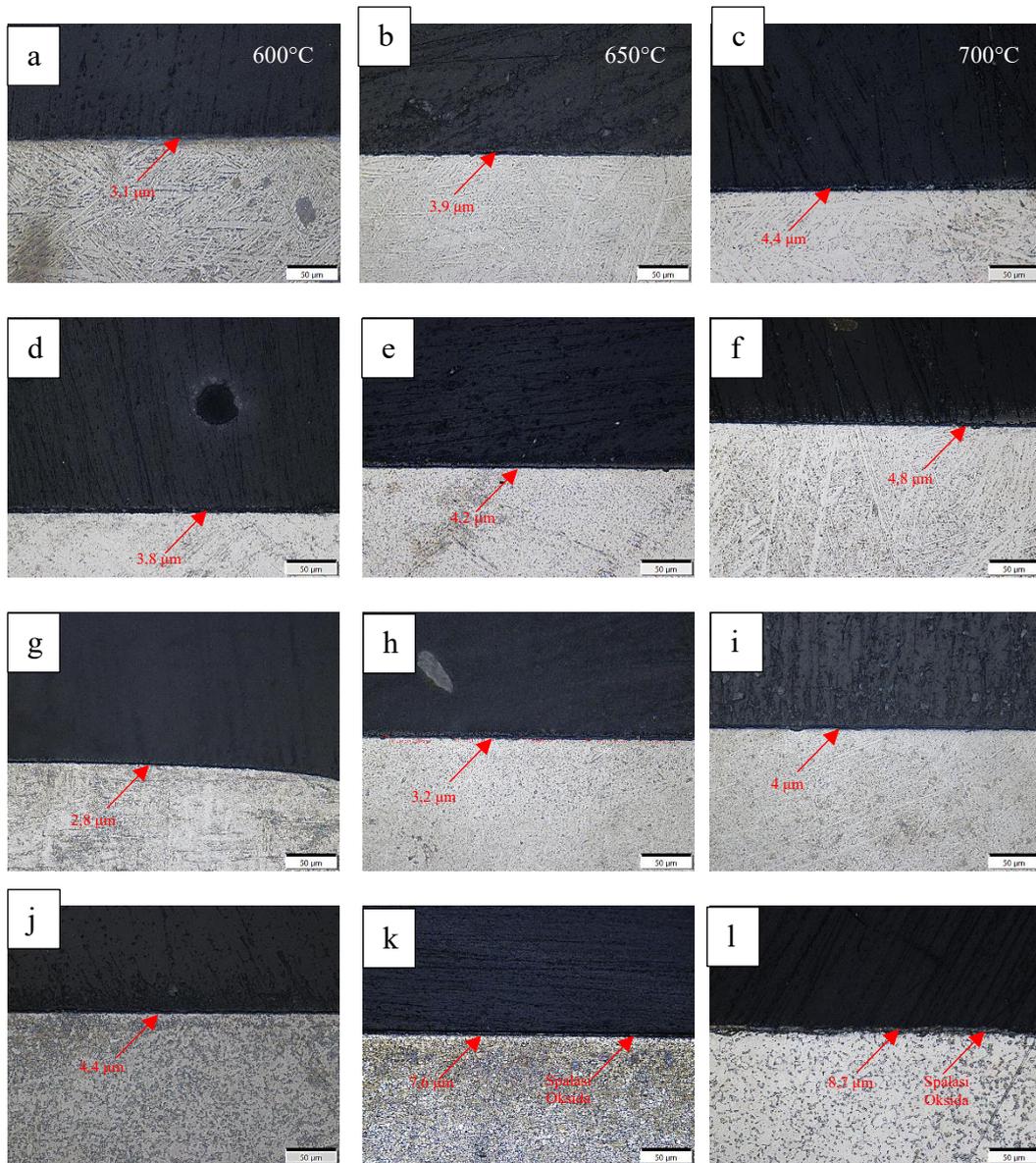
Gambar 4.11 Sampel Pengujian Oksidasi. (a) Sampel Sebelum Pengujian Oksidasi, (b) – (c) Sampel Setelah Pengujian Oksidasi 700°C. (b) Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si *as-cast*, *solution treatment*, *aging treatment*, (c) Ti-6Al-4V

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

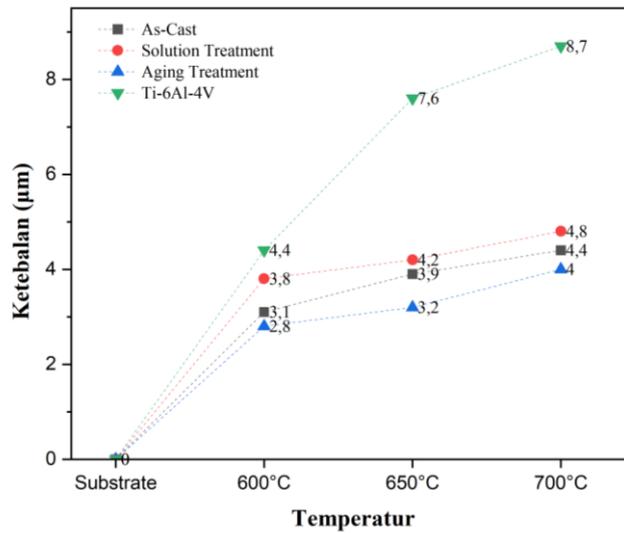
yang sama dimana dalam penelitiannya sampel Ti-6Al-4V mengalami spalasi lapisan oksida dan meninggalkan noda kuning yang merupakan noda dari lapisan oksida V_2O_5 [69]. Pada sampel Ti-6Al-5Nb-3Sn-1Zr-0,5Si hanya terdapat perbedaan warna dan tidak terjadi spalasi. Untuk *as-cast* berwarna biru (cukup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

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

4.5.4 Ketebalan Lapisan Oksida



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

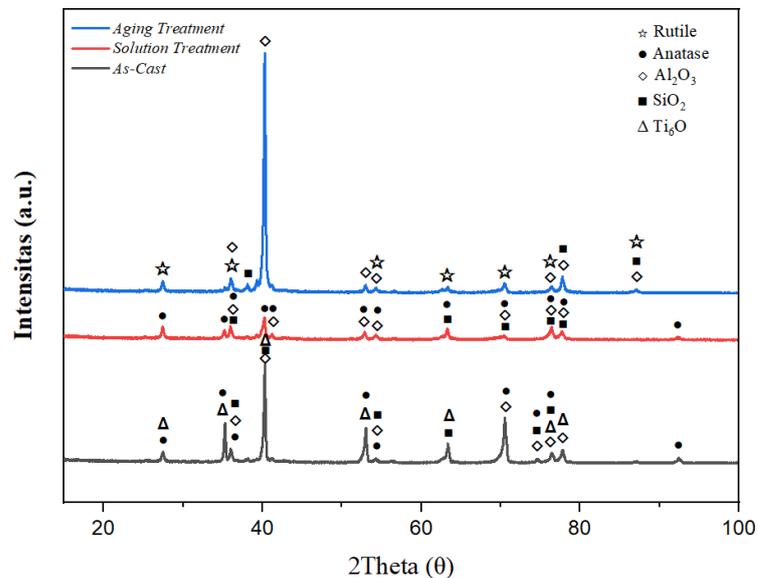


Gambar 4.13 Grafik Ketebalan Lapisan Oksida Setiap Sampel

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

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

4.6 Hasil Pengujian XRD Setelah Perlakuan Oksidasi



Gambar 4.14 Data XRD Setelah Pengujian Oksidasi 700°C

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

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

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

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

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

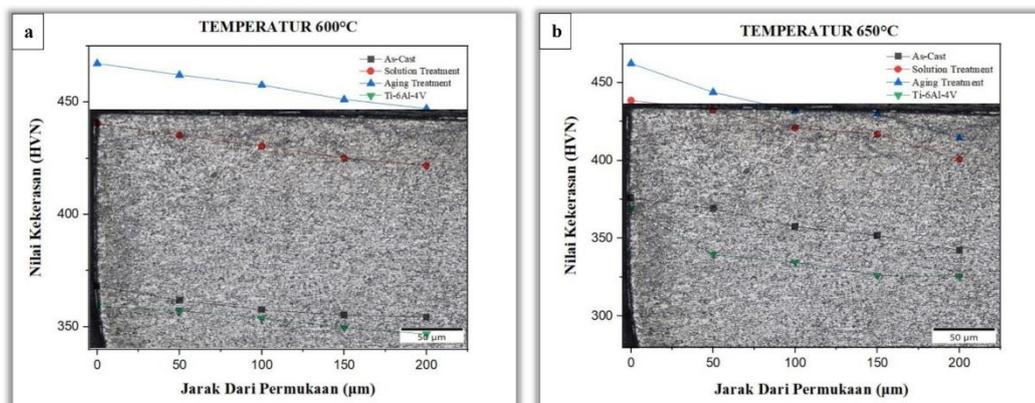
Lapisan oksida SiO_2 juga teridentifikasi pada semua sampel. Lapisan ini memberikan dapat memperlambat laju oksidasi. Hal ini karena SiO_2 dalam mengurangi porositas dan unsur Si dapat mendukung pertumbuhan rutile [15]. Sementara itu, fasa Ti_6O hanya terdeteksi pada sampel *as-cast*. Lapisan Ti_6O ini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

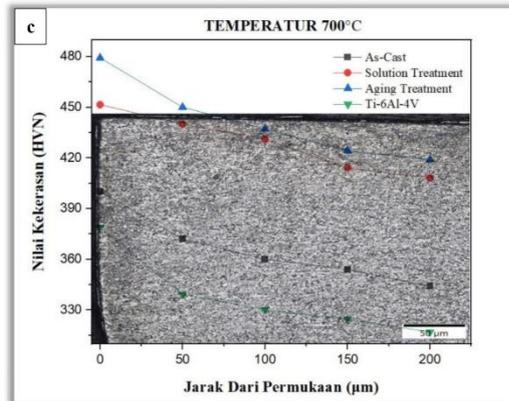
Secara keseluruhan, perbedaan fasa yang terbentuk pada setiap sampel dapat memengaruhi ketahanan oksidasinya. Sampel *aging treatment* terbukti

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

4.7 Pengaruh Perlakuan Oksidasi Terhadap Sifat Kekerasan

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





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

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

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

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

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