

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

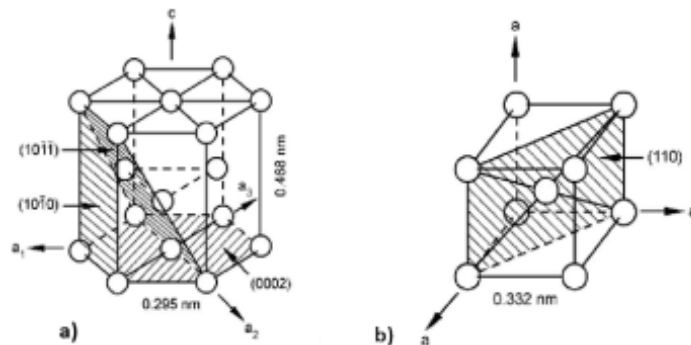
2.1 Titanium

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

Tabel 2.1 Sifat Fisik dan Kimia Titanium [14]

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

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



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

2.2 Paduan Titanium

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

2.2.1 Fasa α

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

Tabel 2.2 *Commercially Pure Titanium* [14]

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

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

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

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

2.2.2 Fasa β

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

2.2.3 Fasa $\alpha+\beta$

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

2.3 *Titanium Superalloys*

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

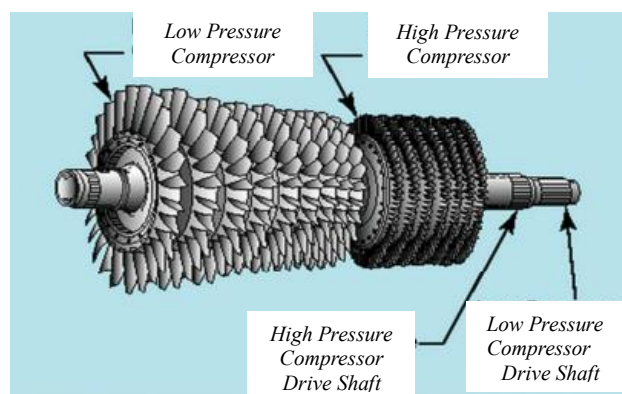
Ti-5Al-2Sn-3Li, Ti-6Al-6V-2Sn, dan sebagainya. Paduan tersebut dapat dikatakan sebagai *titanium superalloys* karena memiliki keunikan pada setiap paduannya seperti rasio bobot terhadap kekuatan yang tinggi, ketahanan korosi yang sangat tinggi, dan bobot yang rendah. *Titanium superalloys* yang umumnya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

2.4 Aplikasi Material Bilah Kompresor Bertekanan Tinggi

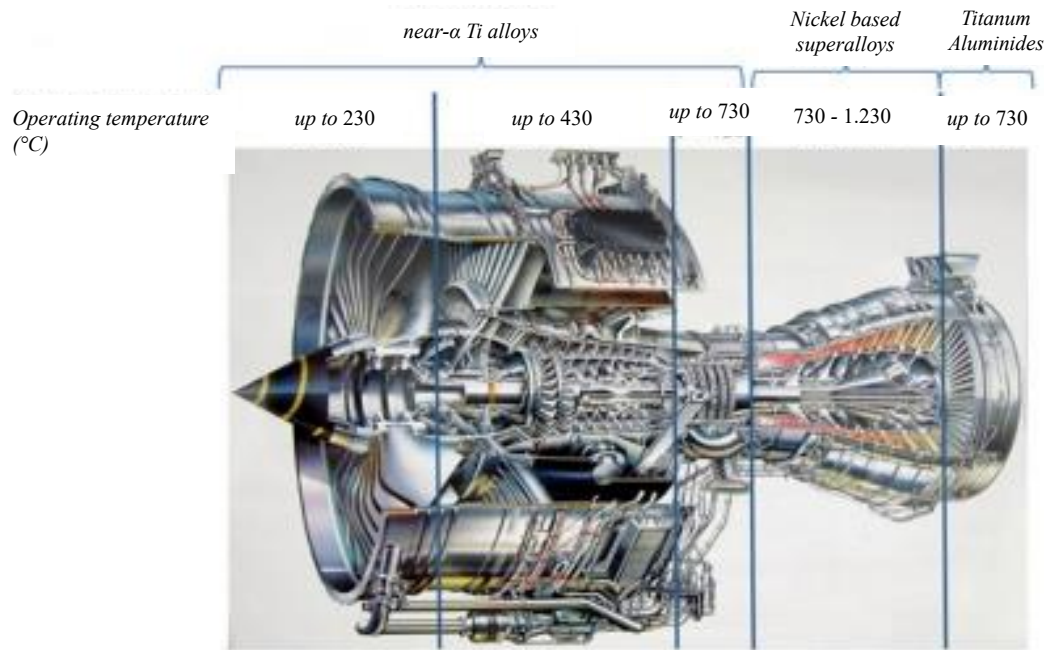
Komposisi dari sebuah sistem mesin turbin jet terdiri dari empat bagian, yaitu kompresor, ruang bakar, turbin, dan nozel [22] dapat dilihat pada Gambar 2.2. Paduan Ti-6Al-4V merupakan bahan yang umumnya digunakan pada *rotor blades* bilah kompresor dan baling-baling stator [23]. Namun, Ti-6Al-4V biasanya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

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

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



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



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

2.5 Material Temperatur Tinggi

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

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

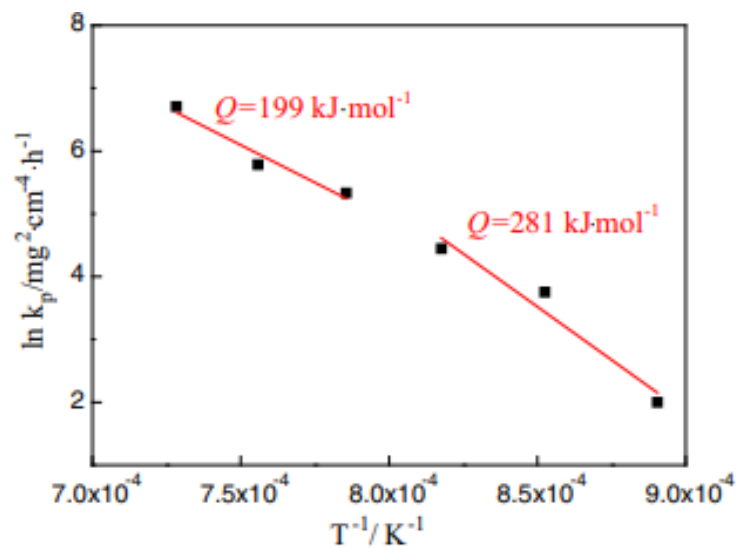
$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p \cdot t \dots \dots \dots (2.1)$$

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

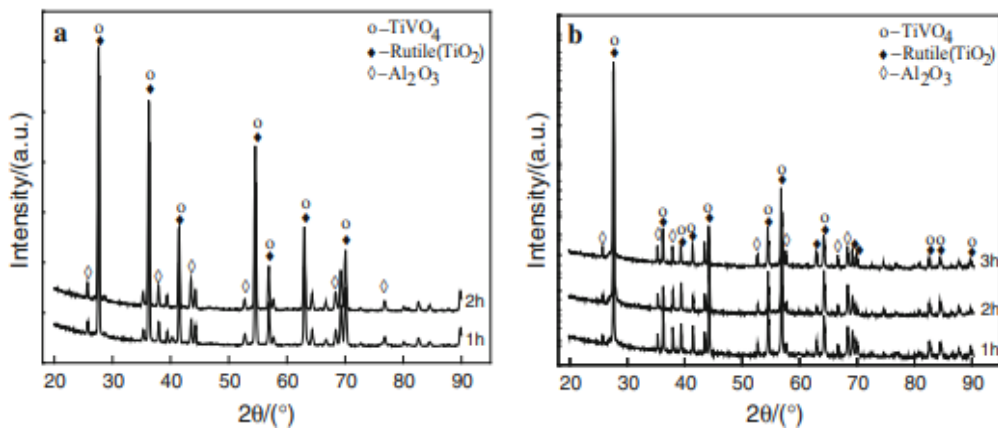
Adapun keterangannya yaitu ΔW merupakan pertambahan berat, A adalah luas permukaan benda uji, k_p adalah konstanta laju oksidasi, t adalah waktu oksidasi, dan n sebagai eksponen laju. Untuk menentukan nilai n , didapatkan *slope* dari kurva $\ln \Delta W$ per $\ln t$. Menurut Entao *et al.*, pada dalam penelitiannya menyatakan bahwa kinetika oksidasi dari paduan Ti-6Al-4V diperkirakan mengikuti persamaan parabola [6]. Selain itu, nilai energi aktivasi oksidasi dibawah dan diatas yang didapatkan dari paduan Ti-6Al-4V yang diberikan perilaku oksidasi dengan temperatur tinggi (850 °C dan 1100 °C) sebesar 281 dan 199 kJ/mol. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat bahwa semakin meningkat temperatur oksidasi diatas T_β , maka kurva pertambahan berat lebih tinggi dibandingkan dibawah T_β . Pertambahan berat meningkat dengan cepat pada oksidasi awal dalam waktu 90 menit, kemudian secara bertahap melambat pertambahan berat dan relatif stabil seiring berjalannya waktu.

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

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

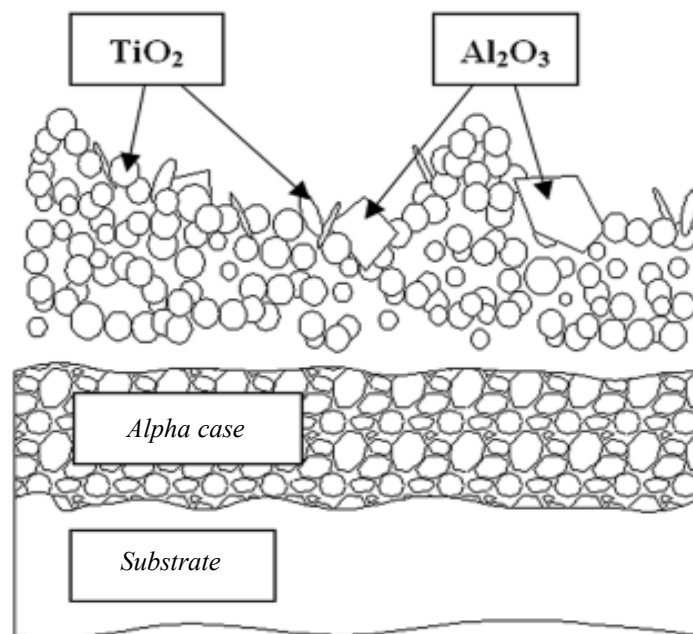


Gambar 2.4 Kurva Arrhenius konstanta laju parabola k_p untuk oksidasi Ti-6Al-4V pada 850 – 1100 °C [6]



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

Dapat dilihat dari hasil XRD paduan Ti-6Al-4V pada Gambar 2.5, permukaan yang teroksidasi sebagian besar terdiri dari TiO_2 tipe rutil dan sejumlah kecil Al_2O_3 dan TiVO_4 . Lapisan oksida atau skala oksida yang terbentuk yaitu Al_2O_3 pada lapisan luar yang bersifat dispersif dan lapisan dalam terbentuk lapisan-lapisan dari TiO_2 dan TiVO_4 . Skala oksida memiliki daya rekat (*adhesion*) yang baik pada substrat paduan Ti-6Al-4V dan tidak terjadi pengelupasan pada temperatur di atas $850\text{ }^\circ\text{C}$. Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin meningkatnya temperatur akan memengaruhi intensitas puncak difraksi dan puncak rutil (TiO_2 dan TiVO_4) yang menjadi lebih dominan dengan intensitas yang lebih tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5b.



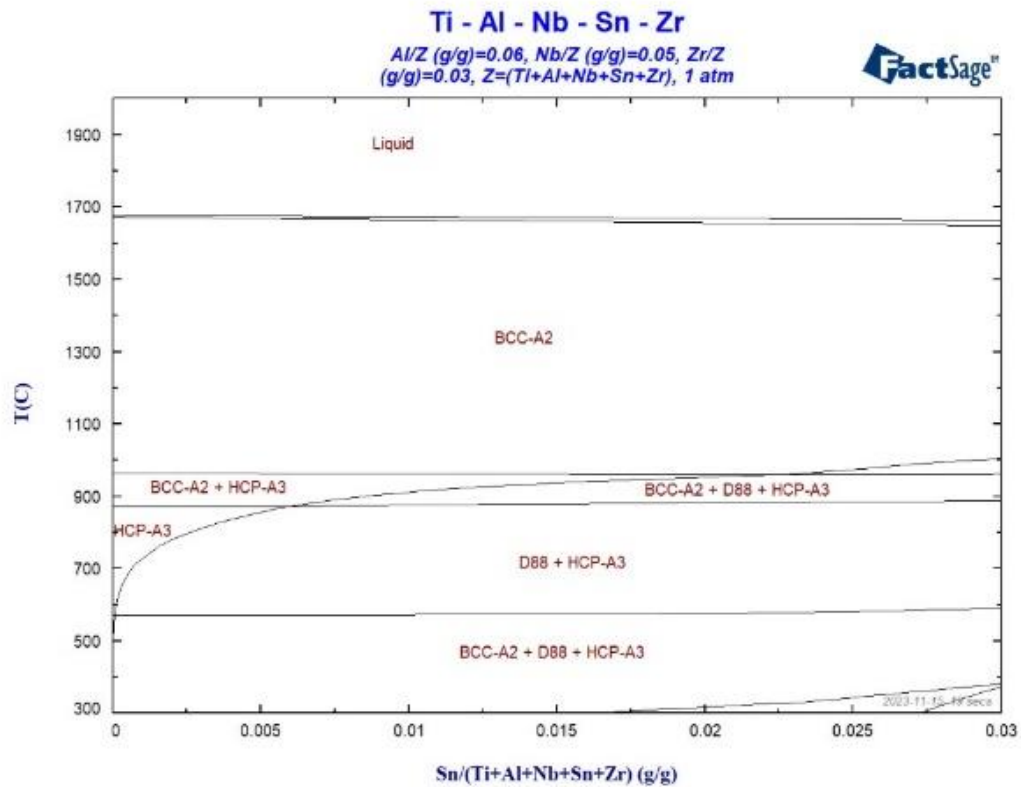
Gambar 2.6 Komposisi skala oksida Ti-6Al-4V pada temperatur tinggi [6]

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

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

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

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



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

2.7 Pengaruh Penambahan Unsur

2.7.1 Pengaruh Penambahan Nb

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

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

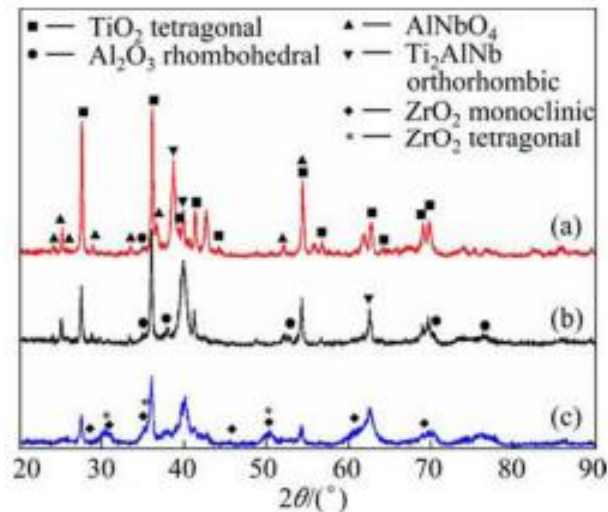
Hasil penelitian Gobel *et al.* yaitu pemakaian niobium dalam paduan titanium dapat secara signifikan dapat mengurangi laju oksidasi dan menstabilkan pembentukan lapisan nitrida yang terbentuk pada permukaan logam [29]. Pengaruh penambahan niobium dalam paduan berbasis Ti-Al juga didukung dalam jurnal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

2.7.2 Pengaruh Penambahan Zr

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

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

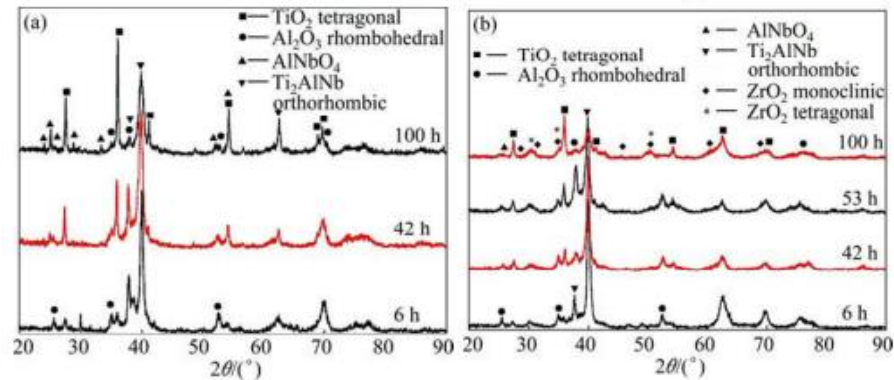
tetragonal dan monoklinik yang dimana dapat mendorong masuknya oksigen ke dalam substrat. Pada Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa intensitas puncak Al_2O_3 meningkat di paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr, sedangkan beberapa puncak *Bragg* dari AlNbO_4 dan ZrO_2 monoklinik dan tetragonal di paduan Ti-22Al-21Nb-6Zr.



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

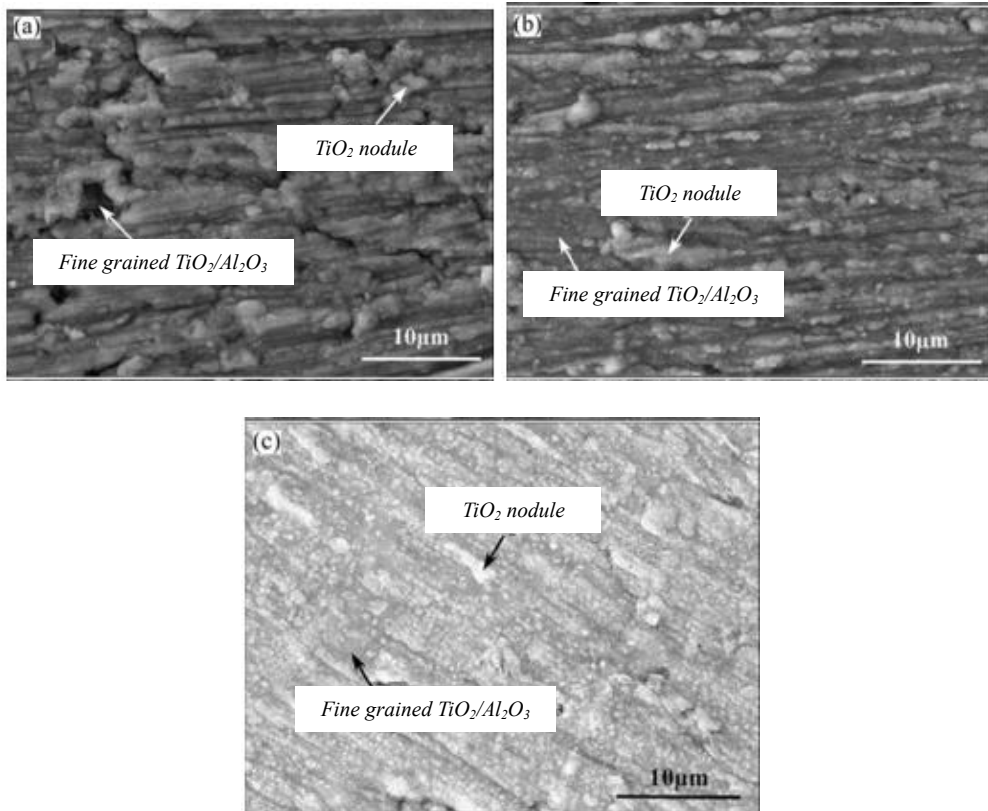
Pada Gambar 2.9(a) dapat dilihat bahwa paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr yang telah dioksidasi pada 800 °C untuk waktu yang berbeda-beda. Terlihat bahwa puncak Al_2O_3 dan TiO_2 dapat diamati pada paduan yang teroksidasi pada suhu 800 °C selama 6 jam. Selain itu, intensitas puncak TiO_2 meningkat dan muncul pola difraksi AlNbO_4 pada waktu 42 jam. Intensitas puncak AlNbO_4 jelas meningkat dengan oksidasi dari 42 jam hingga 100 jam. Pada Gambar 2.7(b) dapat dilihat bahwa permukaan skala paduan Ti-22Al-21Nb-6Zr yang teroksidasi pada 800 °C untuk waktu yang berbeda. Jika dibandingkan dengan Gambar 2.7(a), puncak tambahan ZrO_2 dengan intensitas sangat lemah muncul pada 6 jam. Dengan bertambahnya waktu oksidasi, intensitas puncak TiO_2 dan Al_2O_3 jelas meningkat untuk paduan

Ti-22Al-21Nb-6Zr. Setelah oksidasi pada 800 °C selama 100 jam, puncak *Bragg* dari monoklinik dan tetragonal-ZrO₂ meningkat.



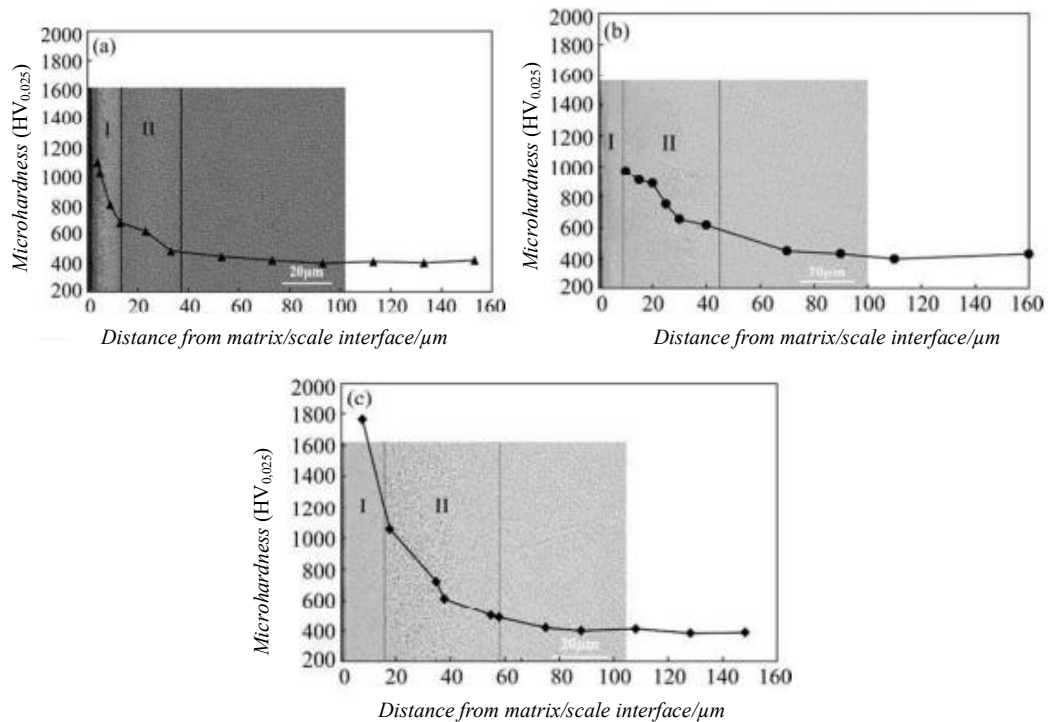
Gambar 2.9 Hasil XRD setelah oksidasi pada 800 °C dengan perbedaan waktu: (a) Ti-22Al-26Nb-1Zr; (b) Ti-22Al-21Nb-6Zr [8]

Penelitian ini juga mendapatkan hasil morfologi permukaan yang terbentuk pada sampel Ti-22Al-27(Nb, Zr) yang dioksidasi pada 800 °C ditampilkan pada Gambar 2.9. Pada Gambar 2.10(a), bintik-bintik TiO₂ terbentuk dan butir-butir dalam bintik-bintik ini tumbuh dan terhubung menjadi area lebih besar, berikatan dengan titanium di sekitarnya. Namun, permukaan paduan ditutupi oleh lapisan tipis terputus-putus karena sambungan antar area yang berbeda. Terbentuknya lapisan ini menyebabkan disekitar kaya akan Aluminium. Jadi, di bawah lapisan ini, terbentuk Al₂O₃ dan TiO₂ berbutir halus (*fine-grained* TiO₂/Al₂O₃). Ketika dibandingkan dengan paduan Ti-22Al-27Nb, seperti dapat dilihat dari Gambar 2.10(b,c), terdapat lapisan oksida yang seragam atau sama yang berasal dari kombinasi nodul TiO₂ yang lebih sedikit dan butiran yang lebih halus.



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

Fasa awal dan struktur mikro dengan menambahkan Zr dapat menghasilkan derajat zona pengaruh oksigen yang berbeda-beda. Paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr memiliki kemampuan larut yang lebih kuat. Selain itu, paduan Ti-22Al-26Nb-1Zr memiliki jalur difusi oksigen yang lebih banyak karena parameter kisi fasa BCC/B2 dan O yang lebih besar menghasilkan lapisan oksidasi internal yang paling tipis, sedangkan untuk paduan Ti-6Al-21Nb-6Zr unsur oksigen akan mudah larut ke dalam substrat. Hal itu disebabkan karena adanya fasa α_2 . Kemudian, terjadi peningkatan parameter kisi untuk fasa O saat ditambahkan unsur Zr sebesar 6%.



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

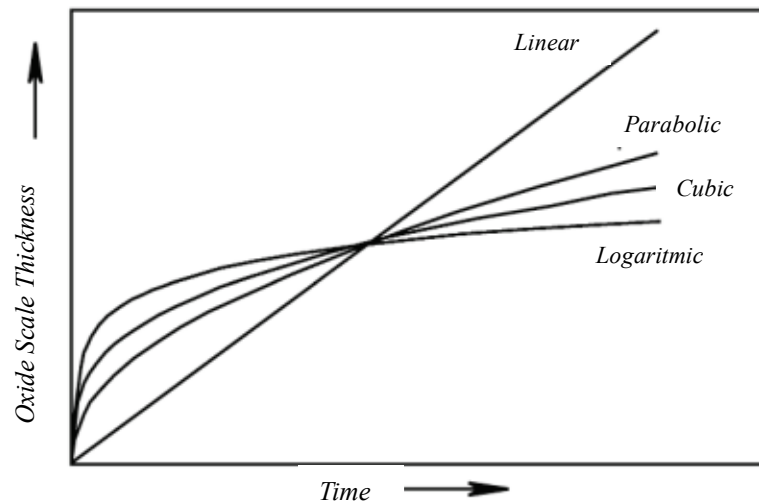
2.7.3 Pengaruh Penambahan Sn

Menurut Yu Pan *et al.* [13], pada tahun 2020 yang melakukan penelitian pengaruh penambahan Sn terhadap perilaku temperatur tinggi (1000 °C selama 100 jam). Penelitian tersebut menggunakan paduan Ti-45Al-8.5Nb-xSn (x = 1 - 3, at.%). Dalam jurnal tersebut dikatakan bahwa saat Sn ditambahkan dalam paduan TiAl dapat menambahkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi. Paduan TiAl-3Sn menunjukkan ketahanan oksidasi terbaik, dengan perolehan massa terendah sebesar 3,29 mg/cm², kerak oksida tertipis sebesar 14 μm dan tidak terjadi spalasi [13]. Penambahan Sn dapat mengubah struktur lapisan oksida paduan TiAl. Struktur berlapis-lapis dari paduan TiAl-3Sn dibagi menjadi empat lapisan dengan komposisi yang berbeda-beda yang

tunggal dan berkesinambungan lapisan Al_2O_3 muncul pada skala oksida. Kehadiran fasa Ti_3Sn mendorong pembentukan lapisan oksida Al_2O_3 . Ketahanan oksidasi yang unggul dari paduan TiAl-3Sn terutama disebabkan oleh pembentukan fasa Ti_3Sn . Kehadiran fasa Ti_3Sn menghambat difusi oksigen ke dalam dan menurun besarnya fluks keluar Titanium, secara relatif meningkatkan aktivitas Aluminium yang terdifusi ke luar hingga terbentuk lapisan Al_2O_3 yang kontinu. Selain itu, lapisan oksida Al_2O_3 yang dihasilkan memberikan penguncian mekanis antara skala oksida dan substrat, sehingga meningkatkan ketahanan *spallation*.

2.8 Laju Oksidasi

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



Gambar 2.12 Variasi laju reaksi oksidasi [19]

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

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

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

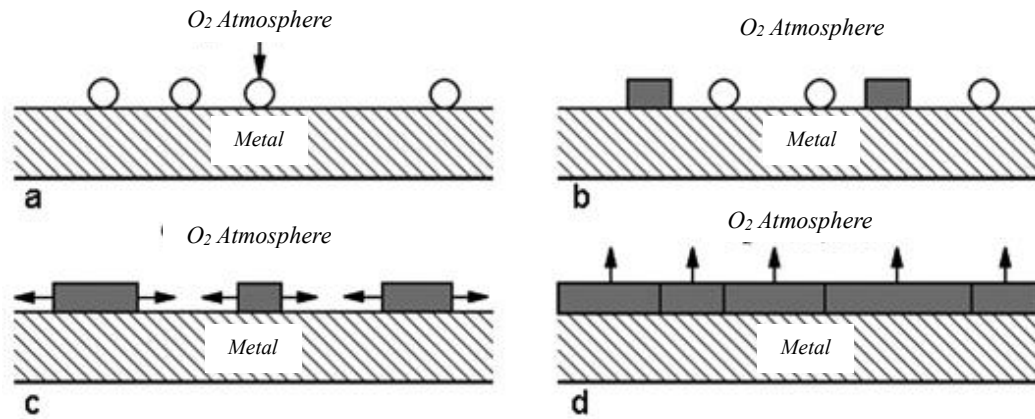
2.9 Lapisan Oksida

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

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

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

titanium berupa Al_2O_3 dan TiO_2 . Al_2O_3 membantu meningkatkan stabilitas fasa pada paduan titanium, terutama pada temperatur tinggi [33]. Untuk senyawa oksida TiO_2 , menurut penelitian Shen *et al.* (2023), menunjukkan bahwa lapisan TiO_2 yang terbentuk melalui proses sol-gel dapat meningkatkan ketahanan korosi paduan titanium hingga 80% pada temperatur 600 °C [34].



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