

IMPLANTASI ION YTTRIUM UNTUK MENGHAMBAT LAJU OKSIDASI PADUAN TiAl PADA SUHU 800 °C

Lely Susita R.M., Sayono, BA. Tjipto Sujitno, Slamet Santoso

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

Diterima 04 September 2008, diterima dalam bentuk perbaikan 30 Desember 2008, disetujui 05 Januari 2009

ABSTRAK

IMPLANTASI ION YTTRIUM UNTUK MENGHAMBAT LAJU OKSIDASI PADUAN TiAl PADA SUHU 800°C. Paduan TiAl merupakan material yang mempunyai potensi sangat besar sebagai material struktur pada temperatur menengah (600 – 850 °C) untuk industri otomotif dan ruang angkasa, karena mempunyai densitas rendah (3,8 gr/cm³) dan kekuatan mekanik yang tinggi. Pada kisaran suhu ini terbentuk lapisan nonproteksi yang menyebabkan laju pertumbuhan oksida yang cepat. Peningkatan sifat ketahanan oksidasi suatu material memerlukan rekayasa permukaan karena oksidasi biasanya dimulai dari permukaan. Dalam penelitian ini telah dilakukan implantasi ion yttrium (Y) pada permukaan paduan TiAl untuk meningkatkan sifat ketahanan oksidasi paduan tersebut. Dari hasil pengamatan difraksi sinar X pada paduan TiAl menunjukkan bahwa implantasi ion Y menyebabkan terbentuk lapisan Ti₄Al₃Y₆ dan Y₃Al₂ serta lapisan oksida Y₂O₃, YTiO₃ dan Y₂TiO₅ yang dapat menghambat difusi oksigen masuk ke permukaan paduan TiAl untuk membentuk lapisan oksida, sehingga mengurangi laju oksidasi paduan TiAl.

Kata kunci: implantasi ion, ketahanan oksidasi, laju oksidasi

ABSTRACT

IMPLANTATION OF YTTRIUM ION FOR REDUCING THE OXIDATION RATE OF TiAl ALLOY AT 800 °C. TiAl alloy as a high potential material structure for automotive and aerospace industry operated at medium temperature (600 °C - 850 °C) due to their low density (3.8 gcm⁻³) and high mechanical strength. For the range of temperature (600 - 850 °C), generally will be formed a non protective layer that cause growth of oxide rate faster. Improving on oxidation resistance of materials needs a surface engineering, because the oxidation usually is initiated from the surface of materials. In this research, it has been done an implantation of yttrium (Y) into TiAl alloy with the purpose to improve their oxidation resistance. From XRD analysis, it's observed that implantation of yttrium ion can cause the formation of Ti₄Al₃Y₆ and Y₃Al₂ as well as oxide layer such as Y₂O₃, YTiO₃ and Y₂TiO₅. These oxide layers are protective and can resist the diffusion of oxygen enter the surface of TiAl to form an oxide layer, so that it can reduce the oxidation of TiAl alloy.

Keywords: ion implantation, oxidation resistance, oxidation rate

PENDAHULUAN

Material intermetalik TiAl banyak digunakan sebagai material *airframe high performance* dan turbin gas, karena memiliki massa jenis yang rendah, suhu leleh yang tinggi, kekuatan yang baik pada suhu tinggi dan ketahanan mulur yang baik pula. Berdasarkan keunggulan sifatnya dan didukung oleh sifat ketahanan oksidasi yang baik pada temperatur tinggi, maka material ini banyak digunakan pada industri pesawat terbang sebagai material yang dominan tetapi dalam jumlah yang terbatas karena kelemahan material TiAl tidak tahan terhadap operasi di atas suhu 700 °C dan keuletannya menurun. Material TiAl di atas suhu 700 °C tidak membentuk oksida proteksi selama proses oksidasi dalam udara, umumnya terbentuk campuran oksida Al₂O₃/TiO₂ yang mempunyai sifat nonproteksi. Terbentuknya lapisan nonproteksi disebabkan oleh menipisnya komponen aluminium karena untuk konsumsi pembentukan alumina (Al₂O₃). Fenomena terbentuknya lapisan nonproteksi yang menyebabkan laju pertumbuhan oksida yang cepat biasanya terjadi pada waktu pemaparan yang cukup lama.⁽¹⁾ Kelemahan ini dapat dikurangi dengan menambahkan sejumlah tertentu unsur tanah jarang (*rare earth elements, REEs*) seperti cerium (Ce), neodimium (Nd), samarium (Sm), praseodimium (Pr), atau elemen reaktif lainnya (*RE*) seperti yttrium (Y), zirkonium (Zr), titanium (Ti), hafnium (Hf), magnesium (Mg), maupun lantanum (La). Penambahan elemen reaktif akan efektif bila jumlahnya (prosentasenya) berkisar antara 0,1% hingga 2% berat tergantung dari jenis elemen

reaktif maupun material induknya dan dapat terdistribusi secara merata pada kedalaman orde 500 Å. Bila penambahan elemen reaktif lebih dari 2% berat atau kurang dari 0,1% berat dan kedalaman lebih dari 500 Å maka lapisan proteksi yang terbentuk justru akan mudah mengelupas, dengan demikian laju oksidasi akan semakin cepat.⁽²⁾

Laju oksidasi bergantung pada beberapa faktor antara lain nisbah molar volume oksida terhadap volume material induk dan laju pemasokan oksigen ke permukaan luar oksida. Nisbah volume oksida yang terbentuk terhadap volume material yang dikonsumsi dalam proses pembentukan oksida adalah faktor paling penting dalam menentukan laju oksidasi untuk rentang waktu yang lama. Apabila volume oksida lebih kecil daripada material induk, oksida akan teregang pada permukaan material sehingga lapisan oksida yang terbentuk berpori dan tidak berfungsi sebagai pelindung. Proses oksidasi terus berlangsung dengan laju linier terhadap waktu. Jika volume oksida lebih besar daripada volume material, seperti pada yttrium (1,13) dan cerium (1,16) maka oksida yang terbentuk sinambung dan berfungsi sebagai pelindung.⁽³⁾

Dalam penelitiannya, H.N., LEE, dkk.⁽⁴⁾, memperlihatkan bahwa penambahan yttrium pada paduan TiAl menghasilkan efek positif pada permulaan proses oksidasi suhu tinggi. Efek penambahan yttrium pada material TiAl untuk jumlah tertentu akan mengurangi kerusakan pada lapisan oksida yang telah terbentuk akibat siklus termal. Dengan kata lain dapat menghambat laju oksidasi, hal ini disebabkan material TiAl yang mengandung yttrium mampu membentuk lapisan pelindung (*protective layer*) yang berperan sebagai penghambat difusi oksigen sehingga diperoleh laju pertumbuhan oksida yang lebih lambat dibandingkan material TiAl.⁽⁴⁾

Implantasi ion memberikan suatu metode alternatif untuk menambahkan unsur-unsur baru ke dalam material induk. Kelebihan teknik implantasi ion dibandingkan dengan teknik lain (difusi, epitaksi, dan paduan) antara lain kedalaman dan dosis ion dapat dikendalikan dengan akurat, prosesnya cepat (dalam orde menit), dan tidak ada *thermal stress* sebab tidak menggunakan suhu tinggi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pembentukan lapisan pelindung yang berperan sebagai penghambat laju oksida pada permukaan paduan TiAl yang diimplantasi dengan elemen reaktif yttrium. Fenomena terbentuknya lapisan pelindung pada paduan TiAl setelah proses oksidasi dapat diamati dari struktur kristal paduan TiAl dengan menggunakan teknik difraksi sinar X (XRD). Selama proses oksidasi, pemanasan cuplikan dilakukan pada suhu 800°C berkenaan dengan pemakaian TiAl sebagai material struktural pada suhu menengah (600 - 800°C). Pengamatan lapisan pelindung diperoleh dari data intensitas dan posisi puncak difraksi yang dihasilkan oleh difraktometer sinar X.

METODOLOGI

Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian

Persiapan bahan

Dalam penelitian ini digunakan material TiAl (komposisi 70% Ti dan 30% Al) untuk material target atau cuplikan yang akan diimplantasi dengan ion yttrium, sedangkan bahan-bahan lain yang diperlukan dalam penelitian ini adalah gas oksigen, kertas gosok, pasta intan dan bahan pencuci cuplikan berupa alkohol.

Persiapan peralatan

Peralatan atau instrumentasi yang perlu dipersiapkan dalam pelaksanaan penelitian ini terdiri dari :

1. Akselerator implantasi ion 150 keV/2 mA buatan PTAPB-BATAN
2. Alat pemotong cuplikan
3. Alat *polishing* / penghalus cuplikan
4. Tungku pemanas (*furnace*) berkemampuan maksimum hingga 1100 °C

Akselerator implantasi ion merupakan jenis akselerator ion yang khusus didesain untuk mengimplantasikan ion-ion dari suatu atom atau molekul ke dalam suatu bahan. Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber ion, sumber tegangan tinggi, tabung akselerator, lensa kuadropol, sistem pemisah berkas ion, sistem hampa dan tempat target/cuplikan.

Metode Penelitian

Tahapan dalam penelitian ini meliputi:

1. Persiapan cuplikan dari material TiAl, meliputi pemotongan dalam bentuk keping, penghalusan dengan kertas abrasif, dan pencucian cuplikan dengan menggunakan alkohol untuk menghilangkan adanya kontaminasi (debu, minyak atau lemak) pada permukaan cuplikan.
2. Teknik eksperimen, setiap cuplikan yang telah disiapkan diimplantasi dengan ion yttrium pada energi 100 keV serta dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm², serta dilakukan uji oksidasi dalam media oksigen pada kondisi siklus termal dengan waktu pemanasan setiap siklus termal 5 jam pada suhu 800 °C dan pendinginan 19 jam pada suhu kamar. Selama uji siklus termal, cuplikan dimasukkan ke dalam tabung yang dialiri gas oksigen dengan laju aliran 0,019 cc/menit dan tekanan 1,5 kgf/cm². Adanya oksigen di lingkungan sekitar cuplikan menyebabkan terjadinya proses oksidasi pada suhu 800 °C.
3. Pengujian atau karakterisasi, meliputi uji struktur kristal pada cuplikan TiAl baik sebelum maupun sesudah proses oksidasi dengan menggunakan metode difraksi sinar X. Dari data pola difraksi dapat ditentukan lapisan pelindung yang terbentuk pada paduan TiAl.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Implantasi Ion

Dalam teknik implantasi ion, terdapat parameter penting yang berpengaruh terhadap hasil implantasi ion. Parameter tersebut adalah energi ion, dosis ion, massa atau jenis ion dan massa atau jenis material induk. Dosis ion akan menentukan jumlah ion atau persentase ion yang diimplantasikan, sedangkan energi ion akan menentukan kedalaman penetrasi ion dopan pada permukaan material.

Kedalaman penetrasi ion berhubungan dengan jangkauan ion rata-rata dalam material, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut⁽⁶⁾,

$$R = \frac{0,6E[Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}]^{1/2}(M_1 + M_2)M_2}{\rho Z_1 Z_2 M_1}$$

dimana E adalah energi ion yang datang, M_1 adalah nomor massa ion dan Z_1 adalah nomor atom ion, M_2 adalah nomor massa material dan Z_2 adalah nomor atom material, dan ρ adalah kerapatan material. Proyeksi jangkauan ion pada arah datangnya ion mula-mula disebut jangkauan terproyeksi R_p . Korelasi antara jangkauan rata-rata R dengan R_p dapat dituliskan,

$$\frac{R}{R_p} = \frac{1}{4} \left[(5 + A) \frac{(1 + A)}{2\sqrt{5}} \arccos \frac{1 - A}{1 + A} - 1 - 3A \right]$$

dengan $A = M_2/M_1$. Apabila nilai $A \leq 1$, maka persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi,

$$\frac{R}{R_p} = 1 + \frac{M_2}{3M_1} = 1 + \frac{1}{3} A$$

Perpindahan energi setiap tumbukan antara ion dengan atom-atom material bersifat acak, sehingga suatu ion dengan energi mula-mula yang sama akan mempunyai jangkauan ion terproyeksi yang berbeda. Karena itu terjadi simpangan rata-rata distribusi jangkauan ion terproyeksi yang menimbulkan deviasi standar σ_{Rp} . Distribusi konsentrasi ion dapat didekati dengan distribusi statistik Gauss, dan konsentrasi ion dopan pada kedalaman x dapat dituliskan sebagai berikut,

$$N(x) = \frac{D}{\sigma_{Rp} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\sigma_{Rp}^2} \right]$$

dimana D adalah dosis ion dopan yang diimplantasikan pada material, besarnya sebagai fungsi dari arus berkas ion dan waktu proses implantasi ion.

$$D = \frac{1}{eA} \int i \cdot dt$$

dimana e adalah muatan ion, A adalah luas permukaan berkas ion, i adalah arus berkas ion, dan t adalah waktu proses implantasi.

Untuk mengetahui jangkauan terproyeksi, deviasi standar dari jangkauan ion terproyeksi, bentuk lintasan ion maupun profil distribusi ion terimplantasi dapat diketahui dengan mudah dan cepat dengan menggunakan program TRIM. TRIM merupakan akronim dari *Transport of Ions in Matter* adalah suatu program untuk menghitung daya henti (*stopping*) dan jangkauan (*range*) dari suatu ion dalam suatu bahan (*matter*). Dalam program ini data-data yang harus dimasukkan meliputi jenis ion (nomor atom Z_1 dan nomor massa M_1) yang diimplantasikan, jenis material target (nomor atom Z_2 dan nomor massa M_2) maupun kerapatan (*density*) material yang akan diimplantasi. Apabila material target merupakan paduan, maka nomor atom Z_2 , nomor massa M_2 , maupun kerapatan efektifnya yang besarnya ditentukan oleh jumlah maupun persentase penyusunnya. Disamping itu range energi yang diinginkan juga harus dimasukkan. Data keluaran dari program TRIM tersebut meliputi besarnya kehilangan energi karena interaksi elektronik $(dE/dx)_e$, kehilangan energi karena interaksi dengan inti $(dE/dx)_n$, jangkauan ion terproyeksi (R_p), penyebaran ke arah longitudinal (*longitudinal straggling*) σ_{Rpl} dan *lateral straggling* σ_{Rps} untuk masing-masing energi yang diberikan.

Quadaekers dkk.⁽⁶⁾ menyebutkan bahwa penambahan ion akan efektif bila jumlahnya berkisar antara 0,1% hingga 2% berat tergantung dari jenis ion yang diimplantasikan maupun material targetnya, dan terdistribusi secara merata pada kedalaman orde 500 Å.

Sebelum proses implantasi ion terlebih dahulu dilakukan perhitungan teoritis dan simulasi program TRIM. Hasil perhitungan ini ditampilkan pada Tabel 1, dan dari data-data tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk memprediksi persentase ion pada material.

Tabel 1. Parameter hasil perhitungan proses implantasi ion.

Jenis Material	Jenis Ion	Energi Ion (keV)	Jangkauan Ion (Å)	Dosis Ion (ion/cm ²)	% Ion
TiAl	Y	100	424	$2,98 \times 10^{15}$	1,37
				$4,47 \times 10^{15}$	2,04

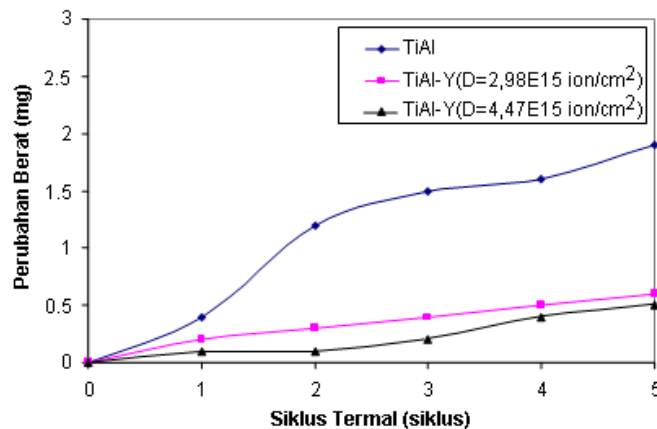
Uji Osidasi Siklus Termal

Cuplikan TiAl sebelum dan sesudah diimplantasi ion yttrium (Y) diuji sifat ketahanan oksidasinya dalam media oksigen selama 5 siklus termal dengan waktu pemanasan setiap siklus termal 5 jam pada suhu 800 °C dan pendinginan 19 jam pada suhu kamar. Oksida yang stabil dan tidak mudah menguap diharapkan akan tetap tinggal pada permukaan TiAl yang disertai dengan peningkatan berat cuplikan. Apabila oksida tetap lekat dan menjadi penghalang difusi oksigen akan menyebabkan laju oksidasi semakin berkurang. Dalam hal ini laju oksidasi berbanding terbalik dengan berat oksida. Persamaan untuk laju oksidasi seperti ini $dy/dt = c/y$, kalau diintegrasi menjadi $y^2 = ct$ dengan y : berat oksida, t : waktu dan c : adalah konstanta. Apabila oksida yang terbentuk berpori dan tidak berfungsi sebagai pelindung maka laju pertumbuhan oksida konstan terhadap waktu. $dy/dt = c$, yang bila diintegrasi menghasilkan $y = ct$.⁽³⁾

Metode pengukuran laju oksidasi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode konvensional yaitu dengan menimbang berat oksida yang terbentuk sebagai fungsi waktu menggunakan neraca analitis merk Sartorius tipe 2462, yang mempunyai ketelitian 0,1 mg.

Hasil uji oksidasi siklus termal dalam lingkungan oksigen pada suhu 800 °C untuk paduan TiAl yang diimplantasi dengan ion Y untuk variasi dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² disajikan pada Gambar 1.

Dari hasil uji oksidasi menunjukkan bahwa selama uji oksidasi pada permukaan TiAl sebelum diimplantasi ion Y, oksida yang terbentuk pada awal oksidasi hingga akhir siklus semakin tebal (laju oksidasi cepat). Hal ini menandakan bahwa oksida yang terbentuk tidak mampu merintangi oksigen masuk ke permukaan TiAl. Namun demikian dalam rentang 5 siklus termal, tidak terjadi pengelupasan oksida untuk semua dosis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan oksida pelindung yang terbentuk mempunyai daya lekat yang kuat.



Gambar 1. Laju oksidasi siklus termal TiAl dan TiAl-Y hasil implantasi ion pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm²

Pengaruh implantasi ion Y terhadap sifat ketahanan oksidasi material TiAl

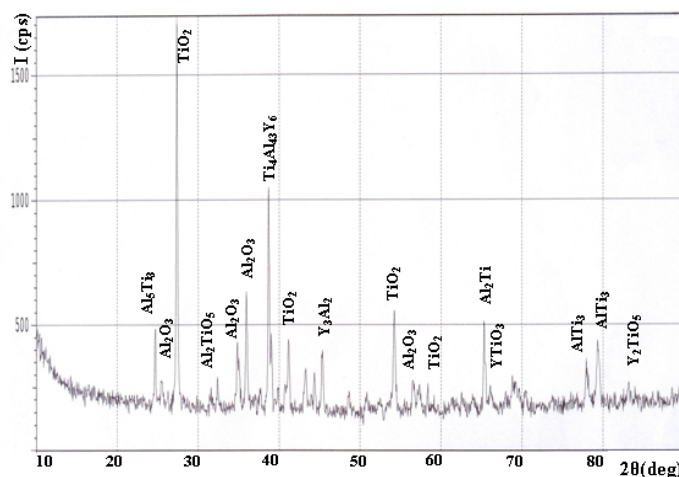
Profil laju oksidasi TiAl yang diimplantasi dengan ion Y pada energi 100 keV dan dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² ditunjukkan pada Gambar 1. Pada rentang waktu oksidasi dari awal oksidasi hingga akhir siklus, laju oksidasi TiAl yang diimplantasi dengan ion Y lebih kecil dari pada TiAl yang tidak diimplantasi. Pada TiAl yang diimplantasi ion Y terlihat adanya kecenderungan terbentuk lapisan pelindung yang berperan sebagai penghambat laju oksida pada permukaan paduan TiAl. Pengamatan lapisan pelindung dapat diperoleh dari struktur kristal paduan TiAl dengan menggunakan teknik difraksi sinar X (XRD)

Uji Struktur Kristal dengan Teknik Difraksi Sinar X

Hasil pengamatan difraksi sinar X pada paduan TiAl setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 2 (tertera dalam lampiran).

Dari informasi sudut hamburan, intensitas dan jarak antar bidang pada Gambar 2, setelah dicocokkan dengan data JCPDS (*Joint Committee Powder On Diffraction Standards*), pola difraksi paduan TiAl menghasilkan puncak-puncak AlTi, Al₂Ti, AlTi₃ dan Al₅Ti₃. Senyawa AlTi menghasilkan tiga puncak dari bidang hkl (002), (003) dan (221) dengan jarak antar bidang 2,03005 Å, 1,35900 Å dan 1,33262 Å pada sudut difraksi (2θ) 44,5990°, 69,0568° dan 70,6245°. Senyawa Al₂Ti menunjukkan pola difraksi dengan dua puncak masing-masing dari bidang hkl (310) dan (602) dengan jarak antar bidang 2,81861 Å dan 1,42335 Å pada sudut difraksi (2θ) 31,7204° dan 65,5293°. Senyawa AlTi₃ menghasilkan dua puncak dari bidang hkl (222) dan (401) dengan jarak antar bidang 1,22209 Å dan 1,20460 Å pada sudut difraksi (2θ) 78,1466° dan 79,5036°, sedangkan senyawa Al₅Ti₃ menghasilkan satu puncak dari bidang hkl (310) dengan jarak antar bidang 3,57827 Å pada sudut difraksi 24,8629°. Lapisan oksida yang terbentuk setelah proses oksidasi pada paduan TiAl menghasilkan puncak-puncak TiO₂, Al₂O₃, dan Al₂TiO₅. Puncak-puncak yang dihasilkan oleh TiO₂ dan Al₂O₃ terlihat lebih banyak, hal ini menunjukkan kecenderungan pembentukan lapisan oksida TiO₂ dan Al₂O₃ lebih besar selama proses oksidasi pada suhu 800 °C. Pembentukan lapisan oksida tersebut, khususnya Al₂O₃, harus dihindarkan karena akan mengakibatkan terbentuknya lapisan nonproteksi yang disebabkan oleh menipisnya komponen aluminium karena untuk konsumsi pembentukan Al₂O₃. Fenomena pembentukan lapisan nonproteksi yang menyebabkan laju pertumbuhan oksida yang cepat terjadi pada waktu pemanasan yang cukup lama. Dari Gambar 2 terlihat adanya delapan puncak TiO₂ dari bidang hkl (110), (220), (200), (111), (210), (402), (320) dan (060) dengan jarak antar bidang 3,23303 Å, 2,31241 Å, 2,29631 Å, 2,18189 Å, 2,04960 Å, 1,86504 Å, 1,68481 Å dan 1,57456 Å pada sudut difraksi 27,5677°, 38,9159°, 39,20°, 41,3470°, 44,1512°, 48,7894°, 54,4134° dan 58,5781°. Senyawa Al₂O₃ menunjukkan pola difraksi dengan delapan puncak dari bidang hkl (012), (220), (103), (121), (113), (211), (203) dan (226) dengan jarak antar bidang 3,47071 Å, 2,56164 Å, 2,54404 Å, 2,48120 Å, 2,08208 Å, 1,68481 Å, 1,62120 Å, dan 1,60148 Å pada sudut difraksi 25,6464°, 35,00°, 35,2500°, 36,1733°, 43,4271°, 54,4134°, 56,7371°, dan 57,5005°, sedangkan senyawa Al₂TiO₅ menghasilkan satu puncak dari bidang hkl (121) dengan jarak antar bidang 2,74509 Å pada sudut difraksi 32,5932°. Kondisi ini tidak menguntungkan karena pembentukan lapisan oksida yang besar dapat

menyebabkan laju pertumbuhan oksida yang semakin cepat, dengan demikian dapat menurunkan ketahanan oksidasi paduan TiAl.

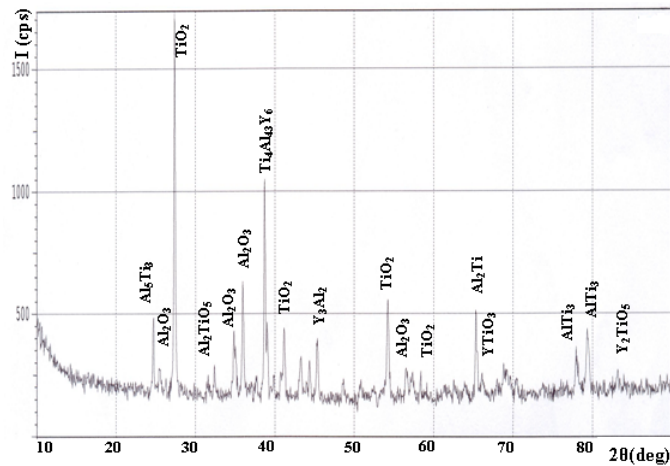


Gambar 2. Pola difraksi paduan TiAl setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Dari data pola difraksi (Gambar 2) dan dicocokkan dengan data JCPDS (*Joint Committee Powder On Diffraction Standards*), diperoleh sistem kristal AlTi adalah tetragonal dengan harga parameter kisi $a : 3,976$ dan $c : 4,049$, sistem kristal AlTi₃ dan Al₅Ti₃ adalah heksagonal dengan harga parameter kisi $a : 5,590$ dan $c : 4,590$ untuk AlTi₃, $a : 5,775$ dan $c : 4,638$ untuk Al₅Ti₃. Sistem kristal lapisan oksida TiO₂ yang terbentuk akibat proses oksidasi pada paduan TiAl adalah tetragonal dengan harga parameter kisi $a : 4,594$ dan $c : 2,958$, sedangkan sistem kristal lapisan oksida Al₂O₃ adalah rombohedral dengan harga parameter kisi $a : 4,758$ dan $c : 12,991$.

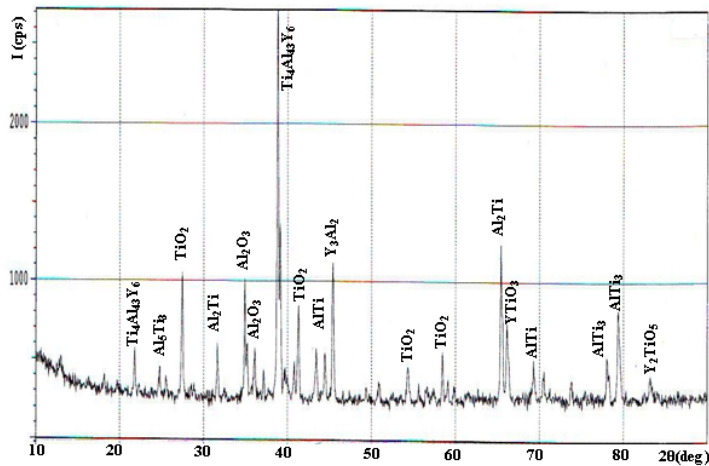
Hasil pengamatan difraksi sinar X pada paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada energi 100 keV dan dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 3 (disajikan dalam lampiran).

Gambar 3 memperlihatkan pola difraksi paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada energi 100 keV dan dosis ion $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² yang menghasilkan puncak-puncak AlTi, Al₂Ti, AlTi₃, Al₅Ti₃, Y₃Al₂ dan Ti₄Al₄₃Y₆ serta lapisan oksida TiO₂, Al₂O₃, Al₂TiO₅, Y₂O₃, YTiO₃ dan Y₂TiO₅. Puncak-puncak yang dihasilkan oleh senyawa AlTi, Al₂Ti, AlTi₃, dan Al₅Ti₃ pada paduan TiAl yang diimplantasi Y dengan dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² mempunyai bidang hkl yang sama dengan puncak-puncak AlTi, Al₂Ti, AlTi₃, dan Al₅Ti₃ pada paduan TiAl sebelum diimplantasi. Senyawa Ti₄Al₄₃Y₆ dan Y₃Al₂ masing-masing menghasilkan satu puncak dari bidang hkl (117) dengan jarak antar bidang 2,32652 Å pada sudut difraksi 38,6705° untuk puncak Ti₄Al₄₃Y₆, dan bidang hkl (410) dengan jarak antar bidang 2,00045 Å pada sudut difraksi 45,2953° untuk puncak Y₃Al₂. Lapisan oksida yang terbentuk setelah proses oksidasi menghasilkan puncak-puncak TiO₂, Al₂O₃, Al₂TiO₅, Y₂O₃, YTiO₃ dan Y₂TiO₅. Puncak-puncak oksida TiO₂ dan Al₂O₃ yang terbentuk pada paduan TiAl yang diimplantasi Y cenderung berkurang secara signifikan dibandingkan dengan puncak-puncak TiO₂ dan Al₂O₃ pada paduan TiAl sebelum diimplantasi, karena selama proses oksidasi pada suhu 800 °C terbentuk lapisan Ti₄Al₄₃Y₆ dan Y₃Al₂ serta lapisan oksida Y₂O₃, YTiO₃ dan Y₂TiO₅ yang dapat menghambat difusi oksigen masuk ke permukaan paduan TiAl untuk membentuk lapisan oksida, sehingga mengurangi laju oksidasi paduan TiAl. Pada Tabel 2 atau Gambar 3 terlihat adanya lima puncak TiO₂ dari bidang hkl (110), (220), (111), (320) dan (060) dengan jarak antar bidang 3,25938 Å, 2,30770 Å, 2,19265 Å, 1,69115 Å dan 1,57999 Å pada sudut difraksi (2θ) 27,3405°, 38,9986°, 41,1350°, 54,1928° dan 58,3574°. Al₂O₃ memperlihatkan pola difraksi dengan lima puncak dari bidang hkl (111), (103), (121), (113), (211) dan (226) dengan jarak antar bidang 2,57516 Å, 2,55810 Å, 2,49759 Å, 2,09106 Å, dan 1,60532 Å pada sudut difraksi 34,8104°, 35,0500°, 35,9278°, 43,2313°, dan 57,3375°. Lapisan oksida pelindung Y₂O₃, YTiO₃ dan Y₂TiO₅ masing-masing menghasilkan satu puncak dari bidang hkl (113), (115) dan (212) dengan jarak antar bidang 2,21511 Å, 1,41274 Å dan 1,16082 Å pada sudut difraksi 40,6992°, 66,0841° dan 83,1473°.



Gambar 3. Pola difraksi paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Dari data pola difraksi (Gambar 3) dan dicocokkan dengan data JCPDS, diperoleh sistem kristal $Ti_4Al_3Y_6$ adalah heksagonal dengan harga parameter kisi $a : 11,05$ dan $c : 17,905$, sedangkan sistem kristal Y_3Al_2 adalah tetragonal dengan harga parameter kisi $a : 8,239$ dan $c : 7,648$. Sistem kristal lapisan oksida Y_2O_3 adalah kubik dengan harga parameter kisi $a : 10,6$, Sistem kristal $YTiO_3$ dan Y_2TiO_5 adalah ortorombik dengan harga parameter kisi $a : 5,327$, $b : 5,618$ dan $c : 7,591$ untuk $YTiO_3$, $a : 10,330$, $b : 11,180$ dan $c : 3,699$ untuk Y_2TiO_5 .



Gambar 4. Pola difraksi paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Hasil pengamatan difraksi sinar X pada paduan TiAl yang diimplantasi Y pada energi 100 keV dan dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 4 (dalam lampiran).

Gambar 4 menunjukkan pola difraksi paduan TiAl yang diimplantasi Y pada energi 100 keV dan dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² yang menghasilkan puncak-puncak AlTi, Al_2Ti , $AlTi_3$, Al_5Ti_3 , Y_3Al_2 dan $Ti_4Al_3Y_6$ serta lapisan oksida TiO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , $YTiO_3$ dan Y_2TiO_5 . Pada Gambar 4 terbentuk dua puncak lapisan $Ti_4Al_3Y_6$ dari bidang hkl (104) dan (117) dengan jarak antar bidang 4,07789 Å dan 2,32113 Å pada sudut difraksi (2θ) 21,7768° dan 38,7640°. Pembentukan lapisan $Ti_4Al_3Y_6$ yang berperan sebagai penghambat difusi oksigen mampu menghalangi terbentuknya oksida Al_2TiO_5 dari bidang hkl (121) dan oksida Al_2O_3 dari bidang hkl (226), sehingga laju pertumbuhan oksida pada paduan TiAl yang diimplantasi Y pada dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² paling rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 1

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan seperti yang telah diuraikan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut

1. Lapisan oksida TiO_2 dan Al_2O_3 yang terbentuk pada paduan TiAl terlihat lebih banyak dibandingkan dengan paduan TiAl yang diimplantasi Y, hal ini menunjukkan kecenderungan pembentukan lapisan oksida TiO_2 dan Al_2O_3 lebih besar selama proses oksidasi pada suhu 800°C .
2. Puncak-puncak oksida TiO_2 dan Al_2O_3 yang dihasilkan paduan TiAl yang diimplantasi ion Y berkurang secara signifikan dibandingkan dengan oksida TiO_2 dan Al_2O_3 yang terbentuk pada material TiAl sebelum diimplantasi. Hal ini dikarenakan selama proses oksidasi pada suhu 800°C terbentuk lapisan $\text{Ti}_4\text{Al}_{43}\text{Y}_6$ dan Y_3Al_2 serta lapisan oksida Y_2O_3 , YTiO_3 dan Y_2TiO_5 yang dapat menghambat difusi oksigen masuk ke permukaan paduan TiAl untuk membentuk lapisan oksida, sehingga mengurangi laju oksidasi paduan TiAl.
3. Kondisi terbaik penambahan ion Y untuk menghambat laju oksidasi paduan TiAl selama siklus termal pada suhu 800°C dicapai pada dosis ion $4,47 \times 10^{15}$ ion/ cm^2 . Dari data pola difraksi paduan TiAl yang diimplantasi Y pada dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/ cm^2 menghasilkan dua puncak lapisan $\text{Ti}_4\text{Al}_{43}\text{Y}_6$ yang mampu menghalangi terbentuknya lapisan oksida nonproteksi Al_2TiO_5 .

DAFTAR PUSTAKA

1. J., MAYER, W.J., QUADAKKERS, P., UNTORO, "Improvement of High Temperature Corrosion Resistance of Titanium Aluminides", Draft Proposal for a Joint German-Indonesian Research Project (2002)
2. A., STRAWBRIDGE and P.Y., HOU, *The Role of Reactive Elements in Oxide Scale Adhesion*, Materials at High Temperatures, Volume 12, Numbers 2-3 (1994)177-181.
3. K.R., TRETHERWEY, J., CHAMBERLAIN, *Corrosion, for Students of Science and Engineering*, Longman Group, UK Limited (1988).
4. H.N., LEE, et al., *Oxidation Behaviour and Mechanical Properties of Yttrium-doped on TiAl Alloys*, Scripta Materialia, Vol. 41 (1999).
5. J.F., ZIEGLER and J.M., MANOYAN, *The Stopping of Ions in Compounds*, Nuclear Instruments and Methods, B35, 215-228 (1988).
6. QUADAKKERS, et al., *Bath to Bath Variations in The Oxidation Behaviour of Alumina Forming Fe-Based Alloys*, Materials and Corrosion, 51 (2000), 196-201.

LAMPIRAN

Tabel 2. Data sudut difraksi (2θ) dan jarak antar bidang (d) paduan TiAl setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Senyawa	2θ (°)	hkl	d (Å)
AlTi	44,5990	002	2,03005
	69,0568	003	1,35900
	70,6245	221	1,33262
Al ₂ Ti	31,7204	310	2,81861
	65,5293	602	1,42335
AlTi ₃	78,1466	222	1,22209
	79,5036	401	1,20460
Al ₅ Ti ₃	24,8629	310	3,57827
TiO ₂	27,5677	110	3,23303
	38,9159	220	2,31241
	39,2000	200	2,29631
	41,3470	111	2,18189
	44,1512	210	2,04960
	48,7894	402	1,86504
	54,4134	320	1,68481
	58,5781	060	1,57456
Al ₂ O ₃	25,6464	012	3,47071
	35,0000	220	2,56164
	35,2500	103	2,54404
	36,1733	121	2,48120
	43,4271	113	2,08208
	54,4134	211	1,68481
	56,7371	203	1,62120
	57,5005	226	1,60148
Al ₂ TiO ₅	32,5932	121	2,74509

Tabel 3. Data sudut difraksi (2θ) dan jarak antar bidang (d) paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Senyawa	2θ (°)	hkl	d (Å)
	44,3367	002	2,04145
	69,2045	003	1,35646
	70,4127	221	1,33611
Al ₂ Ti	31,5707	310	2,83163
	65,3146	602	1,42750
AlTi ₃	77,9448	222	1,22475
	79,3454	401	1,20661
Al ₅ Ti ₃	24,6356	310	3,61077
Ti ₄ Al ₄₃ Y ₆	38,6705	117	2,32652
Y ₃ Al ₂	45,2953	410	2,00045
TiO ₂	27,3405	110	3,25938
	38,9986	220	2,30770
	41,1350	111	2,19265
	54,1928	320	1,69115
	58,3574	060	1,57999
Al ₂ O ₃	34,8104	220	2,57516
	35,0500	103	2,55810
	35,9278	121	2,49759
	43,2313	113	2,09106
	57,3375	226	1,60532
Al ₂ TiO ₅	32,3652	121	2,76391
Y ₂ O ₃	40,6992	113	2,21511
YTiO ₃	66,0841	115	1,41274
Y ₂ TiO ₅	83,1473	212	1,16082

Tabel 4. Data sudut difraksi (2θ) dan jarak antar bidang (d) paduan TiAl yang diimplantasi ion Y pada dosis $4,47 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah proses oksidasi pada suhu 800 °C

Senyawa	2θ (°)	hkl	d (Å)
AlTi	44,4252	002	2,03759
	69,3126	003	1,35461
	70,4757	221	1,33507
Al ₂ Ti	31,6417	310	2,82544
	65,4037	602	1,42578
AlTi ₃	78,0522	222	1,22333
	79,3855	401	1,20610
Al ₅ Ti ₃	24,7164	310	3,59915
Y ₃ Al ₂	45,3620	410	1,99767
Ti ₄ Al ₄₃ Y ₆	21,7768	104	4,07789
	38,7640	117	2,32113
TiO ₂	27,4252	110	3,24950
	39,0709	220	2,30360
	41,2664	111	2,18597
	54,2835	320	1,68854
	58,4242	060	1,57834
Al ₂ O ₃	34,8881	220	2,56960
	35,1533	103	2,55810
	36,0411	121	2,48999
	43,3942	113	2,08358
	54,2835	211	1,68854
Y ₂ O ₃	40,7617	113	2,21186
YTiO ₃	66,1233	115	1,41199
Y ₂ TiO ₅	83,1759	212	1,16049