

PENGARUH IMPLANTASI ELEMEN REAKTIF PADA MATERIAL FeNiCr DAN FeAl UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN OKSIDASI SUHU TINGGI

Sudjatomoko

PTAPB – BATAN, Yogyakarta

Kusminarto

FMIPA – UGM, Yogyakarta

Utari, Anis Yuniati

Fakultas Pasca Sarjana – UGM, Yogyakarta

ABSTRAK

PENGARUH IMPLANTASI ELEMEN REAKTIF PADA MATERIAL FeNiCr DAN FeAl UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN OKSIDASI SUHU TINGGI. Telah dilakukan penelitian tentang pengaruh elemen reaktif, yaitu yttrium dan cerium pada material FeNiCr dan FeAl untuk meningkatkan ketahanannya terhadap oksidasi suhu tinggi. Ion yttrium dan cerium diimplantasikan pada permukaan cuplikan dengan energi 100 keV dan dosis ion bervariasi pada orde 10^{15} ion/cm². Uji oksidasi dilakukan dalam media oksigen kering pada suhu 850 °C dengan enam kali siklus termal, dan karakterisasi komposisi unsur dilakukan menggunakan teknik XRF dan SEM-EDAX. Berdasarkan penelitian tersebut disimpulkan bahwa implantasi ion-ion yttrium dan cerium pada permukaan cuplikan FeNiCr dan FeAl dapat meningkatkan ketahanannya terhadap oksidasi suhu tinggi. Ketahanan oksidasi optimum dari cuplikan FeNiCr diperoleh pada dosis ion yttrium $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm², sedangkan untuk cuplikan FeAl diperoleh pada dosis ion yttrium $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

Kata kunci : elemen reaktif, implantasi ion, dosis ion, oksidasi suhu tinggi

ABSTRACT

EFFECT OF THE REACTIVE ELEMENT IMPLANTATION ON THE FeNiCr AND FeAl MATERIALS FOR IMPROVING ITS HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE. Research concerning the effect of reactive element, i.e. yttrium and cerium on the FeNiCr and FeAl materials for improving its high temperature oxidation resistance has been done. The yttrium and cerium ions were implanted on the surface of samples with energy of 100 keV and variation of ion dose on the order of 10^{15} ion/cm². Oxidation test of the samples were done in dry oxygen media at the temperature of 850 °C with six time of thermal cycling, and characterization of elemental composition of the samples were done by using XRF and SEM-EDAX techniques. Based on these research, it was concluded that the implantation of yttrium and cerium ions on the surface of FeNiCr and FeAl samples could increase its high temperature oxidation. The optimum oxidation resistance of FeNiCr sample was obtained at the yttrium ion dose of $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² and cerium ion dose of $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm², whereas for FeAl sample was obtained at the yttrium ion dose of $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² and cerium ion dose of $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

Key words : reactive element, ion implantation, ion dose, high temperature oxidation

PENDAHULUAN

Penguasaan teknologi untuk mengubah dan memperbaiki sifat-sifat permukaan bahan atau material agar diperoleh material baru dengan sifat mekanik dan sifat fisika yang lebih unggul sangat bermanfaat dalam pengembangan teknologi logam atau metal. Sifat mekanik dan sifat fisika suatu metal berkaitan erat dengan struktur kristalnya. Fenomena ini memungkinkan untuk mengubah sifat mekanik dari

suatu metal dengan cara melakukan proses pengubahan struktur kristalnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk menghasilkan material, khususnya metal dengan sifat baru dan lebih unggul adalah dengan proses implantasi ion. Proses ini adalah merupakan menyisipkan ion ke dalam permukaan material. Dengan teknik implantasi ion, atom-atom diionkan terlebih dahulu di dalam sistem sumber ion, kemudian dipercepat dalam tabung akselerator sebelum diimplantasikan ke dalam permukaan material cuplikan.

Salah satu jenis material yang banyak digunakan untuk elemen pemanas, baik yang berbentuk lembaran maupun kawat, konstruksi mesin penukar panas (*heat exchanger*), komponen turbin uap dan lainnya, harus dipilih suatu material yang tahan terhadap operasi suhu tinggi^[1,2]. Material yang tahan pada operasi suhu tinggi seperti paduan FeNiCr, FeNiAl, FeCrAl dan FeAl, karena selama beroperasi mampu membentuk lapisan oksida pelindung (*protective oxide layer*) seperti khrom oksida (CrO_2) dan aluminium oksida atau sering disebut alumina (Al_2O_3)^[3,4,5]. Lapisan alumina tersebut berkembang sangat lambat dan mempunyai kestabilan termodinamik sangat baik. Kelemahan utama paduan tersebut adalah tidak tahan terhadap operasi di atas suhu 700°C ^[6], karena terjadi kerusakan pada lapisan oksida Al_2O_3 .

Selama proses pertumbuhan oksida akan muncul *stress* atau adanya *strain* yang dihasilkan oleh peristiwa mekanis di dalam komponen pada saat diperbaiki, maka lapisan proteksi yang telah terbentuk cenderung mengelupas (*spallation*). *Stress* juga muncul pada siklus termal yang disebabkan karena adanya perbedaan koefisien pengembangan panas antara lapisan oksida dan material induknya^[1]. Untuk mengatasi masalah tersebut pada umumnya ditambahkan unsur-unsur lain dengan jumlah tertentu. Unsur-unsur yang ditambahkan tersebut dinamakan elemen reaktif (*RE : Reactive Element*), dan yang termasuk elemen reaktif adalah yttrium (Y), cerium (Ce), zirkonium (Zr), hafnium (Hf) dan titanium (Ti). Elemen-elemen reaktif tersebut akan berfungsi sebagai penstabil dan menambah daya rekat (*adherence*) dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi lebih kuat meskipun terjadi siklus termal^[7]. Laju penebalan lapisan oksida yang terbentuk maupun perbandingan difusi Al ke arah luar dengan difusi O ke arah dalam adalah berbeda berdasarkan jenis dan bentuk dari elemen reaktif yang ditambahkan pada material paduan^[8].

Pada makalah ini dilaporkan hasil analisis pengaruh penambahan elemen reaktif Y dan Ce dengan teknik implantasi ion terhadap peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi material FeNiCr dan FeAl. Untuk mengetahui ketahanan terhadap oksidasi suhu tinggi dilakukan uji siklus termal pada suhu 850°C di lingkungan gas oksigen. Selain itu juga dilakukan analisis komposisi unsur dalam cuplikan sebelum proses implantasi dan setelah dilakukan implantasi ion, serta setelah proses siklus termal menggunakan teknik XRF dan EDAX. Diharapkan berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa penambahan elemen reaktif Y dan Ce dengan teknik implantasi ion dapat

meningkatkan sifat ketahanan oksidasi material suhu tinggi, terutama jenis paduan FeNiCr dan FeAl. Dengan demikian hasil penelitian ini melengkapi data-data penelitian sebelumnya, terutama peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi material FeCrAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium^[9], dan diharapkan hasil penelitian tersebut bermanfaat dalam bidang industri sebagai material pengganti paduan super.

TATAKERJA DAN PERCOBAAN

Persiapan Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian adalah material paduan suhu tinggi FeNiCr dan FeAl, serbuk yttrium dan cerium yang masing-masing mempunyai kemurnian 99,9%, kertas ampelas, alkohol dan pasta intan.

Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain terdiri dari alat pemotong cuplikan, peralatan penghalus cuplikan, penggetar ultrasonik, akselerator implantasi ion 200 keV/2 mA buatan PTAPB-BATAN, tabung *furnace* type RTI/AGG : 220 volt/45 ampere dan suhu maksimum 1.000°C , neraca analitis GR Series : beban minimum 0,1 mg dan beban maksimum 210 g, peralatan XRF dan SEM-EDAX.

Material paduan suhu tinggi tersebut dipotong-potong dalam bentuk keping ukuran $10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ kemudian permukaannya dihaluskan menggunakan kertas ampelas, selanjutnya dipoles menggunakan pasta intan dan digosok dengan kain beludru sampai dihasilkan permukaan yang halus dan mengkilap. Untuk menghilangkan kotoran pada permukaan cuplikan dilakukan pencucian menggunakan alkohol dan kemudian dimasukkan dalam penggetar ultrasonik. Pengeringan cuplikan dilakukan dalam oven, kemudian disimpan dalam desikator agar cuplikan tidak terkontaminasi oleh udara.

Proses Implantasi Ion

Penyisipan elemen-elemen reaktif yttrium dan cerium dilakukan dengan menggunakan akselerator implantasi ion 200 keV/2 mA buatan PTAPB-BATAN Yogyakarta. Ada dua besaran penting dalam proses implantasi ion, yaitu kedalaman penetrasi ion pada permukaan material dan distribusi konsentrasi ion yang diimplantasikan. Parameter kedalaman penetrasi ion adalah jenis ion dan energi ion yang diimplantasikan serta jenis material atau bahan; sedangkan parameter yang mempengaruhi distribusi konsentrasi ion adalah arus

berkas ion dan lamanya proses implantasi ion berlangsung. Dalam penelitian ini, dosis ion divariasi dengan mengubah waktu atau lamanya proses implantasi, sedangkan energi dan arus berkas ion dibuat konstan masing-masing 100 keV dan 10 μ A. Dosis ion yttrium dan cerium yang diimplantasikan ke permukaan cuplikan FeNiCr masing-masing adalah $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm², $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm²; sedang dosis ion untuk implantasi pada permukaan cuplikan FeAl masing-masing adalah $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² dan $8,94 \times 10^{15}$ ion/cm².

Uji Oksidasi Siklus Termal

Uji oksidasi dilakukan setelah proses implantasi ion dan penimbangan cuplikan selesai. Uji oksidasi ini dilakukan dalam kondisi siklus termal dengan menggunakan tabung *furnace*. Sebagai tempat cuplikan digunakan tabung kaca jenis kuarsa yang tahan sampai suhu 1.000 °C. Uji oksidasi dilakukan dalam media oksigen kering, yaitu dengan mengalirkan oksigen dengan laju aliran 4,17 cc/menit dan tekanan 1 bar ke dalam tabung selama 6 siklus termal. Setiap siklus termal adalah 7 jam pemanasan pada suhu 850 °C dan pendinginan selama 17 jam pada suhu kamar 27 °C, setelah itu cuplikan ditimbang dan dicatat perubahan beratnya (Δm) kemudian dibuat grafik antara perubahan berat cuplikan dengan waktu oksidasi.

Karakterisasi XRF

Untuk menganalisis komposisi unsur di dalam cuplikan setelah proses implantasi ion digunakan teknik XRF, yaitu suatu metode analisis yang berdasarkan pada pengukuran energi dan intensitas spektra sinar-X yang dihasilkan sebagai akibat interaksi atom-atom unsur cuplikan yang dikenai radiasi sumber pegeksitasi (radioisotop). Radiasi sumber radioisotop terhadap cuplikan akan menghasilkan sinar-X yang selanjutnya akan mengenai detektor, sehingga akan dihasilkan denyut listrik atau pulsa. Energi sinar-X dari cuplikan yang terukur digunakan sebagai dasar analisis kualitatif, yang bertujuan untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung dalam suatu cuplikan. Intensitas spektrum sinar-X dipakai sebagai dasar analisis kuantitatif, yang dapat digunakan untuk mengetahui perbandingan unsur-unsur di dalam cuplikan, serta digunakan untuk mengetahui prosentase unsur yang ada dalam cuplikan jika diketahui standarnya.

Karakterisasi SEM-EDAX

Untuk mengetahui apakah elemen-elemen reaktif telah terimplantasi pada permukaan cuplikan,

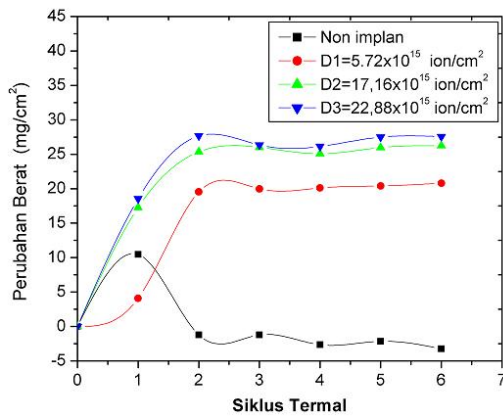
selain dilakukan dengan menggunakan teknik XRF, dalam penelitian ini juga dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*). Peralatan SEM ini menggunakan hamburan balik dan pantulan sekunder dari berkas elektron setelah berkas elektron berinteraksi dengan materi. Hasil interaksi tersebut berupa pantulan elektron-elektron sekunder, elektron-elektron yang terhambur dan radiasi sinar-X karakteristik akan memberikan informasi mengenai keadaan cuplikan seperti bentuk permukaan (topografi) dan komposisi kimia yang terkandung dalam cuplikan. Radiasi sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh cuplikan dapat memberikan informasi secara kualitatif dan kuantitatif tentang komposisi kimia dari cuplikan pada daerah yang sangat kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penambahan elemen-elemen reaktif seperti yttrium dan cerium dengan teknik implantasi ion biasanya akan efektif apabila jumlahnya antara 0,1% sampai dengan 2 % berat serta terdistribusi merata pada kedalaman sekitar 500 Å. Elemen reaktif tersebut akan berperan sebagai penstabil dan menambah daya lekat dari lapisan oksida protektif yang telah terbentuk sehingga menjadi kuat walaupun terjadi siklus termal.

Dalam penelitian ini dilakukan uji siklus termal untuk cuplikan FeNiCr dalam oksigen pada suhu 850 °C dengan pemanasan 7 jam dan waktu pendinginan 17 jam serta dilakukan dalam 6 kali siklus termal. Hasil uji siklus termal dari cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan setelah implantasi ion yttrium ditampilkan pada Gambar 1, dan untuk cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium ditampilkan pada Gambar 2.

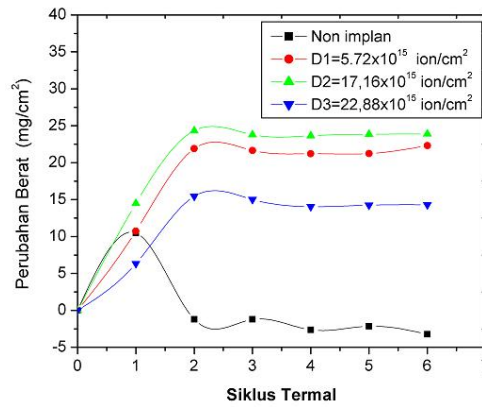
Berdasarkan hasil uji siklus termal pada Gambar 1 terlihat bahwa secara umum penambahan elemen reaktif yttrium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeNiCr terhadap oksidasi suhu tinggi jika dibandingkan dengan cuplikan tanpa implantasi. Pada proses oksidasi sampai siklus 2 yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Selanjutnya perubahan berat cuplikan relatif kecil sebagai akibat terhentinya proses oksidasi lanjut, hal ini disebabkan karena adanya elemen reaktif yang dapat menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam cuplikan.



Gambar 1. Laju oksidasi cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi dengan ion yttrium pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

Namun akibat terjadinya siklus termal maka terjadi pengelupasan pada lapisan oksida yang telah terbentuk. Hal ini terlihat dengan terjadinya pengurangan berat pada interval siklus termal 2 – 3, yaitu 14 jam hingga 21 jam pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan dosis $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, kemudian pada interval siklus termal berikutnya terjadi penambahan berat hingga terlihat mendarat. Sedangkan pada dosis $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ terjadi pengurangan berat dalam interval siklus termal 3 – 4, yaitu 21 hingga 28 jam, kemudian terjadi penambahan berat hingga terlihat agak mendarat pada interval siklus termal berikutnya. Hasil-hasil tersebut memperlihatkan bahwa cuplikan FeNiCr yang diimplantasi ion yttrium, pengelupasan tidak sampai terjadi di dalam substrat karena yttrium oksida yang terbentuk menjadi lapisan pelindung bagi material induk dan sekaligus menambah daya lekat antara oksida dan material induknya. Ketahanan oksidasi suhu tinggi optimum diperoleh pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium dosis $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$. Sedangkan cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi setelah proses oksidasi > 14 jam terjadi pengelupasan lapisan oksida protektif dari substratnya, hal ini ditandai dengan berkurangnya berat cuplikan.

Pada Gambar 2 ditampilkan hasil uji siklus termal dari cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium. Pada proses oksidasi pada siklus termal 0 - 2, yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif.



Gambar 2. Laju oksidasi cuplikan FeNiCr yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi dengan ion cerium pada dosis $D_1 = 5,72 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$, $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ dan $D_3 = 22,88 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

Selanjutnya perubahan berat cuplikan relatif kecil sebagai akibat terhentinya proses oksidasi lanjut, hal ini disebabkan karena adanya elemen reaktif yang dapat menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam cuplikan. Dalam interval siklus termal 2 – 3, yaitu antara 14 hingga 21 jam terlihat terjadinya pengurangan berat untuk semua dosis ion, karena terjadi pengelupasan lapisan oksida yang telah terbentuk; kemudian pada interval siklus termal berikutnya terjadi penambahan berat hingga terlihat mendarat karena terbentuknya kembali lapisan oksida protektif sebagai lapisan pelindung bagi material induknya. Ketahanan oksidasi suhu tinggi optimum diperoleh pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium dosis $D_2 = 17,16 \times 10^{15} \text{ ion/cm}^2$.

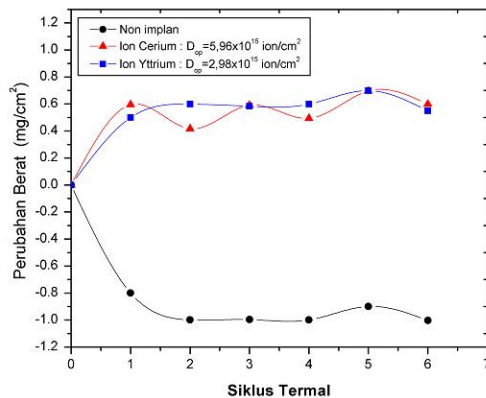
Untuk mengetahui komposisi unsur dalam cuplikan FeNiCr sebelum dan setelah proses implantasi ion dilakukan karakterisasi dengan teknik XRF. Hasil analisis komposisi unsur dalam cuplikan FeNiCr tersebut disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeNiCr pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa cuplikan FeNiCr standar tidak hanya terdiri dari unsur Fe, Ni dan Cr, tetapi juga terdapat unsur Mo dengan kadar 6,1 (% massa). Unsur-unsur lain selain Mo misalnya Al kemungkinan ada, tetapi tidak terdeteksi oleh alat XRF. Pada cuplikan FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium terdeteksi adanya unsur yttrium dengan kadar 1,2 (% massa), dan cuplikan yang diimplantasi dengan ion cerium terdeteksi adanya unsur cerium dengan kadar 0,8 (% massa).

Tabel 1. Hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeNiCr dengan teknik XRF

No.	Jenis Cuplikan	Jenis Unsur	% massa
1.	FeNiCr tanpa implantasi	Fe	47,7
		Ni	22,5
		Cr	23,6
		Mo	6,1
2.	FeNiCr yang diimplantasi dengan ion yttrium : dosis ion $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi 100 keV	Fe	62,3
		Ni	14,2
		Cr	21,4
		Mo	0,8
		Y	1,2
3.	FeNiCr yang diimplantasi dengan ion cerium : dosis ion $5,72 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi 100 keV	Fe	50
		Ni	22,4
		Cr	22,1
		Mo	4,7
		Ce	0,8

Pada penelitian ini selain digunakan cuplikan FeNiCr, juga digunakan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium pada energi yang sama yaitu 100 keV, akan tetapi dengan dosis ion yang berbeda berdasarkan pertimbangan karena material dasar yang digunakan berbeda dan untuk mendapatkan peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi yang optimum. Selain dibahas tentang laju oksidasi juga dilakukan analisis komposisi dan morfologi cuplikan FeAl sebelum dan setelah implantasi ion yttrium dan cerium.



Gambar 3. Laju oksidasi cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi dan yang diimplantasi ion yttrium dengan dosis optimum $D_{op} = 2,98 \times 10^{15}$ ion/cm², dan ion cerium dengan dosis optimum $D_{op} = 5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².

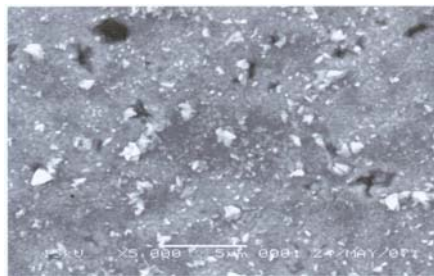
Berdasarkan hasil uji siklus termal pada Gambar 3 terlihat bahwa penambahan elemen reaktif yttrium dan cerium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeAl terhadap oksidasi suhu tinggi, jika dibandingkan dengan cuplikan tanpa diimplantasi. Untuk cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium, proses oksidasi pada siklus termal 0 – 2, yaitu antara 0 hingga 14 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Pada siklus termal 2 -3 dan berikutnya pada siklus termal 3 – 4 relatif stabil tidak terjadi penambahan berat cuplikan, akan tetapi terjadi pembentukan lapisan oksida pada siklus termal 4 – 5 dan kemudian terjadi pengelupasan lapisan oksida pada siklus termal 5 – 6 yang ditandai dengan pengurangan berat cuplikan. Berdasarkan uji siklus termal tersebut dapat diketahui bahwa dosis ion yttrium optimum diperoleh pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm².

Pada Gambar 3 juga ditampilkan hasil uji siklus termal cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium. Berdasarkan hasil uji siklus termal diketahui bahwa implantasi ion cerium dengan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² yang mempunyai efek meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi dari cuplikan FeAl, sedangkan pada dosis ion cerium $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² dan dosis ion cerium $8,94 \times 10^{15}$ ion/cm² tidak terjadi peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi. Pada siklus termal 0 – 1, yaitu antara 0 hingga 7 jam terjadi penambahan berat sangat signifikan sebagai akibat proses oksidasi yang terjadi karena adanya penangkapan atom-atom oksigen oleh cuplikan membentuk oksida protektif. Pada siklus termal 1 – 2 terjadi sedikit pengurangan berat karena terjadi pengelupasan lapisan oksida; selanjutnya pada siklus 2 – 3 terjadi sedikit penambahan berat karena terjadi lagi pertumbuhan lapisan oksida proteksi. Hal ini terjadi secara berulang hingga siklus termal ke 6, dan secara keseluruhan dengan implantasi ion cerium pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² terjadi peningkatan ketahanan terhadap oksidasi suhu tinggi.

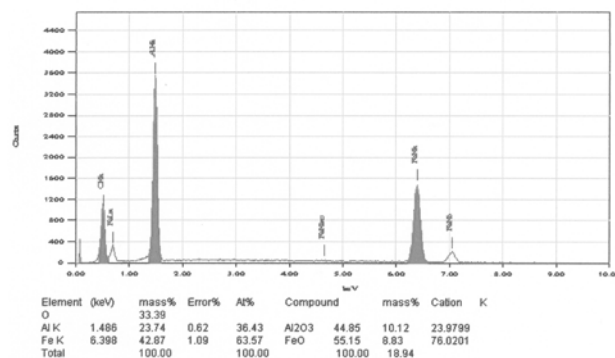
Hasil karakterisasi komposisi unsur dalam cuplikan FeAl setelah proses oksidasi hingga siklus termal ke enam disajikan pada Tabel 2 menggunakan teknik EDAX. Karakterisasi EDAX tersebut menghasilkan kandungan unsur-unsur pada cuplikan FeAl dan lapisan oksida yang terbentuk dalam prosen massa. Berdasarkan hasil analisis komposisi unsur yang disajikan pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi mengandung unsur-unsur Fe: 42,87 (% massa), Al: 23,74 (% massa) dan O: 33,39 (% massa), serta

Tabel 2. Hasil analisis komposisi unsur cuplikan FeAl dengan teknik EDAX

No.	Jenis Cuplikan	Jenis Unsur	% massa	Jenis Oksida	% massa
1.	FeAl tanpa implantasi	Fe	42,87	Al ₂ O ₃	44,85
		Al	23,74	FeO	55,15
		O	33,39		
2.	FeAl diimplantasi ion yttrium dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi ion 100 keV, pada 6 kali siklus termal	Fe	29,50	Al ₂ O ₃	61,37
		Al	32,48	FeO	37,95
		O	37,49	Y ₂ O ₃	0,68
		Y	0,54		
3.	FeAl diimplantasi ion cerium dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm ² , energi ion 100 keV, pada 6 kali siklus termal	Fe	16,17	Al ₂ O ₃	78,48
		Al	41,54	FeO	20,80
		O	41,71	CeO ₂	0,72
		Ce	0,59		



(a)

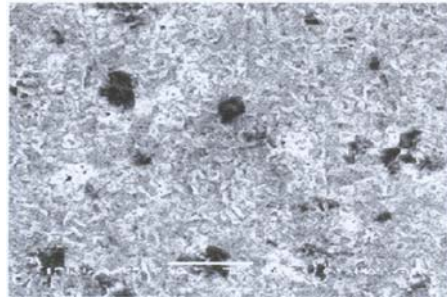


(b)

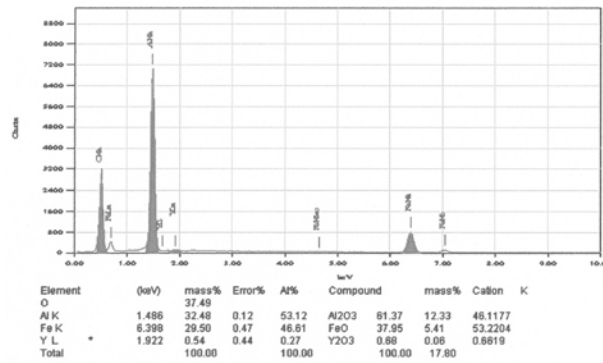
Gambar 4. (a) Morfologi permukaan cuplikan FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl tanpa implantasi setelah mengalami enam kali siklus termal.

oksida Al₂O₃: 44,85 (%massa) dan FeO: 55,15 (%massa). Hasil analisis komposisi unsur dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² memperlihatkan kandungan unsur Fe: 29,50 (% massa), Al: 32,48 (%massa), O: 37,49 (%massa) dan Y: 0,54 (%massa), serta oksida Al₂O₃: 61,37 (% massa), FeO: 37,95 (% massa) dan Y₂O₃: 0,68 (% massa). Sedangkan hasil analisis komposisi unsur dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium

pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² memperlihatkan kandungan unsur-unsur Fe: 16,17 (% massa), Al: 41,54 (% massa), O: 41,71 (% massa) dan Ce: 0,59 (% massa), serta oksida Al₂O₃: 78,48 (%massa), FeO: 20,80 (% massa) dan CeO₂: 0,72 (% massa). Berdasarkan data-data pada Tabel 2 tersebut terbentuk lapisan yttrium oksida dan cerium oksida pada masing-masing cuplikan yang diimplantasi dengan ion yttrium dan ion cerium, dan lapisan oksida tersebut menjadi lapisan pelindung

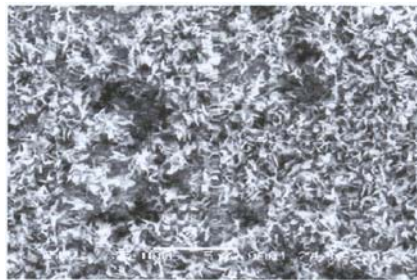


(a)

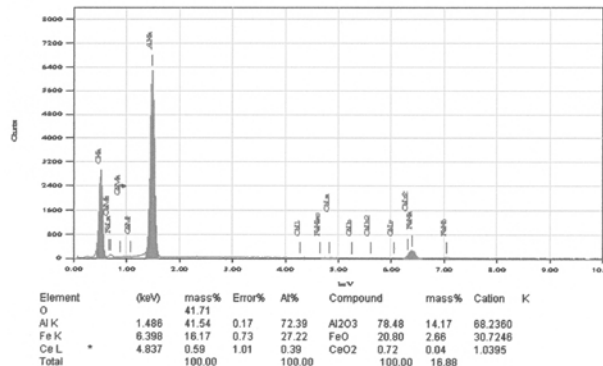


(b)

Gambar 5. (a) Morfologi permukaan material FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl yang diimplantasi ion yttrium dengan dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah mengalami enam kali siklus termal.



(a)



(b)

Gambar 6. (a) Morfologi permukaan material FeAl dan (b) kandungan unsur cuplikan FeAl yang diimplantasi ion cerium dengan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm² setelah mengalami enam kali siklus termal.

bagi material induk dan sekaligus menambah daya lekat antara oksida dan material induknya.

Hasil karakterisasi menggunakan SEM memberikan morfologi permukaan material FeAl, baik yang tidak diimplantasi maupun yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium setelah melewati siklus termal ditampilkan pada Gambar 4(a), 5(a) dan 6(a). Berdasarkan hasil karakterisasi dengan SEM terlihat jelas perbedaan struktur morfologi cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi dengan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium. Pada cuplikan FeAl yang tidak diimplantasi menunjukkan permukaan yang tidak rata dan tidak teratur, dan terbentuk lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO yang mudah mengelupas jika mengalami oksidasi karena daya lekatnya yang lemah. Sedangkan morfologi permukaan cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium dan cerium terlihat lebih teratur dan terjadi perubahan butir-butir yang semakin besar. Pada permukaan cuplikan terbentuk lapisan oksida yttrium dan oksida cerium yang mempunyai daya lekat kuat, sehingga dapat melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi.

Karakterisasi EDAX menghasilkan kandungan unsur-unsur pada cuplikan FeAl dan hasil karakterisasi ditampilkan pada Gambar 4(b), 5(b) dan 6(b). Pada Gambar 4(b) adalah hasil karakterisasi EDAX dari cuplikan yang tidak diimplantasi terdapat unsur-unsur O, Al, Fe serta lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO. Pada Gambar 5(b) ditampilkan cuplikan yang diimplantasi dengan ion yttrium terdapat unsur-unsur O, Fe, Al, Y serta lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan Y_2O_3 , dan lapisan oksida yttrium yang paling banyak diperoleh pada dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm². Unsur yttrium sebesar 0,54 (% massa) muncul sebagai hasil proses implantasi ion, dan setelah dilakukan uji oksidasi pada suhu 850 °C dan pada siklus termal ke enam terlihat bahwa selain terbentuk lapisan oksida Al_2O_3 dan FeO, juga terbentuk lapisan yttrium oksida Y_2O_3 : 0,68 (% massa) yang mempunyai daya lekat kuat sehingga dapat melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi.

Gambar 6(b) menampilkan hasil karakterisasi EDAX dari cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion cerium pada dosis $5,96 \times 10^{15}$ io/cm². Pada permukaan cuplikan tersebut terdapat unsur-unsur O, Al, Fe, Ce dan lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan CeO_2 , dan unsur cerium 0,59 (% massa) muncul sebagai hasil proses implantasi ion. Seperti pada cuplikan FeAl yang diimplantasi dengan ion yttrium, setelah dilakukan uji oksidasi pada suhu 850 °C dan siklus termal ke enam, terlihat adanya lapisan oksida Al_2O_3 , FeO dan juga lapisan cerium

oksida CeO_2 : 0,72 (% massa) yang mampu melindungi permukaan cuplikan dari oksidasi suhu tinggi. Dengan demikian implantasi elemen reaktif baik yttrium maupun cerium dapat meningkatkan ketahanan cuplikan FeAl terhadap oksidasi suhu tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan elemen reaktif yttrium dan cerium pada cuplikan FeNiCr dan FeAl dengan teknik implantasi untuk meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi memberikan hasil yang cukup signifikan bergantung terutama pada dosis ion yang diberikan, dan juga pada jenis material cuplikan yang digunakan.
2. Berdasarkan hasil uji oksidasi pada suhu 850 °C selama enam kali siklus termal dapat diketahui bahwa nilai dosis optimum ion yttrium adalah $22,88 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeNiCr dan dosis $2,98 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeAl; sedangkan nilai dosis optimum ion cerium sebesar $17,16 \times 10^{15}$ ion/cm² pada cuplikan FeNiCr dan dosis $5,96 \times 10^{15}$ ion/cm².
3. Peningkatan ketahanan oksidasi suhu tinggi pada cuplikan FeNiCr dan FeAl masing-masing terjadi karena adanya elemen reaktif yttrium dan cerium yang diimplantasikan pada permukaan cuplikan, yang hasilnya ditunjukkan dari hasil karakterisasi dengan teknik XRF untuk cuplikan FeNiCr dan dengan teknik EDAX untuk cuplikan FeAl. Khususnya dengan teknik EDAX dapat dilihat terbentuknya lapisan oksida Al_2O_3 yang disertai dengan terbentuknya lapisan yttrium oksida Y_2O_3 dan cerium oksida CeO_2 . Lapisan oksida elemen reaktif tersebut menghambat terjadinya pengelupasan kerak oksida yang telah terbentuk sebelumnya, dan menghambat laju masuknya gas oksigen ke dalam material induk sehingga oksidasi lebih lanjut tidak terjadi, serta menambah daya lekat lapisan oksida yang terbentuk dengan material induk sehingga tidak mudah terjadi pengelupasan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Utari dan Sdr. Anis Yuniati, Mahasiswa Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada yang telah membantu melakukan eksperimen dan analisis data, sehingga