

## ANALISIS ELEMEN HINGGA TEGANGAN TERMAL PADA PADUAN Fe-11Al

Dyah Sulistyantiyas<sup>1</sup>, A. M. Sunardi<sup>2</sup> dan Syahril<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) - BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang, 15314

<sup>2</sup> Pusbang Sistem Reaktor Maju (P2SRM) - BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang, 15314

### ABSTRAK

**ANALISIS ELEMEN HINGGA TEGANGAN TERMAL PADA PADUAN Fe-11Al.** Program ANSYS berbasis Metode Elemen Hingga telah digunakan untuk menganalisis tegangan termal pada lapisan alumina yang terbentuk selama oksidasi suhu tinggi pada paduan Fe-11Al. Model simulasi mengasumsikan perilaku elastik murni dari lapisan oksida serta perilaku elastik-plastik ideal dari logam substratnya. Pengkajian terhadap efek relaksasi tegangan oleh deformasi plastik substrat dan efek geometri oksida yang terbentuk oleh oksida berbentuk flat, konvolusi, dan konvolusi berpori telah dilakukan. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa di bawah kondisi suhu tertentu, tegangan tarik dari oksida berbentuk konvolusi berpori mencapai 678 MPa - 2 GPa dan dapat melebihi kekuatan tarik  $\sigma_x$  dari lapisan alumina. Hasil perhitungan tegangan ini bersesuaian dengan pengamatan.

**Kata kunci :** ANSYS, metode elemen hingga, konvolusi, konvolusi berpori.

### ABSTRACT

**FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THERMAL STRESSES IN Fe-11Al ALLOYS.** Thermal stresses in alumina formed during high temperature oxidation of Fe-11Al alloys have been studied using ANSYS Program, a software package based on Finite Element Methods. Simulation model assumed pure elastic behavior of the oxide and ideal elastic-plastic behavior of the substrate metal. Study on the effect of stress relaxation by substrate plastic deformation and geometry effect brought by oxide flat, convolution, and porosity convolution has been carried out. The calculation results show that under some temperature cycling conditions tensile stress in the oxide in the order of 678 MPa - 2 GPa could develop, which exceeded the typical values  $\sigma_x$  of alumina strength. The analyzed value of oxide stress were found to be in a reasonably good agreement with the experiment results.

**Key words :** ANSYS, finite element methods, convolution, porosity convolution.

### PENDAHULUAN

Paduan besi-aluminium merupakan bahan struktur yang sangat menarik karena mempunyai sifat fisik dan mekanik yang baik, berharga murah, dan tahan korosi suhu tinggi. Tetapi paduan ini belum dapat diproduksi secara komersial karena kesulitan di dalam proses fabrikasi. Paduan ini bersifat getas pada suhu kamar.

Beberapa penelitian telah banyak dilakukan untuk meningkatkan *formability* paduan ini [1-5]. Ketahanan korosi suhu tinggi bahan ini juga sudah banyak dipelajari [6-8], tetapi data literatur sebagian besar bersifat empiris.

Makalah ini melaporkan hasil kajian analitis melalui pemodelan untuk menganalisis tegangan termal pada lapisan oksida yang terbentuk pada oksidasi suhu tinggi. Hasil pemodelan digunakan untuk menjelaskan hasil pengamatan.

### BAHAN DAN TATA KERJA

Basis analisis untuk pemodelan ini adalah paduan Fe-11Al yang telah dioksidasi pada suhu 1200 °C selama 100 jam. Morfologi lapisan oksida yang terbentuk ditunjukkan pada Gambar 1 [6]. Berdasarkan hasil pengamatan tersebut dibuat pemodelan dan simulasi menggunakan program ANSYS 5.7, sebuah paket *software* multiguna berbasis Metode Elemen Hingga. Pemodelan dilakukan dengan mengasumsikan bahwa lapisan oksida berperilaku elastik murni dan logam substratnya berperilaku elastik-plastik ideal. Kemudian telah diabaikan juga pengaruh perayapan, sehingga model tidak memprediksi kebergantungan laju pendinginan terhadap tegangan.

Gagasan utama dari studi ini adalah memodelkan hasil eksperimen [6] berdasarkan perhitungan simulasi ANSYS untuk memeriksa pengaruh tegangan relaksasi



Gambar 1. Tampang atas lapisan pelindung oksida paduan Fe-11Al

oleh deformasi plastik substrat dan pengaruh perubahan geometri oksida berbentuk flat, konvolusi dan konvolusi berpori. Distribusi tegangan di dalam oksida dan logam substrat ditentukan setelah proses pendinginan dari suhu oksidasi 1200 °C bervariasi terhadap beberapa parameter sistem. Distribusi tegangan yang diperoleh ini dapat digunakan untuk memprediksi skala kritis permukaan, dimana kegagalan/cacat seringkali terjadi.

## METODE PERHITUNGAN

### Tegangan Termal di Dalam Oksida

Ketebalan lapisan alumina yang terbentuk selama oksidasi suhu tinggi dari paduan Fe-11Al biasanya mengikuti hukum laju parabolik [8]

$$\xi^2 \approx D_{eff} t \approx k_x \cdot t \quad \dots \dots \dots (1)$$

dimana,

- $\xi$  : ketebalan lapisan oksida
- $D_{eff}$  : koefisien difusi efektif,
- $k_x$  : konstanta pertumbuhan parabolik ketebalan lapisan oksida
- $t$  : waktu oksidasi

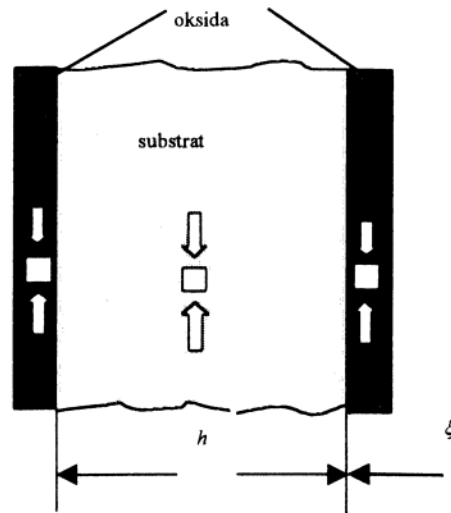
Contoh kasus paling sederhana seperti ditunjukkan oleh Gambar 2 adalah spesimen bidang yang dioksidasi dengan panjang tak hingga dan lebar tertentu. Jika hukum keseimbangan mekanik dipenuhi, maka hubungan antara tegangan rata-rata di oksida dan di substrat menjadi :

$$2\sigma_1\xi + \sigma_2h = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

dimana,

- $\sigma_1$  : tegangan rata-rata di oksida
- $\sigma_2$  : tegangan rata-rata di substrat
- $\xi$  : ketebalan oksida
- $h$  : ketebalan substrat

Tegangan pada lapisan oksida dan substrat akan terbentuk selama pendinginan akibat perbedaan koefisien ekspansi termal antara oksida  $\alpha_{ox}$  dan substrat  $\alpha_m$ . Tegangan yang timbul akibat pertumbuhan dalam oksida selama proses oksidasi jauh lebih rendah dibandingkan tegangan yang terjadi selama pendinginan, sehingga dapat diabaikan.



Gambar 2. Tampang lintang distribusi tegangan spesimen flat tak hingga

Dengan memasukkan asumsi perilaku elastik murni dari kedua fase oksida dan logamnya, maka tegangan rata-rata dalam skala oksida menjadi :

$$\sigma_1 = - \frac{E_{ox} \Delta T (\alpha_m - \alpha_{ox})}{(1 - \nu) \left( 1 + \frac{E_{ox} h}{E_m \xi} \right)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

dan tegangan rata-rata dalam substrat menjadi :

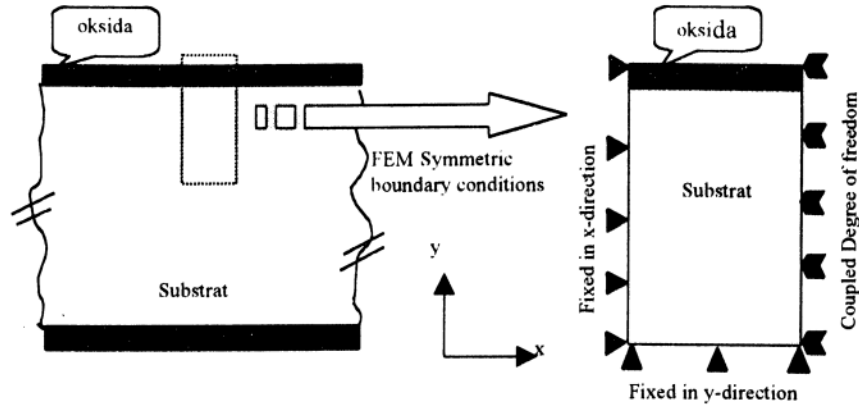
$$\sigma_2 = \frac{E_m \Delta T (\alpha_m - \alpha_{ox})}{(1 - \nu) \left( 1 + \frac{E_{ox} h}{E_m \xi} \right)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

dimana,

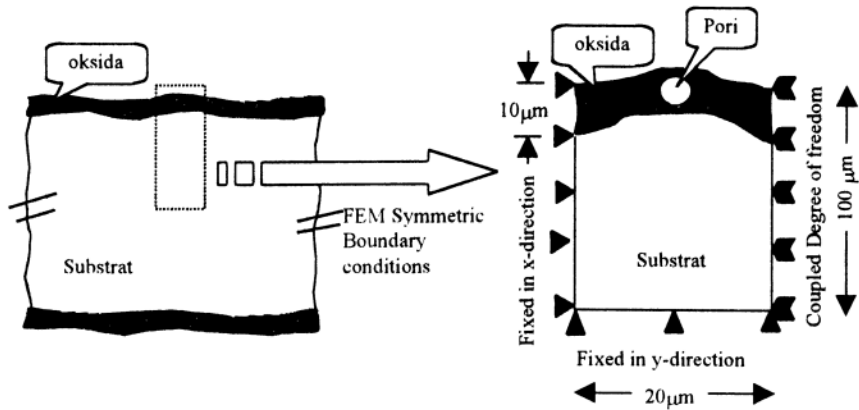
- $E$  : modulus elastisitas
- $\Delta T$  : perubahan temperatur
- $\nu$  : poisson's ratio (diasumsikan sama pada kedua fasa)
- $h$  : ketebalan substrat
- $\xi$  : ketebalan oksida
- $\alpha_{ox}$  : koefisien ekspansi termal dari oksida
- $\alpha_m$  : koefisien ekspansi termal dari logam

### Deskripsi Simulasi

Untuk memprediksi tegangan sisa dalam oksida yang disebabkan oleh proses pendinginan, dikembangkanlah model elemen hingga. Model ini terdiri dari 2 bagian geometri, masing-masing oksida dan substrat, dengan asumsi antar muka oksida dan logamnya terikat secara ideal. Rekaman perubahan suhu telah digunakan untuk menghitung tegangan termal yang dibangkitkan selama proses pendinginan. Model ini diset oleh perhitungan transien dengan perilaku elastik/plastik ideal substrat logam. Seperti telah disebutkan bahwa tegangan pertumbuhan oksida diabaikan, sehingga diasumsikan bahwa system dalam kondisi bebas tegangan pada awal pendinginan.



Gambar 3. Skematik 2 dimensi model oksida flat



Gambar 4. Skematik 2 dimensi model oksida konvolusi

Model simulasi 2 dimensi telah digunakan untuk penyederhanaan, dimana cukup valid untuk bidang tak hingga. Gambar 3 adalah skematik 2 dimensi untuk model oksida flat. Sedangkan Gambar 4 adalah skematik 2 dimensi untuk model oksida konvolusi dan konvolusi berpori. Analisis yang digunakan mengasumsi pada kondisi regangan bidang, dimana semua regangan dalam arah normal  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  sama dengan 0. Sifat-sifat bahan yang digunakan di dalam model ini tercantum dalam Tabel 1. Kedua fasa, baik oksida maupun logamnya, dipertimbangkan bersifat isotropik dan homogen, sedangkan untuk mensimulasikannya digunakan sifat kebergantungan antara suhu plastisitas substrat dan sifat plastik ideal logam.

Tabel 1. Sifat fisik dan mekanik dari substrat dan oksida yang digunakan dalam model.

Material Property	Fe-11Al (substrat)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (oksida)
Modulus Young [GPa]	210	380
Poisson's ratio	0.3	0.25
CTE [1/K]	13e-6	8e-6
Yield strength, MPa		
20 °C	510	-
600 °C	185	-
800 °C	55	-
1000 °C	25	-
1200 °C	10	-

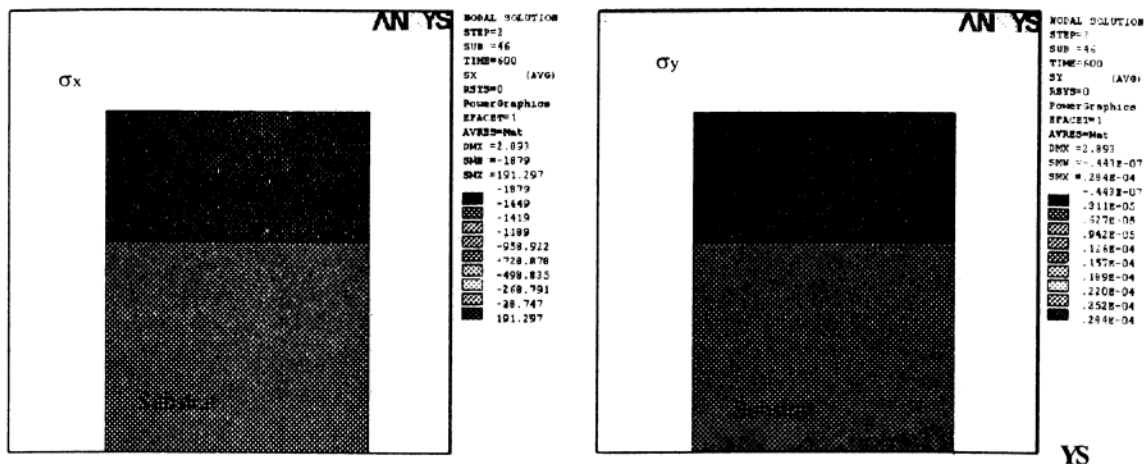
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Model Oksida Flat

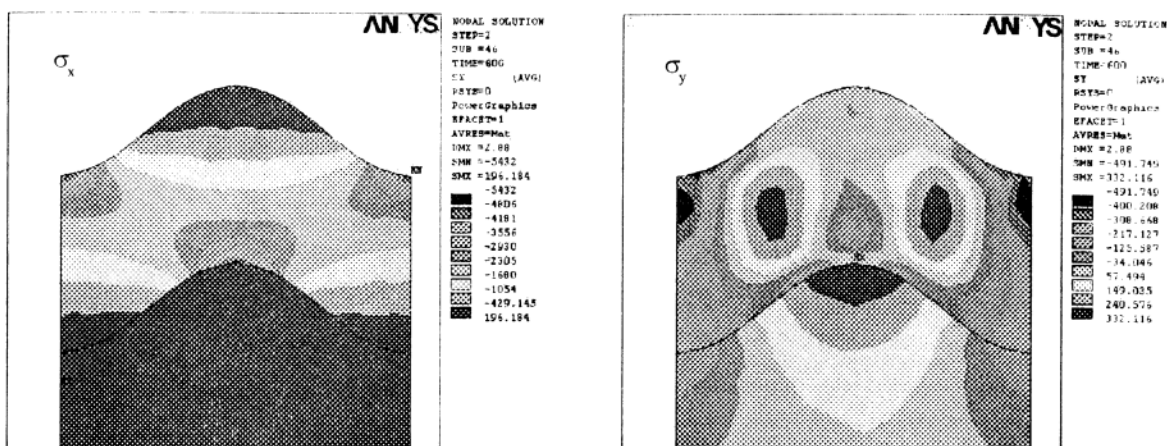
Pemodelan paling sederhana dengan geometri spesimen flat seperti ditampilkan pada Gambar 5 dimaksudkan untuk melihat sifat plastisitas logam mempengaruhi nilai tegangan. Seperti terlihat pada Gambar 5, ternyata gradien tegangan pada kedua fasa tidak teramat. Berdasarkan nilai tegangan hasil perhitungan diketahui bahwa pada daerah oksida tegangan bernilai negatif (di atas -38 MPa) yang berarti pada daerah tersebut didominasi oleh tegangan kompresif. Sedangkan pada daerah substrat tegangan bernilai positif (190 MPa - 2800 MPa) yang berarti bahwa pada daerah tersebut tegangan tarik (*tensile*) lebih dominan.

### Model Oksida Konvolusi

Pada kenyataannya, hampir tidak pernah ditemui lapisan oksida berbentuk flat. Karena itu pendekatan dengan model oksida konvolusi perlu dilakukan. Hasil perhitungan untuk geometri oksida konvolusi dapat dilihat pada Gambar 6. Nilai tegangan *tensile* pada arah-x (196 MPa) terlihat mendominasi daerah oksida di puncak lekukan (konvolusi) dan nilai tegangan kompresif (-5432 MPa) tampak mendominasi bagian bawah daerah oksida yang berbatasan dengan puncak

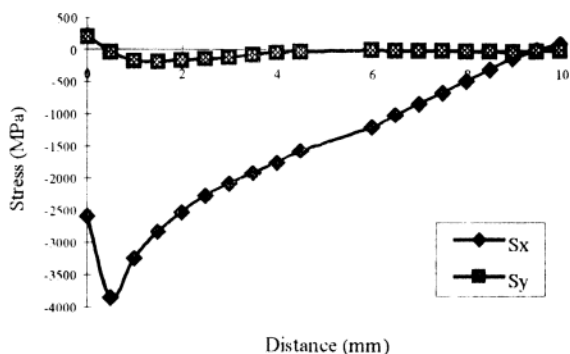


Gambar 5. Distribusi tegangan setelah pendinginan dalam lapisan oksida  $\alpha$ -alumina dengan ketebalan oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $10\mu\text{m}$  dan ketebalan substrat logam (Fe-11Al)  $200\mu\text{m}$  dengan model oksida flat.



Gambar 6. Distribusi tegangan setelah pendinginan dalam lapisan oksida  $\alpha$ -alumina dengan ketebalan oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $10\mu\text{m}$  dan ketebalan substrat logam (Fe-11Al)  $200\mu\text{m}$  dengan model oksida konvolusi.

lekukan daerah substrat dan juga daerah di lembah lekukan. Nilai tegangan maksimal pada arah-y ( $332\text{ MPa}$ ) terlihat mendominasi daerah puncak lekukan pada substrat dan daerah pertengahan di bawah puncak lekukan pada oksida. Nilai tegangan minimal ( $-490\text{ MPa}$ ) mendominasi daerah lembah lekukan di permukaan oksida.



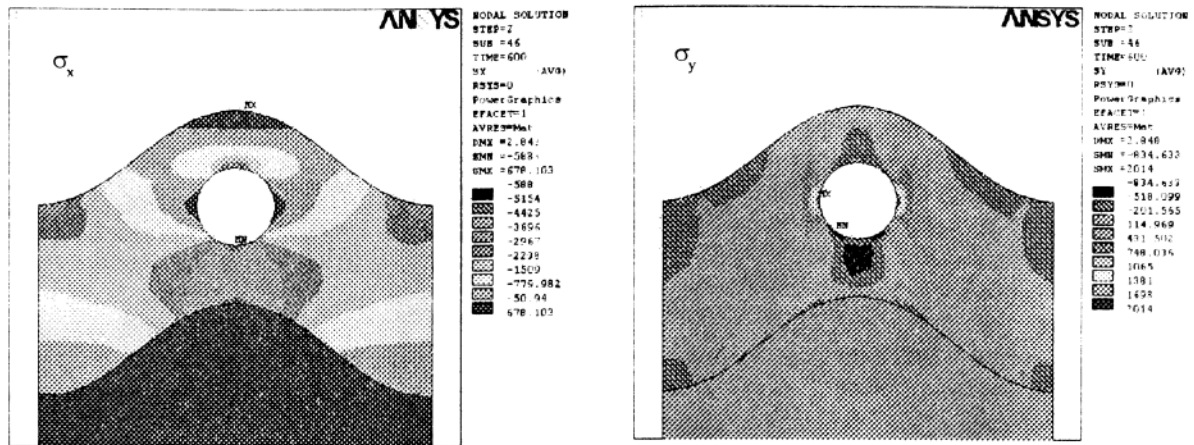
Gambar 7. Hubungan tegangan pada arah-x ( $S_x$ ) dan tegangan arah-y ( $S_y$ ) terhadap jarak pada model oksida konvolusi.

Grafik pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa tegangan pada arah-x didominasi oleh tegangan kompresif, sedangkan tegangan pada arah-y didominasi oleh tegangan tensile.

### Model Konvolusi Berpori

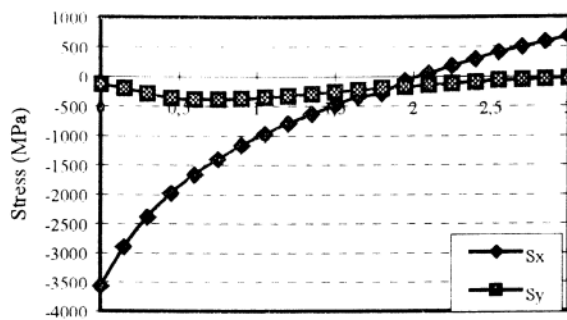
Pada kasus *cracking* yang terjadi pada lapisan oksida pelindung yang terbentuk pada paduan Fe-11Al seperti tampilan Gambar 1, didekati dengan model simulasi berbentuk konvolusi berpori (berlubang). Hasil perhitungan seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Terlihat bahwa tegangan maksimal ( $678\text{ MPa} - 2\text{ GPa}$ ) terdistribusi pada daerah di sekitar *pore* dan juga di bawah puncak lekukan oksida. Akibatnya dapat dipahami bahwa kemungkinan terbesar terjadinya *cracking* memang di daerah tersebut, persis seperti yang terjadi pada hasil percobaan (Gambar 1).

Pada Gambar 9 terlihat bahwa distribusi tegangan pada daerah di atas *pore* semakin membesar menuju ke kekuatan tariknya sehingga *cracking* pada lapisan permukaan oksida sangat mungkin terjadi. Sedangkan

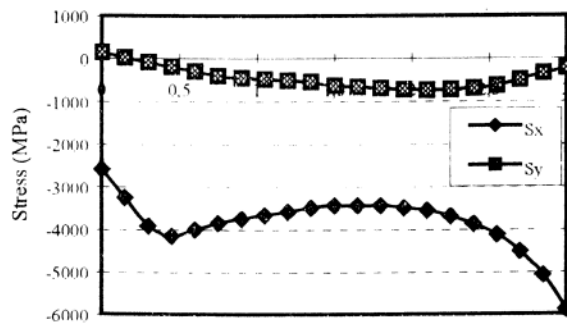


Gambar 8. Hubungan tegangan pada arah-x ( $S_x$ ) dan tegangan arah-y ( $S_y$ ) terhadap jarak pada model oksida konvolusi berpori.

distribusi tegangan pada daerah di bawah kurva masih didominasi oleh tegangan *kompresif*.



(a)



(b)

Gambar 9. Hubungan tegangan pada arah-x ( $S_x$ ) dan tegangan arah-y ( $S_y$ ) terhadap jarak pada model oksida konvolusi berpori. (a) daerah di atas pori (b) daerah di bawah pori.

## KESIMPULAN

1. Perhitungan elemen hingga dapat digunakan untuk memprediksi nilai tegangan termal yang dibangkitkan pada spesimen teroksidasi serta dapat menampilkan distribusi tegangan pada oksida lapisan oksida maupun substrat logamnya.
2. Kehadiran *pore* di dalam morfologi konvolusi lapisan oksida membawa perubahan yang signifikan pada distribusi tegangan. Bahkan dalam kondisi tertentu tegangan *tensile* di dalam oksida lapisan oksida dapat dihasilkan yang dapat memicu terjadinya *cracking*.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. SYAHRIL, R.D. RAWLINGS, *J. of Materials Science* 37 (2002) 1823-1830.
- [2]. SUNARDI, intern paper (unpublished), December 2001, Institute for Materials and Processes in Energy Systems (IWV-2), Research Center Julich, Germany.
- [3]. K. MESSAOUDI et al, *Oxidation of Metals*, Vol. 53, Nos. 1/2, 2000.
- [4]. C.G. MCKAMEY et al., *J. Mater. Res.* 4 (1989) 1156.
- [5]. C.G. MCKAMEY et al., *ibid.* 6 (1991) 1779.
- [6]. C.G. MCKAMEY et al., *Scripta. Metall. Mater.* 28 (1993) 1173.
- [7]. D.G. MORRIS, M.A. MORRIS-MUNOZ, *Intermetallics* 7 (1999) 1121
- [8]. D.G. MORRIS, M. LEBOEUF, *Acta. Metall. Mater.* (1994) 1817.
- [9]. C.H. XU et al, *Intermetallics* 8 (2000) 769-779.