

PENGAMATAN MORFOLOGI OKSIDASI MIKROSTRUKTUR LAPISAN KERAK KOROSI PADA PADUAN Ni-Al

Sahlan

STT-PLN

e-mail: sahlan_1956@yahoo.com

ABSTRACT

The impeller of air plane turbine or electrical generator gas turbine, generally used Ni base content superalloy. For long time turbine operation, oxidation of Ni-alloy could be happened. This research want to know the effect of the high temperature and time duration of turbine operation, especially oxidation of Ni-3Al alloy. In this research the temperature treatment at 1298 and 1498 °K, while time duration 20,25 and 50 hours. The research result shows that NiO Oxid is formed and porous crystall granulars are identified. This porous crystalls are Ni Al₂O₄.

Keywords: Superalloy, Ni-Al, porous crystall, NiO.

PENDAHULUAN

Nikel terutama dibuat dengan cara elektrolisa, akan tetapi bahan yang dinamakan nikel Mond dalam bentuk pellet dihasilkan dengan cara pirolisa yang dibuat dari nikel karbonil. Nikel adalah logam yang berwarna perak keabu-abuan mempunyai kisi sel satuan kubus pemusatan sisi (kps) atau fcc (faced centered cubic) dengan massa jenis 8,7 yang hampir sama dengan massa jenis tembaga (Cu). Setelah penganilan, kekuatannya 45 hingga 55 kgf/mm², perpanjangannya 45-50%, dan kekerasannya 80-90 Brinnel. Ni baik sekali untuk ketahanan panas dan ketahanan korosi atau oksidasi, dan tidak rusak oleh air kali atau air laut dan alkali, tetapi tidak tahan atau rusak oleh asam nitrat dan sedikit tahan korosi terhadap asam khlor dan asam sulfat.

Nikel dipadu dengan unsur Al dari 0,1 hingga 3,0% membentuk paduan larutan padat- γ (γ -solid solution alloys) yang sangat stabil dan dipadu dengan beberapa unsur lainnya dapat dipergunakan sebagai bahan yang mempunyai ketahan mulur pada suhu tinggi (*creeping*) dan tahan oksidasi. Kecepatan kinetisitas oksidasi, komposisi dan struktur kerak dan lapisan kerak bawah (*subscale*) yang terbentuk pada fasa larutan padat Ni-Al pada umumnya membentuk lapisan kerak berlapis ganda (*multilayered*) NiO/NiAl₂O₄/Al₂O₃. Pada tulisan ini akan menguraikan secara rinci hasil pengamatan

kecepatan kinetisitas kerak dan larutan dari pada morfologi kerak dan lapisan kerak paduan nikel dengan paduan aluminium sampai dengan 6 wt% pada kondisi kerja antara 1273 dan 1473°K.

Prinsip dasarnya, kinetisitas oksidasi untuk nikel dan paduannya pada interval waktu selama 2 hari dalam lingkungan udara pada suhu antara 1298 dan 1498 °K akan terbentuk parabola oksidasi nikel. Paduan yang mengandung sampai dengan 3 wt% Al menunjukkan tampilan bentuk parabola yang lebih mencolok dibandingkan dengan oksidasi nikel. Untuk paduan Ni-2Al, pertumbuhan lapisan individual NiO dan NiO + NiAl₂O₄ dalam penetrasi kerak dan lapisan kerak berbentuk parabola, dan kinetisitas oksidasi paduan Ni-6Al akan menghasilkan pertumbuhan bintik-bintik halus (*nodules*) dimana dalam susunannya diikuti reaksi dengan periode transisi panjang dan berlangsung terus-menerus dan kemudian menurun saat sampai pada puncak terbentuknya larutan kerak NiO/NiAl₂O₄/Al₂O₃.

STUDI PUSTAKA

Pada prinsip dasarnya untuk aluminium yang terlarut (*solvent*) dalam paduan nikel (*solute*) dan kemudian terbentuk oksida NiO pada permukaannya maka fenomena yang terjadi adalah difusi nikel akan berjalan kearah

keluar (*outward*) lapisan permukaan yang kemudian menjangkau lapisan eksternal NiO dan besarnya peningkatan pertumbuhan rata-ratanya bergantung pada kandungan paduan aluminiumnya yang terlarut oleh peningkatan dalam konsentrasi kekosongan atau vakansi dan difusi nikel dalam Ni dari doping aluminium yang memenuhi persamaan:

$$Al_2O_3 = 2Al_{Ni}^{\bullet} + V_{Ni}'' + 3O_O^x \dots\dots\dots (1)$$

dimana Al_{Ni}^{\bullet} , V_{Ni}'' dan O_O^x mengacu pada banyaknya aluminium dalam larutan nikel, vakansi kation dan oksigen dalam larutan oksigen dalam NiO yang terbentuk. Pengaruh doping kebanyakan mempengaruhi prosentase berat paduan yaitu sekitar 0,1 wt% Al, sebab ini dibatasi oleh syarat keseimbangan paduan -NiAl₂O₄-NiO pada aktivitas permukaan paduan aluminium dan sebab lain yaitu fraksi NiAl₂O₄ yang lebih besar serta adanya porositas (pori-pori) didalam lapisan pada dua fasa pada paduan yang lebih kaya dalam aluminium yang terlarut dan kemudian menurun pada areal terak (*flux*) nikel. Oksigen yang ada didalam pertumbuhan Al₂O₃ berfungsi sebagai partikel kecil, penghubung pada sisi muka oksidasi sebelah dalam (internal) dan meningkat setelah terbentuknya NiO, yang mempunyai persamaan reaksi:

$$3NiO_{(kerak)} + 2Al_{(paduan)} = Al_2O_{3(paduan)} + 3Ni_{(kerak)} \dots\dots\dots (2)$$

dimana dampak langsung dari pada difusi nikel terhadap kerak adalah aluminium bereaksi langsung dengan oksigen (udara) atmosphere. Ini dapat dipahami bahwa terbentuknya penetrasi parabolis arah masuk kedalam zona oksidasi internal menuju paduan Ni-2 Al dikontrol oleh difusi oksigen. Pengkayakan reaksi Al₂O₃ antara nikel dan oksigen didalam paduan diantara sisi dalamnya dengan zona oksidasi internal yang disebabkan adanya pertumbuhan NiAl₂O₄ dalam bentuk persenyawaan:

$$Ni_{(paduan)} + O_{(paduan)} + Al_2O_{3(paduan)} = NiAl_2O_{4(paduan)} \dots\dots\dots (3)$$

Beberapa pertumbuhan arah keluar dari pada NiAl₂O₄ kearah lapisan oksida sisi dalam terjadi selama adanya perputaran difusi aluminium dan nikel didalam difusi NiO/Al₂O₃ yang kemudian mendorong untuk lebih meningkatkan pertumbuhan NiAl₂O₄. Oleh

karena itu, difusi aluminium yang langsung menyusup kedalam NiAl₂O₄ membentuk persenyawaan reaksi;

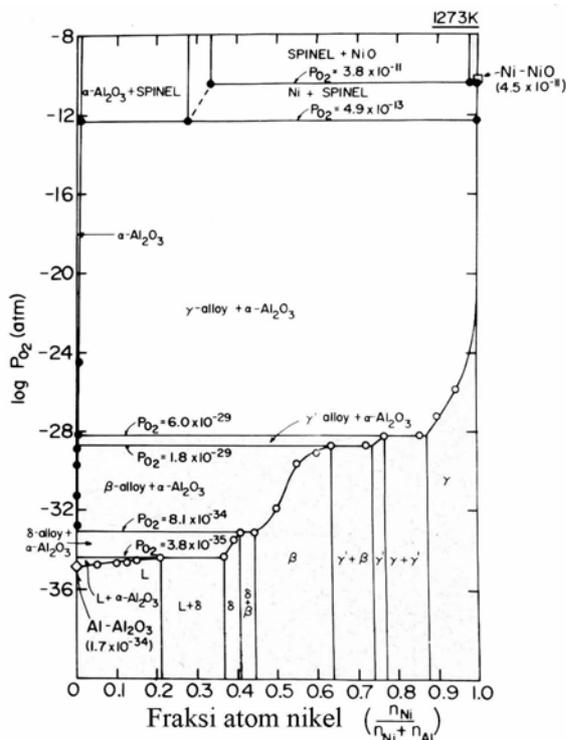
$$2Al_{(Al_2O_3)} + 4NiO_{(kerak)} = NiAl_2O_{4(kerak)} + 3Ni_{(kerak)} \dots\dots\dots (4)$$

yang kemudian menyebabkan pertumbuhannya berkembang keluar dan menggeser kedudukan Ni dalam bentuk difusi langsung kedalam lapisan NiO. NiAl₂O₄ dan mendukung kedalam gradient aluminium selama komposisinya pada suhu 1273 °K yang mana ini akan diketahui dari harga stoikiometri pada NiO 1,27 Al₂O₄-Al₂O₃ yaitu antara batas tekanan oksigen yang berbanding terhadap paduan -NiAl₂O₄-NiO dan paduan -NiAl₂O₄-Al₂O₃ satu sumbu.

Mekanisme untuk transisi dari pertumbuhan kerak dan pertumbuhan lapisan dibawah kerak (subscale) ke pertumbuhan berikutnya yang kemudian membentuk kerak lapisan luar berikutnya pada kandungan aluminium yang lebih besar. Pertumbuhan lateral pada lapisan film Al₂O₃ yang terjadi pada oksidasi internal didepan dari pengendapan Al₂O₃ sepanjang batas butiran paduan dan pada sisi pembatas untuk difusi aluminium dan oksigen yang disebabkan oleh alur-alur Al₂O₃ dalam matrik paduan. Pengembangan sempurna pada lapisan film Al₂O₃ yang tidak beraturan oleh dua moda diatas terakhir yang terisolasi didalam zona oksidasi internal dari lapisan kerak bawah paduan. Berkenaan dengan itu, konversi nikel didalam zona oksidasi internal yang terisolasi oleh proses difusi menjadi NiO dan NiAl₂O₄ yang nyatanya dihasilkan didalam pertumbuhan kerak -NiO/NiAl₂O₄/Al₂O₃.

Mekanisme oksidasi ini konsisten dengan teori dasar termodinamika system Ni-Al-O. Diagram keseimbangan tekanan oksigen pada suhu 1273 °K seperti pada Gambar 1 menunjukkan keseimbangan Al₂O₃ didalam paduan utama Ni-Al mencakup perpaduan untuk semua komposisi, sebab koeksistensi paduan -NiAl₂O₄-Al₂O₃ stabil pada kurang dari 1 ppm Al. Oleh karena itu suatu gradient oksigen akan muncul pada kerak duplek arah melintangnya pada daerah suhu ini dari tekanan atmosphere sampai dengan $P_{O_2} = 3,8 \times 10^{-11}$ atm. Untuk koeksistensi pada paduan -NiAl₂O₄-NiO, maka penyusutan NiO dari koeksistensi ini akan mensuplai oksigen ke

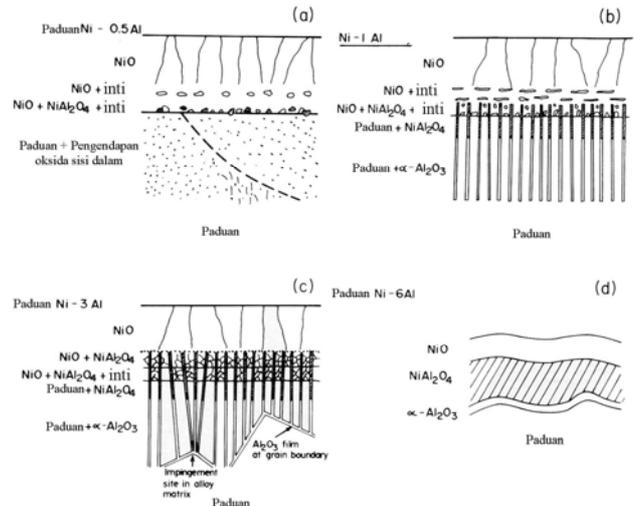
dalam paduan. Formasi $NiAl_2O_4$ pada persamaan (3) memberikan peluang membentuk pertumbuhan lebih lanjut menjadi zona oksidasi internal sebagai bentuk isolasi terjadinya pengendapan atau pengembangan jalur-jalur $NiAl_2O_4$ untuk selanjutnya mengendap pada daerah tekanan oksigen dari $3,8 \times 10^{-11}$ sampai dengan $4,9 \times 10^{-13}$ atm. Al_2O_3 oksida internal menjadi stabil pada tekanan oksigen yang lebih rendah yang menurunnya akan berhenti dengan adanya tanda batas stabil fasa larutan padat- γ Ni-Al dari $P_{O_2} = 4,9 \times 10^{-13}$ atm., sampai pada batas dibawah $P_{O_2} = 6,0 \times 10^{-12}$ atm.



Gambar 1. Diagram keseimbangan tekanan oksigen untuk system Ni-Al-O pada suhu 1273°K

Spesies atau koloni difusi dominan selama pertumbuhan kerak dan kerak lapisan bawah ada nikel didalam kerak, dan oksigen dalam paduan dari pada zona kerak lapisan bawah. Satu hal yang tidak dapat diabaikan adalah proses difusi yang diikuti dengan lapisan kerak dalam $NiO + NiAl_2O_4$, yaitu adanya pengurangan jumlah NiO pada permukaan paduan mengatur fluks oksigen arah keluar dan arah masuk, dan adanya pengurangan jarak antara jalur-jalur $NiAl_2O_4$ seperti pada Gambar 2, menunjukkan bahwa NiO ketidak kesempurnaan kontak dengan permukaan paduan yang saling terkait akibat adanya deformasi plastis. Akibatnya adalah

pengurangan atau penurunan NiO akan menyebar merata dan mengatur atau mengontrol perpindahan molecular oksigen melintasi daerah terlarang didalam $NiO-NiAl_2O_4$. Dan yang terakhir tidak dapat dirumuskan pada tingkat relative pertumbuhan arah masuk $NiAl_2O_4$ oleh adanya difusi oksigen didalam paduan, persamaan (3), dan pertumbuhannya arah keluar oleh difusi aluminium dalam $NiAl_2O_4$, persamaan (4).



Gambar 2. Model skematis untuk pertumbuhan kerak dan kerak lapisan bawah pada paduan larutan padat- γ
(a). Kerak NiO yang mengandung $NiAl_2O_4$
(b). Kerak duplek yang mengandung sisi lapisan luar $NiO+$ dan sisi lapisan dalam $NiO + NiAl_2O_4$
(c). Kerak dan kerak lapisan bawah paduan Ni-3 Al yang membentuk film Al_2O_3 yang terputus-putus pada muka oksidasi internal
(d). Pengembangan penuh kerak $NiO/NiAl_2O_4/Al_2O_3$ pada paduan Ni-6 Al

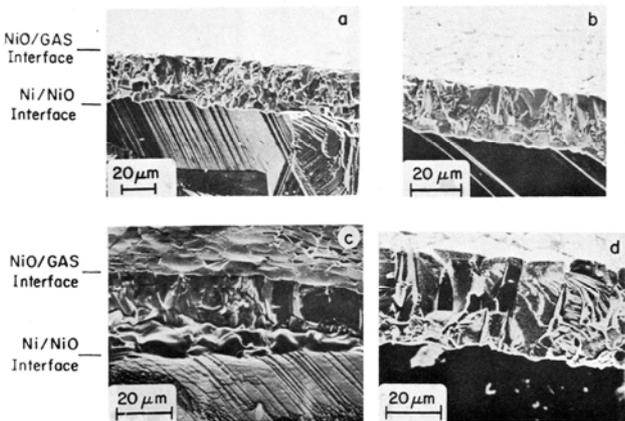
METODOLOGI PENELITIAN

Dalam pengamatan morfologi oksidasi paduan Ni-3Al yang menggunakan analisis EDAX, pertama kali yang dilakukan adalah menyiapkan benda uji (*specimen*) dari bahan paduan 0,1; 0,5; 1,0; 2,1; dan 3,0 wt%Al, dimana masing-masing dibuat dalam bentuk lembaran (*plat*) tipis dengan ukuran panjang, lebar dan tebal masing-masing adalah 2 cm, 2cm dan 1 cm. Kemudian dilakukan preparasi dengan penyelesaian akhirnya (*finishing*) dengan penghalusan permukaan logam (*metallographically polished*) menggunakan pasta batu intan (*diamond paste*) dengan kehalusan 1 μm . Untuk pengamatan oksidasi permukaan pada benda uji menggunakan gravimetris kinetis, yaitu suatu cara atau metoda pengamatan atau pengukuran oksidasi permukaan dengan memasukkan

benda uji dalam satu ruangan tertutup dan dialiri gas oksigen pada tekanan udara tetap 1 atmosphere, kemudian dilakukan pengamatan untuk menentukan komposisi, struktur dan morfologinya.

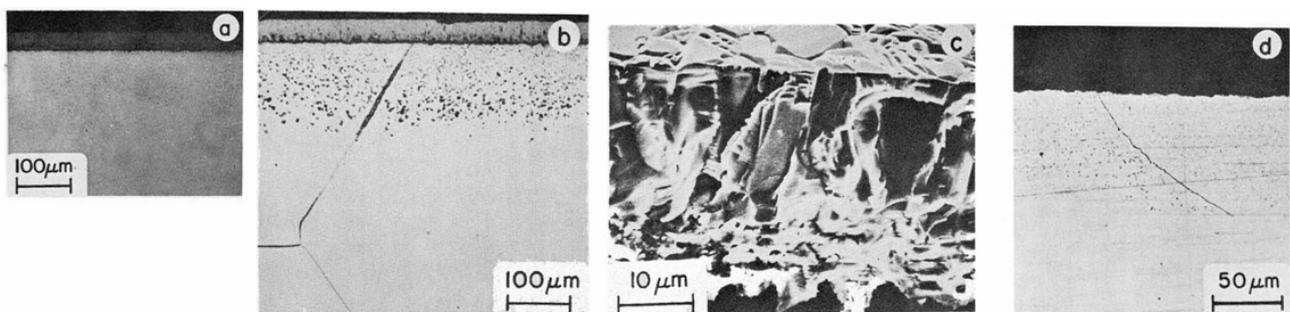
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengamatan untuk mengamati saat pertama kali terbentuk lapisan NiO pada permukaan nikel, teramati adanya permulaan awal terbentuknya butiran-butiran, dan akan terus tumbuh atau berkembang menjadi butiran-butiran besar (*columnar*) yang kemudian menjadi butiran sempurna pada suhu 1498 °K. Perilaku ini dapat dilihat pada Gambar 3 dimana pada potongan melintang terlihat adanya retakan kerak NiO yang terbentuk dalam tekanan 1 atmosphere udara.



Gambar 3. Penampang melintang retakan akibat terbentuknya kerak NiO pada Ni
 a). 25 jam pada suhu 1298 °K, 1 atm udara
 b). 50 jam pada suhu 1298 °K, 1 atm udara
 c). 1 jam pada suhu 1498 °K, 1 atm udara
 d). 10 jam pada suhu 1498 °K, 1 atm udara

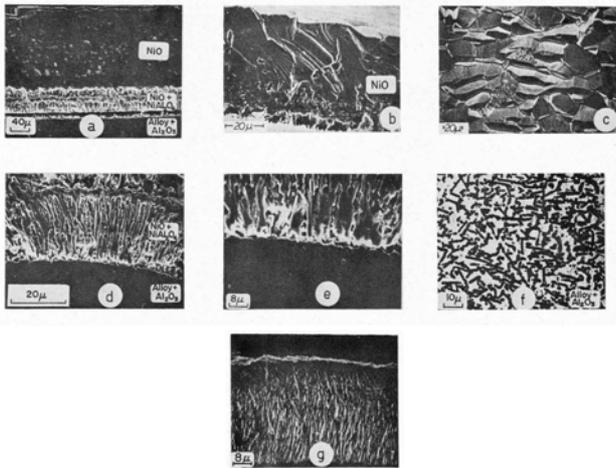
Pada Gambar 4 memperlihatkan suatu keadaan dimana suatu paduan Ni-0,1 dan Al-



Gambar 4. Penampang melintang metalografi dan retakan zona oksidasi internal dan kerak dari pada paduan Ni-Al pada suhu 1298 °K untuk paduan Ni-0,1 Al
 (a). Tidak dietsa; (b). Dietsa: paduan Ni-05 Al; (c) Penampang retakan; (d) Tidak dietsa

0,5 terjadi pembentukan morfologi senyawa oksida yang sama pada daerah atau areal sisi dalamnya dan menunjukkan bentuk sisi oksida yang berpori-pori (porositas), yang tidak lain adalah sisi kolumnar kerak dan pengendapan oksida yang lembut dan acak tersebar dalam matrik paduan pada batas butiran di zona oksidasi sisi dalamnya. Oksida kolumnar itu tidak lain adalah NiO dan beberapa kristal dalam daerah oksida yang berpori-pori itu. Dan dengan analisis yang menggunakan EDAX dapat di identifikasikan sebagai NiAl₂O₄. Namun disini samar-samar teramati adanya komposisi dan struktur pengendapan oksida internal yang sangat lembut dan sangat sulit untuk ditentukan.

Oksidasi pada paduan Ni-1 dan 2-Al yang mengatur pertumbuhan kerak berganda (*duplex*) dan lapisan kerak sisi dalam (*subscale*) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5, dimana tampilannya mencitrakan suatu keadaan lapisan NiO kolumnar eksternal. Berturut-turut Gambar 5(a), (b), dan (c) menunjukkan lapisan senyawa oksidasi NiO + NiAl₂O₄ pada sisi dalamnya, dan juga pada Gambar 5(d) dan (e), serta terjadinya pengendapan internal NiAl₂O₄-Al₂O₃ pada Gambar 5(f) dan (g). Lapisan oksida internal berlumba-lumba memancang dan memagari diri seperti adanya pertumbuhan batang atau cabang NiAl₂O₄ dan kemudian berkembang terus membentuk NiO sebagai kelanjutan pengendapan oksida internal pada tahap berikutnya. Derajat porositas atau pori-pori yang terdekat dalam lapisan ini dan yang paling luas jangkauannya adalah untuk paduan Ni-2 Al, dimana pada pengendapan oksida internal ditandai dengan adanya bidang melintang yang merupakan zona oksidasi internal atau sebagai zona batang silindris, namun yang berada dibawah NiAl₂O₄ kearah sisi atas Al₂O₃ tidak teramati.

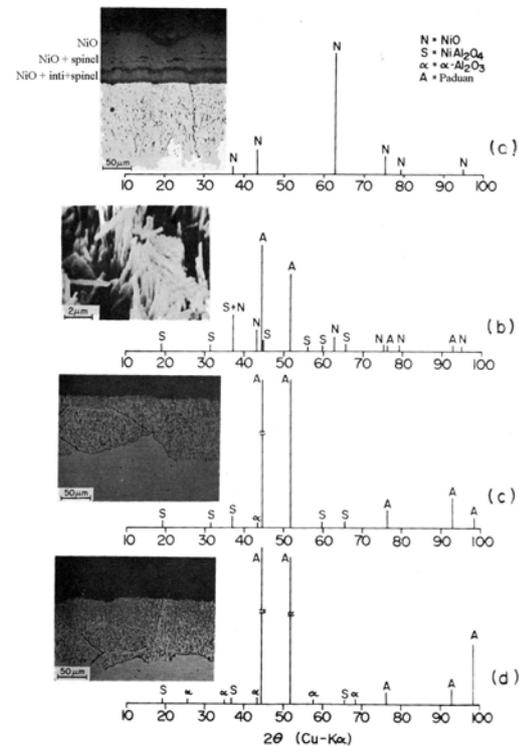


Gambar 5: Struktur oksidasi paduan Ni-2Al pada suhu 1473 (1 atm udara), kecuali (g).

(a). Penampang melintang global, (b) lapisan NiO sisi luar, (c). permukaan kerak eksternal, (d) lapisan dalam NiO + NiAl, (e) antar sisi lapisan dalam dan zona oksidasi internal, (f) zona oksidasi internal, (g) zona oksidasi internal bagian bawah yang dietsa dengan larutan iodine-methanol.

Morphologi oksida pada dan didalam paduan Ni-3 Al ada kemiripan atau kesamaan seperti yang diatas terkecuali untuk dua fasa lapisan dalam kerak yang porositasnya lebih mencolok terutama didalam zona kerak yang lebih dalam pada larutan parsial film Al_2O_3 yang ada di muka oksidasi internal pada suhu 1273°K. Gambar 6 menunjukkan citra morphologi kerak dan kerak lapisan dalam pada paduan Ni-3 Al yang teroksidasi pada tekanan 1 atm. Udara yang diamati dengan difraksi sinar-X ada beberapa citra variasi sisi dalam yang berbeda-beda. Kandungan kerak pada lapisan NiO kolumnar eksternal (Gambar 6a), menunjukkan adanya lapisan oksidasi yang saling tumpang tindih pada daerah batang $NiAl_2O_4$ yang kompak, dimana NiO dalam matrik batang $NiAl_2O_4$ ini mengandung daerah yang berpori-pori lebih dalam dan lebih rapat jarak penetrasi dari beberapa NiO sebagai butiran-butiran antara kedua batang ini (Gambar 6a dan 6b). Bagian film Al_2O_3 pada sisi depan akibat dari reaksi internal yang dikembangkan oleh dua keadaan yang berbeda, yaitu keadaan dimana pertumbuhan film dari adanya pengendapan Al_2O_3 yang orientasinya mendekati batas butiran paduan untuk memblokir pertumbuhan yang mengarah masuk kedalam dari pada pengendapan batang (Gambar 6c), dan yang kedua pada keadaan batang Al_2O_3 bereaksi dengan matrik paduan (Gambar 6d). Pencitraan difraksi sinar-X yang

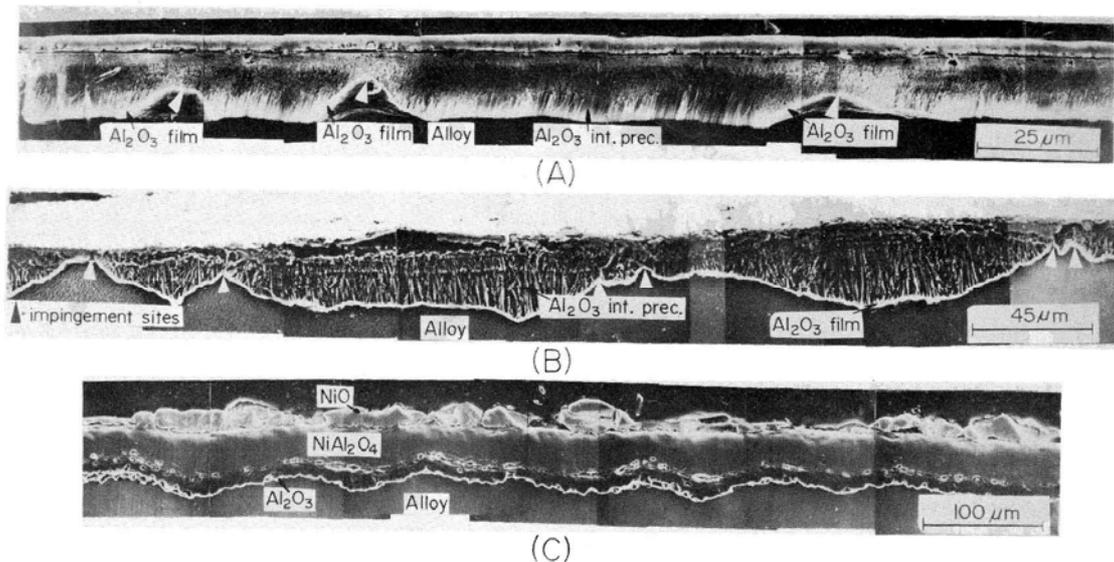
termaksud dalam Gambar 6 menggambarkan bahwa perkembangan $NiAl_2O_4$ merupakan bagian dari ujung batang Al_2O_3 yang mengarah sisi dalam yaitu dengan kedalaman sekitar 50 μm ke paduan ini.



Gambar 6. Morphologi kerak dan lapisan dalam paduan Ni-3 Al yang teroksidasi pada 1 atm tekanan udara.

(a). penampang melintang metalografi, (b). Pori-pori sisi dalam lapisan NiO+ Al_2O_4 dari pandangan atas, (c). Film oksida Al_2O_3 pada batas butiran paduan dimuka oksidasi internal, (d) Film oksida Al_2O_3 dalam matrik paduan pada sisi muka oksidasi internal.

Kerak pada paduan Ni-6 Al (Gambar 7) merupakan pengembangan dari nodul NiO+ $NiAl_2O_4$ yang mana perkembangannya lateral dan vertical dari arah proyeksi dalam film lapisan tipis Al_2O_3 pada permukaan paduan yang dipoles. Kerak dan lapisan dalam kerak yang terbentuk dari awal (Gambar 7a) menunjukkan gambar morphologi untuk paduan Ni-3 Al. Dalam kasus ini, walaupun ada pertumbuhan lateral pada sisi permukaan film Al_2O_3 dari reaksi awalnya (Gambar 7b) namun muncul suatu keadaan baru pada permukaan yang terisolasi kerak oksida penumpu nikel dan kerak lapisan dalam dari paduan. Oksida ini ditransformasi dan kemudian mempertebal lapisan dalamnya sampai melewati batas waktu oksidasi transien yang lama sampai pada batas waktu 150 jam pada suhu 1473 °K dan akhirnya membentuk kerak NiO/ $NiAl_2O_4$ / Al_2O_3 (Gambar 5c).



Gambar 7. Morphologi kerak dan lapisan kerak dalam paduan Ni-6Al yang teroksidasi pada tekanan 1 atm udara, suhu 1373°K setelah dietsa dengan larutan iodine-methanol
(a). zona pengendapan oksida internal dan terputusnya lapisan film Al_2O_3 pada sisi muka oksidasi, (b) Formasi film Al_2O_3 yang tidak terputus pada sisi muka oksidasi internal, (c). kerak yang seluruhnya terlapis larutan $NiO/NiAl_2O_4/Al_2O_3$

LINTASAN DIFUSI

Paduan Ni-Al, ≤ 3 wt% Al yang teroksidasi parabolis dan akan lebih cepat lagi terjadi pada kandungan aluminium yang lebih besar serta akan meningkat dalam harga kisaran rata-rata reaksi. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa untuk kandungan aluminium sampai dengan 0,1 wt%, kinetisitas oksidasi pada paduan Ni-6 Al menjadi tidak beraturan dan besarnya akan menurun menjadi lebih kecil selama terjadi pengembangan pelapisan kerak $NiO/NiAl_2O_4/Al_2O_3$. Oksidasi dari pada nikel akan mengatur pertumbuhan kerak NiO , dimana batasan butiran bidang meratanya terbentuk sejak awal untuk menjadi butiran kolumnar yang lebih luas. Selama pertumbuhan kerak, disini terjadi difusi logam yang predomnan dimana harga rata-rata oksidasinya adalah tetap bilamana nantinya dihitung dengan menggunakan persamaan Wagner atau menggunakan harga difusi mandiri (*self-difusion*) nikel dalam kristal tunggal NiO . Konstanta harga rata-rata eskperimental nikel kemurnian tinggi lebih besar dari pada harga rata-rata hasil perhitungan oleh factor ≤ 2 seperti pada Tabel 1, dan kemudian besarnya harga rata-rata oksidasi awalnya menjadi makin besar dan ini merupakan penggabungan antara harga kontribusi difusi sambungan singkat dengan harga lintasan difusi.

Model skematis yang menampilkan pertumbuhan lapisan oksida pada paduan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2, yang paling banyak memaparkan bentuk citra pertumbuhan kerak yang merupakan lapisan NiO kolumnar eksternal dan lapisan dalam $NiAl_2O_4$, dan pertumbuhan lapisan kerak dalam $NiAl_2O_4+Al_2O_3$ dengan morphologi yang berbeda, serta yang terakhir adanya transisi dari pada pertumbuhan kerak $NiO/NiAl_2O_4/Al_2O_3$ yang dihasilkan dari pertumbuhan lateral film oksidasi Al_2O_3 internal sisi muka dalam paduan yang mengandung aluminium yang lebih besar. Pertumbuhan lapisan oksida dan pengendapannya diatur atau ditentukan oleh mekanisme difusi dibawah ketentuan atau batasan thermodinamis.

Mekanisme lintasan difusi adalah satu konsistensi kita untuk memahami perilaku paduan yang mengandung ≤ 2 wt% Al. Seperti pada Gambar 2a dan 2b, selama pertumbuhan lapisan NiO eksternal mencakup pada difusi nikel arah keluar maka peningkatan didalam pertumbuhan rata-rata ini dengan kandungan paduan aluminium terbawa oleh adanya peningkatan dalam konsentrasi kekosongan dan kemudian difusi nikel dalam NiO dari adanya doping yang berhubungan dengan reaksi pada persamaan (1).

KESIMPULAN

Dalam pengamatan morfologi oksidasi paduan Ni-3Al yang menggunakan analisis EDAX disini setelah benda uji diperlakukan proses sintering pada suhu 1298 dan 1498 K dengan variasi waktu masing-masing 10, 25, dan 50 jam, pada tekanan 1 atmosphere udara, menunjukkan adanya kesamaan, yaitu terbentuknya oksida kolumnar NiO dan beberapa butiran kristal dalam daerah oksida yang berpori-pori yang teridentifikasi sebagai NiAl_2O_4 yang mana secara mikrostruktur menunjukkan komposisi dan struktur pengendapan oksida internal yang sangat halus.

Kandungan kerak pada lapisan NiO kolumnar eksternal menunjukkan adanya lapisan oksidasi yang saling tumpang tindih pada daerah batang NiAl_2O_4 yang kompak, dimana NiO dalam matrik batang NiAl_2O_4 ini mengandung daerah yang berpori-pori lebih dalam dan lebih rapat jarak penetrasi dari beberapa NiO sebagai butiran-butiran antara kedua batang ini.

Kerak pada paduan Ni-6 Al merupakan pengembangan dari nodul $\text{NiO}+\text{NiAl}_2\text{O}_4$ yang mana perkembangannya lateral dan vertical dari arah proyeksi dalam film lapisan tipis Al_2O_3 pada permukaan paduan yang dipoles. Kerak dan lapisan dalam kerak yang terbentuk dari awalnya menunjukkan gambar morfologi untuk paduan Ni-3 Al. Dalam kasus ini, walaupun ada pertumbuhan lateral pada sisi permukaan film Al_2O_3 dari reaksi awalnya namun muncul suatu keadaan baru pada permukaan yang terisolasi kerak oksida penumpu nikel dan kerak lapisan dalam dari paduan.

DAFTAR PUSTAKA

- Tata Surdia dan Saito Shinroku. (2003). *Pengetahuan Bahan*, Pt. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sins, Chester T., Stoloff, Norman S., dan Hagel, Wikkiam C. (2001). *Superalloys II: High-Temperature Materials For Aerospace and Industrial Power*, John Wiley & Sons, New York.
- Wolf, J. S., dan Evans, E. B. (1999). *Corrosion*, vol.18 p.129.
- Hagel, W. C. (2002). *Corrosion*, vol 23 p 312.