

OKSIDASI SIKLIK PADA TEMPERATUR 1200 °C PADUAN TERNER Ni-Al-Ti YANG DIDOPING DENGAN WOLFRAM

Adam Aprilindra¹, Pradoto Ambardi¹, Djoko Hadi Prajitno²

¹Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknik – UNJANI

Jl. Terusan Jenderal Gatot Subroto, Kota Bandung, 40284

²Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan – BATAN

Jl. Tamansari No.71, Lb. Siliwangi, Coblong, Kota Bandung, 40132

e-mail: dhppr@yahoo.co.id.

(Naskah diterima: 27-05-2019, Naskah direvisi: 10-06-2019, Naskah disetujui: 17-06-2019)

ABSTRAK

OKSIDASI SIKLIK PADA TEMPERATUR 1200 °C PADUAN TERNER Ni-Al-Ti YANG DIDOPING DENGAN WOLFRAM. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur pemadu Wolfram (W) sebanyak 1,5% pada paduan terner Ni-Al-Ti terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi dengan menggunakan metode oksidasi siklik yang dilakukan pada temperatur 1200 °C. Jumlah sampel yang digunakan pada penelitian ini sebanyak dua buah, yaitu sampel paduan Ni-Al-Ti dan paduan Ni-Al-Ti-1,5W. Proses oksidasi siklik dilakukan sebanyak 25 siklik, dengan variasi 4 siklik, 9 siklik, 16 siklik dan 25 siklik (1 siklik ditentukan dengan cara 60 menit pemanasan sampel di dalam tungku dan 30 menit didiamkan di luar tungku). Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian kekerasan *Rockwell-C*, pengujian metalografi, pengukuran ketebalan oksida, pengamatan morfologi permukaan, pemeriksaan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD). Penambahan 1,5 %W pada paduan Ni-AL-Ti menyebabkan kekerasan paduan tersebut meningkat menjadi 48,5 HRC pada kondisi as-cast dan 50,5 HRC pada kondisi setelah solution treatment. Penambahan unsur Wolfram juga dapat mempengaruhi ketahanan terhadap oksidasi temperatur tinggi paduan Ni-Al-Ti karena nilai kehilangan berat terhadap jumlah siklik pada proses oksidasi siklik menjadi lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel Ni-Al-Ti yang tanpa dipadu dengan unsur wolfram.

Kata kunci : *Ni base superalloy*, oksidasi siklik, wolfram

ABSTRACT

CYCLIC OXIDATION OF Ni-Al-Ti TERNARY ALLOY WITH WOLFRAM DOPING AT 1200°C. *This research is aimed to study the effect of Wolfram (W) on high temperature oxidation resistance of Ni-Al-Ti ternary alloy by cyclic oxidation method at 1200 °C. The amount of Wolfram added was 1.5% W. Number of samples used in this study is 2 samples, namely Ni-Al-Ti alloy and Ni-Al-Ti-1.5W alloy. Cyclic oxidation process was carried out with cycle variation of 4, 9, 16 and 25 cycles (a cycle refers 60 minutes of heating in the furnace and 30 minutes cooling outside the furnace). The tests include Rockwell-C hardness testing, metallographic testing, oxide thickness testing, surface morphology observation, Scanning Electron Microscopy (SEM) examination and X-Ray Diffraction (XRD) analysis. Wolfram content shows an influence in the hardness values with the highest hardness value obtained for the Ni-Al-Ti-1,5W sample with a hardness of 48.5 HRC for as cast sample and 50.5 HRC after treatment solution. The addition of wolfram appears to improve the resistance to high temperature, which can be seen from the cyclic weight loss curve where the Ni-Al-Ti-1,5W sample has lower weight loss when compared to the other sample.*

Keywords: *Ni base superalloy, cyclic oxidation, Wolfram*

PENDAHULUAN

Pengembangan material untuk bahan struktur reaktor temperatur tinggi banyak dilakukan oleh para peneliti dengan tujuan meningkatkan keselamatan dan umur reaktor. Penelitian tersebut meliputi pengembangan material struktur untuk elemen bahan bakar nuklir, penukar panas serta untuk *pressure vessel* yang digunakan pada reaktor nuklir.

Penelitian mengenai logam tahan temperatur tinggi menarik perhatian para peneliti, khususnya di bidang pemanfaatan energi nuklir, *heat exchanger*, atau pesawat terbang. Material tersebut memiliki karakteristik khusus yang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas sebuah proses dalam kondisi temperatur tinggi. Oleh karena itu diperlukan material dengan sifat-sifat sebagai berikut[1]:

1. Temperatur leleh yang tinggi.
2. Ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.
3. Stabilitas struktur mikro pada suhu tinggi.
4. Densitas rendah dan kekakuan yang tinggi.
5. Ketahanan *fatigue* dan *thermal fatigue* yang tinggi.
6. Kekuatan mulur dan *rupture* yang tinggi.

Salah satu material yang dapat memenuhi sifat-sifat di atas adalah paduan super dasar nikel. Unsur Nikel sering dipadukan dengan unsur logam lain untuk menghasilkan paduan yang memiliki sifat tertentu. Paduan nikel biasanya digunakan untuk aplikasi temperatur tinggi pada komponen pembangkit listrik tenaga nuklir maupun komponen turbin gas karena memiliki kekuatan yang cukup tinggi dan tahan terhadap korosi pada temperatur tinggi. Aluminium yang ditambahkan pada paduan nikel selain untuk meningkatkan kekuatan, juga bertujuan untuk meningkatkan proteksi terhadap *hot corrosion* dan oksidasi temperatur tinggi[2].

Titanium adalah salah satu unsur paduan utama dalam pembuatan Ni-base *superalloy*. Sifat mekanik untuk aplikasi

temperatur tinggi Ni-base *superalloy*, sangat dipengaruhi oleh keberadaan unsur tersebut melalui berbagai factor, seperti dislokasi, difusi, batas butir, *twinning*, *stacking fault*, antar muka fase γ dan γ' , dan presipitat[3,4].

Dalam melakukan penambahan unsur-unsur pada paduan dasar nikel perlu diketahui bagaimana unsur tersebut akan mempengaruhi mikrostruktur dan karakteristik lainnya secara lebih jelas dan kuantitatif. Penambahan unsur-unsur pepadu (Al dan Ti) mengakibatkan munculnya fasa γ' [Ni₃(Al,Ti)] yang koheren sehingga dapat memberikan efek penguatan, walaupun fasa matriks γ dan fasa γ' memiliki parameter kisi yang berbeda[3,5].

Wolfram merupakan logam transisi yang memiliki sifat sangat keras dengan titik leleh tinggi yaitu 3422°C dan dapat ditemukan pada mineral *wolframit* dan *schelit*. Penambahan unsur pepadu wolfram ke dalam paduan Ni-Al-Ti bertujuan untuk meningkatkan ketahanan oksidasi dan korosi pada temperatur tinggi serta meningkatkan kekerasan.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur pepadu wolfram terhadap perilaku oksidasi temperatur tinggi pada paduan Nikel Ni-Al-Ti hasil *casting* dan hasil *solution treatment*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi paduan Ni-Al-Ti untuk aplikasi bahan struktur reaktor nuklir.

METODOLOGI

Paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W dibuat dengan metode teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik dalam media gas argon. Komposisi unsur Ni, Al, Ti dan W untuk pembuatan paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W ditunjukkan pada Tabel 1.

Rancangan perhitungan *material balance* dari setiap paduan yang akan dilakukan proses peleburan memiliki berat

total sebesar 20 gram, dengan rincian setiap unsur penyusunnya dicantumkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi %berat paduan yang digunakan pada penelitian

Paduan	%berat			
	Ni	Al	Ti	W
Paduan 1	82,665	6,650	10,685	-
Paduan 2	81,425	6,550	10,525	1,5

Tabel 2. Komposisi paduan yang digunakan pada penelitian

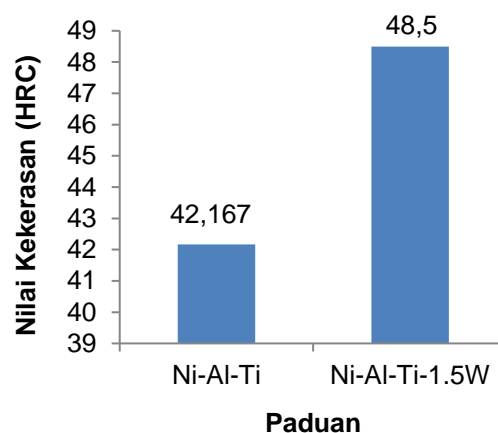
Paduan	Massa (gram)			
	Ni	Al	Ti	W
Paduan 1	16,533	1,33	2,137	-
Paduan 2	16,285	1,310	2,105	0,3

Proses karakterisasi sampel paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W dilakukan melalui pengujian kekerasan menggunakan *Hardness Rockwell-C*, pengujian metalografi, pengujian XRD (*X-Ray Diffractometer*) dan pengujian SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectrometer*). Pengujian kekerasan menggunakan *Hardness Rockwell-C* dengan beban minor 10 kg dan beban major 140 kg, sehingga beban totalnya adalah 150 kg. Pengujian metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik pada pembesaran 100x untuk mengetahui mikrostruktur dan untuk melihat ketebalan lapisan oksida yang terbentuk setelah proses oksidasi siklik. Pengujian XRD bertujuan untuk menganalisa komposisi fasa dan senyawa yang terbentuk pada material tersebut. Pengujian SEM-EDS menggunakan mesin JEOL tipe JSM-6360LA yang bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan spesimen dan menganalisa unsur-unsur yang terbentuk pada setiap spesimen. Spesimen yang dilakukan pengujian SEM-EDS adalah sampel Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W yang telah dilakukan proses oksidasi siklik pada temperatur oksidasi 1200°C.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pengujian yang dihasilkan dari penelitian ini meliputi data kekerasan, data metalografi menggunakan mikroskop optik dan SEM/EDS, data ketebalan lapisan oksida, serta data hasil XRD untuk spesimen hasil as-cast dan kondisi *solution treatment*.

Hasil pengujian kekerasan *Rockwell-C* terhadap sampel Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W dalam kondisi as-cast dicantumkan pada Gambar 1.

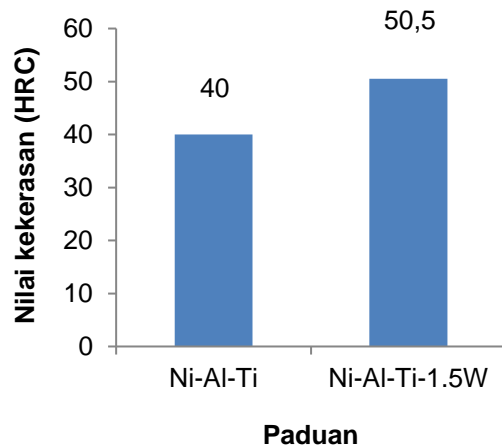


Gambar 1. Grafik perbandingan nilai kekerasan sampel Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W kondisi as cast.

Penambahan 1,5 % unsur wolfram ke dalam paduan Ni-Al-Ti menyebabkan nilai kekerasan meningkat dari 42,167 HRC menjadi 48,5 HRC. Hal ini disebabkan karena W yang larut padat dalam matriks γ menyebabkan adanya penguatan solid solution dan cenderung sangat lambat untuk berdifusi dari matriks γ walaupun di atas 0,6 T_m (*melting temperature*) yang merupakan rentang mulur temperatur tinggi (*range of high-temperature creep*)[3]. Keberadaan W selain sebagai penyetabil dan penguat matriks γ juga dapat berfungsi sebagai penghambat laju pengkasaran presipitat gamma prime (γ')[3,8].

Proses peleburan yang dilanjutkan dengan solidifikasi untuk mendapatkan spesimen dalam kondisi as-cast biasanya memunculkan segregasi berupa ketidakhomogenan distribusi unsur atau

fasa di dalam spesimen tersebut. Oleh karena itu untuk mendapatkan tingkat kehomogenan distribusi unsur/ fasa yang lebih merata di setiap bagian spesimen diperlukan proses *Solution Treatment*. Hasil pengujian kekerasan sampel *as-solution treatment* untuk paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan nilai kekerasan sampel Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W *as-solution treatment*.

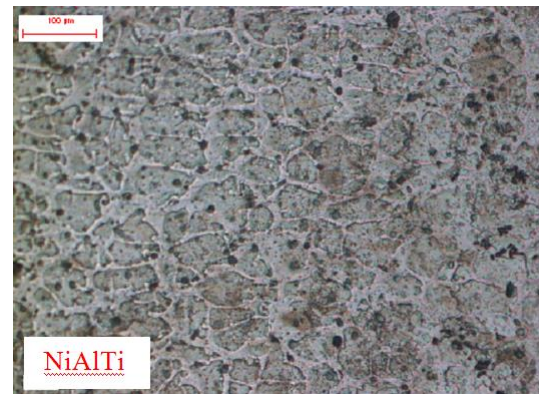
Pengujian Metalografi dilakukan terhadap sampel paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W hasil dari proses peleburan (*as cast*) dan setelah mengalami *Solution Treatment*. Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui perubahan mikrostruktur dan ketebalan oksida yang dihasilkan setelah proses oksidasi siklik. Hasil analisis pengujian metalografi terhadap sampel tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 hingga Gambar 6.

Pada Gambar 3 dan Gambar 4 terlihat bahwa paduan Ni-Al-Ti kondisi *as-cast* mengalami perubahan struktur mikro ketika dilakukan proses *solution treatment*. Pada kondisi *as-cast* butir yang dihasilkan relatif kecil dengan batas butir yang tipis. Pengaruh *solution treatment* yang dilakukan pada temperatur 1200°C dengan waktu *holding time* selama 2 jam yang dilanjutkan dengan *quenching* menyebabkan butir paduan Ni-Al-Ti membesar dan mengalami penebalan batas butir berupa fasa tertentu

di daerah tersebut. Pengkasaran butir yang terjadi akibat *solution treatment* ini menyebabkan kekerasan paduan Ni-Al-Ti menurun dari 42,167 HRC menjadi 40 HRC. Penurunan kekerasan tersebut juga dapat disebabkan karena sebagian fasa penguat seperti Ni₃Al atau Ni₃Ti ikut larut pada saat *solution treatment* sehingga pada saat dilakukan *quenching* fasa tersebut tidak sempat terbentuk kembali[7,8].

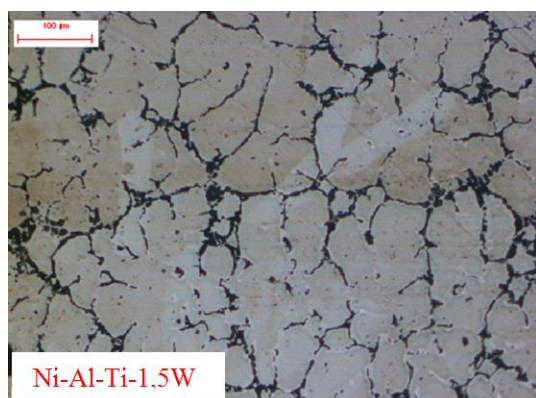


Gambar 3. Mikrostruktur paduan Ni-Al-Ti *as cast*.

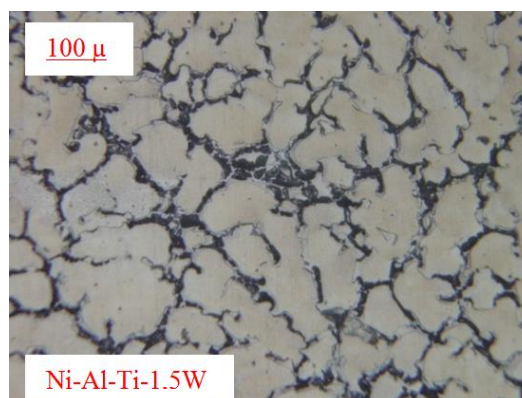


Gambar 4. Mikrostruktur Ni-Al-Ti *as solution treatment*.

Pada paduan Ni-Al-Ti-1,5W (Gambar 5 dan Gambar 6) memperlihatkan bahwa struktur mikro yang dihasilkan adalah berupa dendritik. Proses *solution treatment* yang dilakukan pada spesimen tersebut menyebabkan butir dendrit kasar berubah menjadi lebih halus dan terjadi pengelompokan (*clustering*) fasa intermetalik Ni₃Al di daerah batas butir sehingga kekerasan paduan Ni-Al-Ti-1,5W menjadi meningkat[9,10].



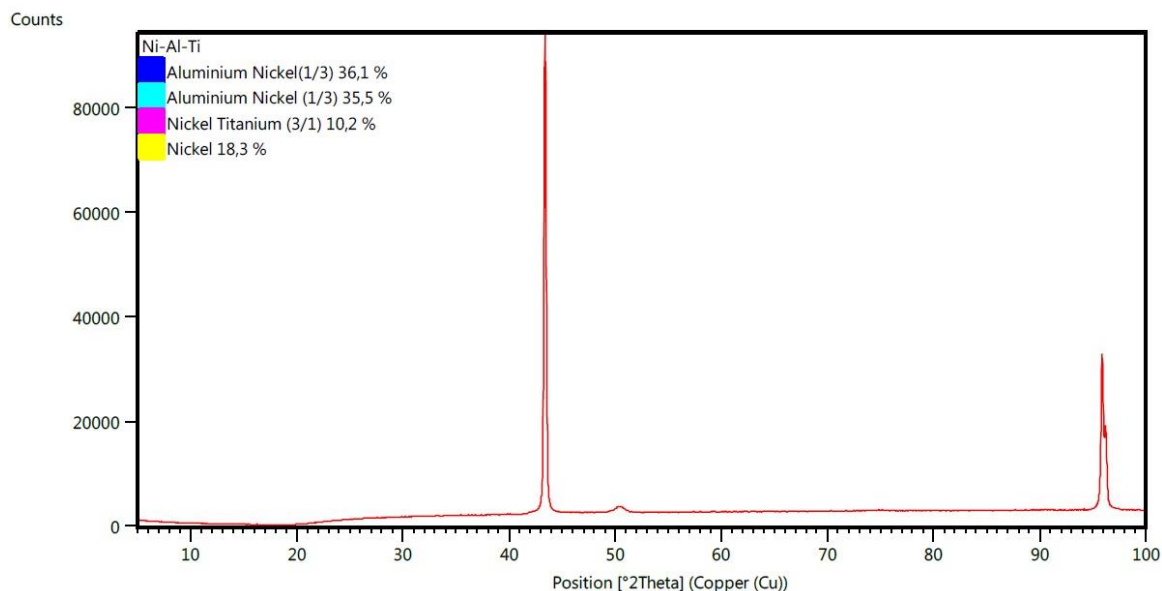
Gambar 5. Mikrostruktur paduan Ni-Al-Ti-1,5W as cast.



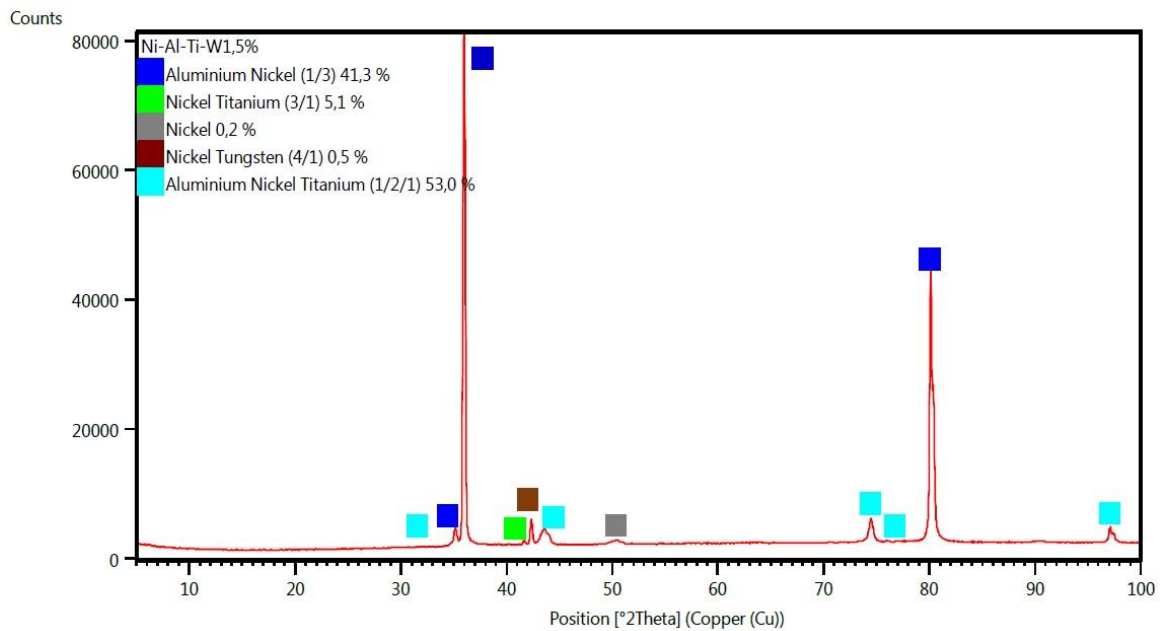
Gambar 6. Mikrostruktur paduan Ni-Al-Ti-1,5W as solution treatment.

Hasil analisis pengujian XRD sampel paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W pada kondisi sebelum dan sesudah proses oksidasi siklik dicantumkan dalam Gambar 7 hingga Gambar 10. Pada Gambar 7 terlihat bahwa fasa-fasa yang terbentuk pada paduan Ni-Al-Ti untuk kondisi sebelum oksidasi siklik adalah fasa intermetalik Ni_3Al sebanyak 71,6%, fasa eta

(η) yang memiliki komposisi Ni_3Ti sebanyak 10,2% dan fasa gamma Ni sebanyak 18,3%. Sedangkan untuk paduan Ni-Al-Ti-1,5W (Gambar 8) fasa yang terbentuk adalah intermetalik γ' - Ni_3Al sebanyak 41,3%, fasa eta η - Ni_3Ti sebanyak 5,1%, fasa Ni_4W sebanyak 0,5%, fasa Ni_2AlTi sebanyak 53% dan fasa gamma Ni sebanyak 0,2%.



Gambar 7. Grafik pengujian XRD Paduan Ni-Al-Ti sebelum proses oksidasi siklik



Gambar 8. Grafik pengujian XRD Paduan Ni-Al-Ti-1,5W sebelum proses oksidasi siklik

Hasil XRD terhadap kedua sampel tersebut (paduan Ni-Al-Ti dan Ni-Al-Ti-1,5W) setelah proses oksidasi siklik ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Pada Gambar 9 terlihat bahwa produk oksidasi siklik untuk paduan Ni-Al-Ti menghasilkan lapisan oksida di permukaan paduan dengan komposisi fasa sebagai berikut: fasa NiO 15,5%, NiAl₂O₄ 58,3%, TiO₂ 3,5% dan fasa NiTiO₃ 22,7%. Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa terbentuknya lapisan oksida TiO₂ pada paduan Ni-Al-Ti, berpengaruh terhadap ketahanan oksidasi siklik paduan Ni-Al-Ti.

Hasil pengujian XRD terhadap produk hasil oksidasi siklik paduan Ni-Al-Ti-1,5W seperti yang terlihat pada Gambar 10 menunjukkan bahwa pada permukaan sampel terbentuk lapisan oksida aluminium oksida (Al₂O₃) 68,2% dan nikel oksida (NiO) 1,1%, TiO₂ 0,7%, dan WO₂ 30%. Pembentukan oksida aluminium yang cukup dominan pada paduan tersebut dikarenakan unsur Al memiliki potensial kimia yang lebih rendah dari pada Ni seperti yang dijelaskan dalam diagram Ellingham, sehingga mengakibatkan pembentukan

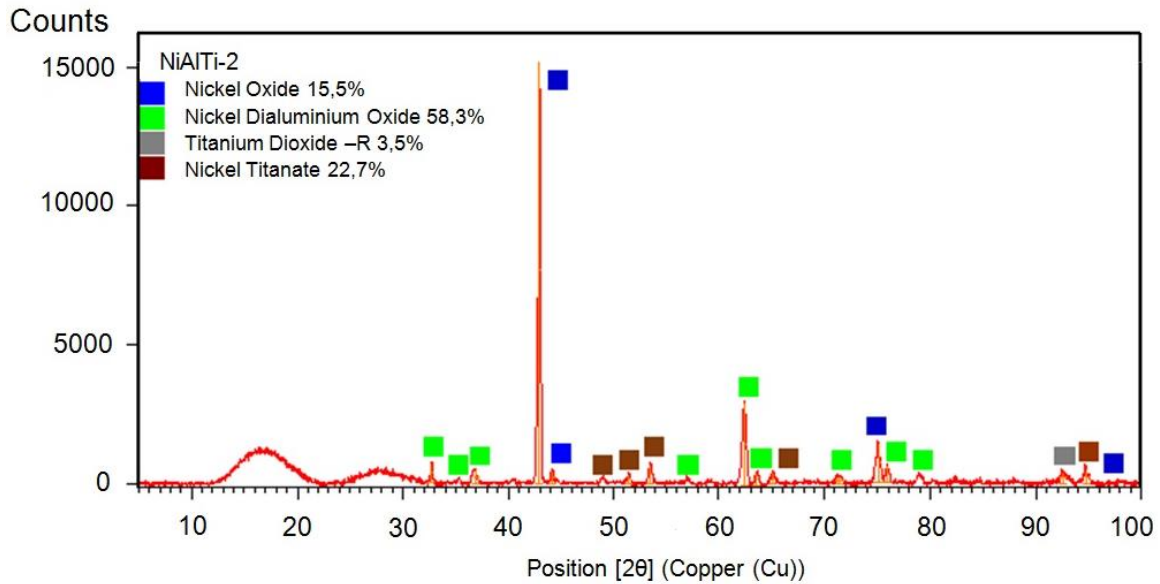
oksida nikel menjadi minim. Selain itu, keberadaan unsur wolfram juga menyebabkan terbentuknya oksida wolfram pada saat oksidasi siklik, sehingga akan berdampak pada penurunan laju oksidasi terhadap paduan Ni-Al-Ti. Hal ini terbukti dari tipisnya lapisan oksida yang terbentuk di paduan Ni-Al-Ti-1,5W jika dibandingkan dengan lapisan oksida pada paduan Ni-Al-Ti yang tanpa dipadu unsur wolfram.

Tipisnya lapisan oksida yang terbentuk pada sampel Ni-Al-Ti-1,5W diperlihatkan dalam grafik Gambar 11, dimana nilai ketebalan lapisan oksida paduan tersebut lebih rendah untuk semua siklik, jika dibandingkan dengan ketebalan lapisan oksida paduan Ni-Al-Ti. Ketahanan oksidasi temperatur tinggi untuk paduan Ni-Al-Ti-1,5W juga disebabkan oleh adanya fasa intermetalik *gamma prime Ni₃Al* yang lebih stabil jika dibandingkan dengan ketahanan oksidasi fasa Ni₃Ti [11,12]. Seiring dengan bertambahnya siklik, ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan juga semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan teori bahwa semakin bertambah siklik yang berarti juga semakin lama proses

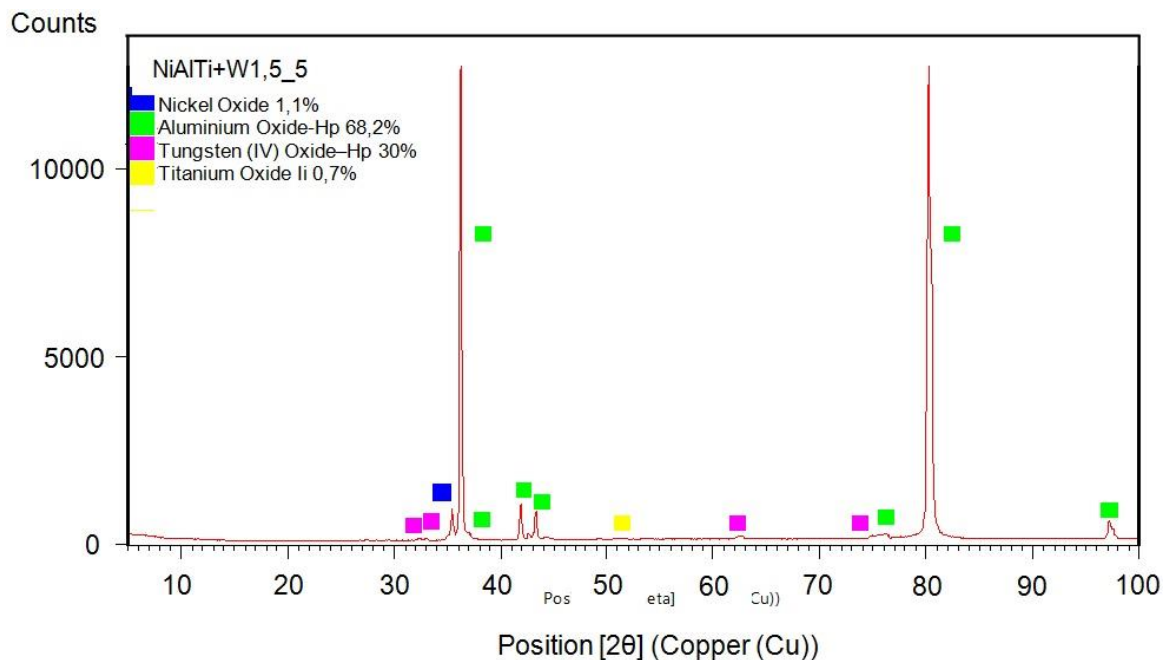
oksidasi maka ketebalan lapisan oksida yang dihasilkan juga akan semakin tebal.

Dari semua data yang terkumpul di atas terlihat bahwa penambahan unsur padamu wolfram kedalam paduan Ni-Al-Ti

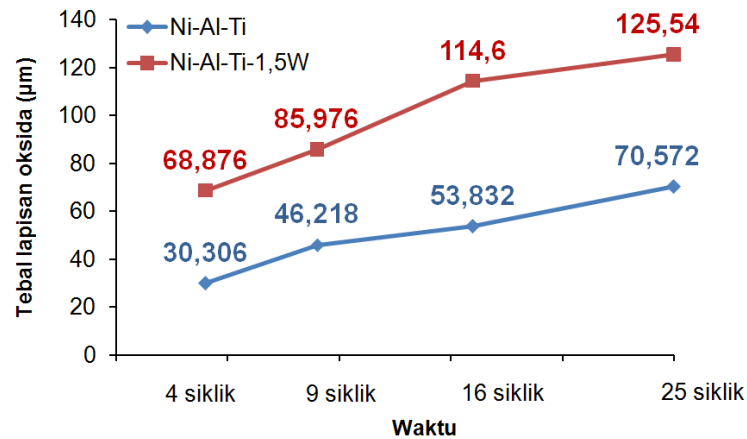
selain berfungsi sebagai penguat fasa gamma, penghambat laju pengkasaran butir, penstabil γ' , wolfram juga dapat meningkatkan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi[13].



Gambar 9..Grafik pengujian XRD Paduan Ni-Al-Ti setelah proses oksidasi siklik



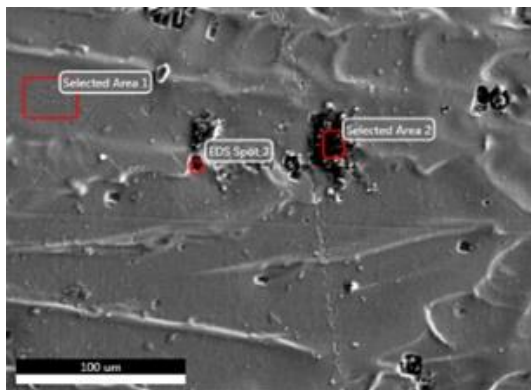
Gambar 10. Grafik pengujian XRD Paduan Ni-Al-Ti-1,5W sesudah proses oksidasi siklik.



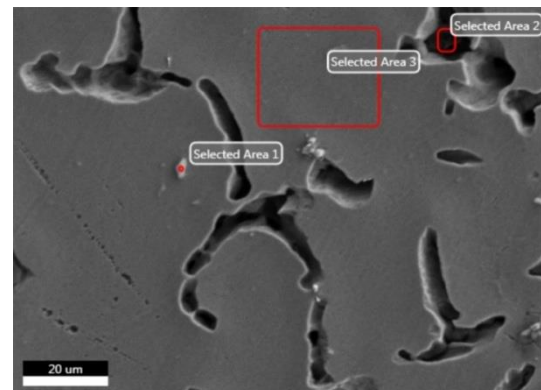
Gambar 11. Kurva perbandingan ketebalan oksida paduan Ni-Al-Ti dan paduan Ni-Al-Ti-1,5W

Hasil analisis data pengujian SEM-EDS pada paduan Ni-Al-Ti seperti terlihat pada Gambar 12 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa dari ketiga spot yang diambil, fasa yang terbentuk pada spot 1 adalah fasa Ni₂AlTi + Ni₃Al dan fasa yang terbentuk pada spot 3 adalah fasa Ni₃Al. Sementara itu, hasil

analisis data pengujian SEM-EDS pada paduan Ni-Al-Ti-1,5W, menunjukkan bahwa dari ketiga spot yang di ambil, fasa yang terbentuk pada spot 1 adalah fasa Ni₂AlTi + Ni-Al + Ni₃Al, fasa yang terbentuk pada spot 2 adalah fasa Ni₃Al dan fasa yang terbentuk pada spot 3 adalah fasa Ni₃Al.



Gambar 12. Hasil pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) Sampel Ni-Al-Ti



Gambar 13. Hasil pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) sampel Ni-Al-Ti-1,5W

Tabel 3. Data pengujian EDS Sampel Ni-Al-Ti

Element	Sampel Paduan Ni-Al-Ti					
	EDS Spot Area 1		EDS Spot Area 2		EDS Spot Area 3	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
AlK	7,71	15,03	21,87	35,02	8,01	15,56
TiK	11,30	12,41	45,08	40,66	11,30	12,37
NiK	80,99	72,56	33,05	24,32	80,69	72,07

Tabel 4. Data pengujian EDS Sampel Ni-Al-Ti-1,5W

Element	Sampel Paduan Ni-Al-Ti-1,5W					
	EDS Spot Area 1		EDS Spot Area 2		EDS Spot Area 3	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
AlK	11,73	22,03	5,03	10,08	8,67	16,77
TiK	9,22	9,75	11,70	13,21	10,15	11,06
NiK	79,05	68,22	83,27	76,71	81,18	72,17

SIMPULAN

Hasil analisis nilai kekerasan sampel NiAlTi+1,5 W memiliki nilai yang paling tinggi, yaitu 48,5 HRC untuk kondisi *as cast* dan 50,5 HRC untuk kondisi *as solution treatment*. Sampel Ni-Al-Ti memiliki nilai kekerasan 42,167 HRC untuk kondisi *as cast* dan 40 HRC untuk kondisi *as solution treatment*. Ketahanan oksidasi paling tinggi didapat pada sampel paduan Ni-Al-Ti yang dipadu dengan 1,5% wolfram (sampel Ni-Al-Ti-1,5W) diindikasikan oleh tipisnya lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan spesimen. Semakin besar jumlah siklik, maka ketebalan lapisan oksida yang terbentuk akan semakin tebal. Penambahan unsur wolfram pada paduan Ni-Al-Ti mempengaruhi morfologi struktur mikro paduan tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Mengucapkan terima kasih kepada Muhammad Yamin atas bantuannya dalam mempersiapkan bahan. Penulisan draf naskah dan revisi, perancangan dan proses penelitian serta analisis data dilakukan oleh Djoko Hadi Prajitno. Pengambilan data dan analisisnya sebagian dilakukan oleh Adam Aprilindra dan Pradoto Ambardi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Basuki, E. Agus, "Paduan logam untuk aplikasi temperatur tinggi dan penghematan energi", Bandung: Penerbit ITB. 2016.
- [2]. P. Srigiofun, P. Wangyao, G. Lothongkum, and E. Nisaratanaporn, "Effect of Al And Ti additions in cast nickel base alloy, grade hastelloy X by arc melting process on microstructures and oxidation behavior at 900°C and 1000°C," *Applied Mechanics And Materials*, vol. 548-549, pp. 274-279, 2014.
- [3]. Y. K. Kim, H. K. Kim, W.S. Jung, and B. J. Lee., "Development and application of Ni-Ti and Ni-Al-Ti 2NN-MEAM interatomic potentials for Ni-Base superalloys," *Computational Materials Science*, vol. 139, pp. 225-233, 2017.
- [4]. H. K. Zhang, Z. Yao, M. A. Kirk, and M. R. Daymond., "Stability of Ni₃(Al, Ti) gamma prime precipitates in a nickelbased superalloy inconel X-750 under heavy ion irradiation," *Metallurgical And Materials Transactions A: The Minerals, Metals & Materials Society And ASM International*, vol. 45a, 2014.
- [5]. Tomihisa, Y. Kaneno, and T. Takasugi, "Phase relation and microstructure in Ni₃Al–Ni₃Ti–Ni₃Nbpseudo-ternary alloy system," *Journal Intermetallics*, vol. 10, pp. 247-254, 2002.
- [6]. J. Popovic, P. Broz, and J. Bursik, "Microstructure and phase equilibria in the Ni–Al–W system," *Journal Intermetallics*, vol. 16, pp. 884-888, 2008.
- [7]. C. Chen, L. Zhang, J. Hua, "Diffusivities and atomic mobilities in disordered fcc and ordered L12 Ni–Al–W alloys," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 645, pp. 259-268, 2015.
- [8]. R. Mitra, "Intermetallic Matrix Composite: Properties and

- Applications," *Woodhead Publishing Series in Composite Science and Engineering*, 2017.
- [9]. C. K. Sudbrack, T. D. Ziebell, R. D. Noebe and D. N. Seidman, "Effect of a Tungsten Addition on the Morphological evolution, spatial correlations and temporal evolution of a model Ni-Al-Cr superalloy," 2008
- [10]. L. J. Zheng, F. X. Zhang, R. Ding, F. F. Wang, and H. Zhang, "New phase and deformation behavior in directional solidified NiTiAl based intermetallic alloy upon cyclic tensile loading – unloading," *Materials and Design*, vol. 110, pp. 494-502, 2016.
- [11]. Y. T. Wu, Y. C. Liu, C. Li, "Deformation behavior and processing maps of Ni₃Al-based superalloy during isothermal hot compression," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 712, pp. 687-695. 2017.
- [12]. Q. N. Fan, C. Y. Wang, J. P. Du, "A ternary Ni-Al-WEAM potential for Ni-based single crystal superalloys," *Physica B*, vol. 456, pp. 283 – 292, 2015.

