

KETAHANAN AUS ABRASIF DARI BEBERAPA JENIS MODIFIKASI 13Cr BAJA TAHAN KARAT MARTENSIT

Moch. Syaiful Anwar* dan Efendi Mabruki

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI
Gedung 470, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan
E-Mail: *moch026@lipi.go.id

Masuk Tanggal : 20-11-2015, revisi tanggal : 07-12-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 15-12-2015

Intisari

Beberapa komponen dari turbin uap seperti sudu stator dan rotor sering mengalami berbagai macam jenis keausan yang disebabkan karena partikel padat erosi yang terbawa selama turbin beroperasi. Tulisan ini menyajikan ketahanan aus abrasi baja tahan karat martensitik 13Cr dan modifikasinya. Sebanyak empat jenis modifikasi 13Cr baja tahan karat dipersiapkan untuk dilakukan proses peleburan secara induksi dan kemudian di cor menjadi ingot balok. Setelah melalui proses pengecoran, masing-masing ingot tersebut dilakukan proses tempa panas (*hot forging*) dan proses perlakuan panas pendinginan cepat (*quenching*) serta tempering. Empat jenis baja tahan karat tersebut dilakukan uji abrasi di bawah kertas amplas no. 120 dengan kecepatan putar 100 rpm pada pembebanan 100, 500 dan 1000 g, dan dengan jumlah putaran 100, 300, 500, 700 dan 1000 putaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat ketahanan aus abrasi yang paling tinggi terdapat pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni dengan nilai kehilangan berat 43,13 mg/cm² dan kekerasan 47,5 HRc. Sedangkan sifat ketahanan aus abrasi yang paling rendah terdapat pada baja tahan karat martensitik 13Cr dengan nilai kehilangan berat 63,87 mg/cm² dan kekerasan 47,7 HRc.

Kata Kunci: Ketahanan aus abrasi, Baja tahan karat martensitik, 13 Kromium-Molibdenum-Nikel, Kekerasan Rockwell C (HRc)

Abstract

The several components of steam turbine like the stator and rotor blade suffer from various kind of wear caused by solid particle erosion during turbine running. This paper presents the wear abrasion resistance of 13Cr martensitic stainless steel and its modifications. Four types of modification of 13Cr stainless steel is prepared with induction melting process and then cast into ingot molds. After casting process, each of ingot is conducted hot forging process followed by quenching and tempering process. Then the four type of stainless steel were conducted abrasion test against 120 SiC grinding paper, speed 100 rpm, load 100, 500 and 1000 g, and cycle 100, 300, 500, 700 and 1000 cycles. The results show that the higher wear abrasion resistant was found in the 13Cr3Mo3Ni martensitic stainless steel with weight loss of 43.13 mg/cm² and hardness of 47.5 HRc. The lower wear abrasion resistant was found in the 13Cr martensitic stainless steel with weight loss of 63.87 mg/cm² and hardness of 47.7 HRc.

Keywords: Abrasion wear resistance, Martensitic stainless steel, 13 Chromium-Molybdenum-Nickel, Hardness Rockwell C (HRc)

1. PENDAHULUAN

Keausan abrasi merupakan suatu mekanisme dimana permukaan material yang keras beradu dengan permukaan material yang lunak dan biasanya meninggalkan fragmen keausan diatas permukaan material yang lunak. Hal ini menjadi masalah utama di bidang otomotif, transportasi, pertambangan, pengolahan mineral, industri

pertanian dan ekskavasi^[1,2]. Baru-baru ini keausan abrasi juga menjadi masalah pada komponen-komponen turbin uap. Komponen-komponen tersebut dapat mengalami berbagai jenis kegagalan keausan selama turbin beroperasi, terutama yang disebabkan oleh partikel padat erosi SPE (*solid particle erosion*), karena interaksi dengan partikel padat tertahan yang dibawa oleh uap. Kegagalan

tersebut sering ditemukan pada sudu rotor dan stator silinder tekanan tinggi HPC (*high pressure cylinders*) dan silinder tekanan menengah MPC (*medium-pressure cylinders*) dari turbin uap serta permukaan *valve*, *sealing* dan *disk*. Jika tingkat SPE tinggi menyebabkan umur sudu stator dan rotor pada HPC dan MPC berkurang, efisiensi turbin turun, kerusakan peralatan, kecelakaan dan meningkatnya biaya perbaikan komponen yang rusak^[3].

Berbagai penelitian dilakukan untuk meningkatkan sifat ketahanan aus pada suatu material baja. Pendekatan perlakuan panas yang dapat memodifikasi struktur mikro atau fasa dan ukuran butiran dari baja, dan modifikasi permukaan baja dengan mengaplikasikan *coating* tahan abrasi merupakan suatu cara untuk meningkatkan ketahanan aus abrasi pada dekade ini.

Baja mangan 'Hadfield' dengan komposisi 12% Mn dan 1,2% C merupakan baja tahan abrasi pertama yang dibuat. Baja tahan abrasi lainnya adalah 1% baja kromium yang memiliki komposisi 0,55 – 0,65% C; 0,8 – 1,5% Cr dan baja NiHard yang memiliki komposisi 0,5% Si; 3 – 4% C; 2 – 4% Ni dan 1 – 2% Cr. Baja tahan karat martensitik memiliki sifat ketahanan abrasi lebih baik daripada baja tahan karat austenitik dan ferritik. Baja karbon dengan kandungan karbon tinggi juga memiliki ketahanan abrasi yang baik namun kurang tahan terhadap korosi. Besi tuang dan keramik juga memiliki sifat tahan abrasi namun memiliki sifat getas^[4].

Yi Cao dkk^[5] telah mempelajari tentang pengaruh temperatur tempering pada baja tahan karat dengan modifikasi Mo dan Ni. Dengan adanya proses tempering, karbida yang terbentuk diharapkan akan semakin banyak seperti karbida molibden dan karbida khrom. Penambahan Mo dan Ni ini tidak berpengaruh terhadap morfologi karbida pada temperatur temper rendah, namun dapat meningkatkan ketahanan aus ketika temperatur temper di atas 350 °C.

Xiaojun Xu dkk^[6] telah mereview pengaruh struktur mikro terhadap sifat keausan pada

material yang memiliki kekerasan rendah. Mikrostruktur yang terdiri dari dual fasa, ferit + martensit atau ferit + bainit, memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik daripada satu fasa, dan adanya sejumlah fraksi austenit sisa (*retained austenit*) juga memberikan pengaruh positif terhadap ketahanan aus baja.

Penelitian tentang aplikasi coating tahan abrasi juga telah dilakukan pada permukaan baja tahan karat. Artem V.R.^[3] menggunakan ion *plasma spray coating* dengan struktur nanokomposit. B.S. Mann^[7] menggunakan metode *coating boronizing*, Bruna dkk^[8], Eugenia L. Dalibon^[9] melakukan *nitriding* dengan metode *plasma nitriding* dan PACVD. L. Zhu^[10,11] menggunakan *coating* logam pada permukaan baja tahan karat. Namun pengaplikasian coating pada permukaan baja tahan karat ini memiliki kekurangan terhadap pengaruh oksidasi temperatur tinggi dan kekuatan adhesif antara *coating* dengan substrat.

Mengacu pada studi literatur yang ada, pada penelitian ini melakukan modifikasi 13Cr baja tahan karat martensitik dengan komposisi Mo dan Ni yang berbeda disertai dengan perlakuan panas tempering pada temperatur tertentu untuk meningkatkan sifat ketahanan aus abrasinya.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Ingot 13Cr baja tahan karat martensitik dengan empat komposisi yang berbeda dipersiapkan untuk dilakukan proses peleburan di dalam tungku induksi listrik. Kemudian hasil peleburan dicor pada cetakan ukuran 5x5x10 cm. Empat jenis ingot selanjutnya ditempa panas pada temperatur awal sekitar 1125 °C sampai mencapai ukuran melintang ingot sekitar 3x3 cm. Benda uji berbentuk persegi dengan tebal 1 cm dipotong dari paduan hasil tempa untuk dilakukan uji komposisi kimia menggunakan OES (*optical emission spectrometer*). Komposisi kimia empat paduan tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia (%berat) 13Cr baja tahan karat yang dipersiapkan pada percobaan ini

Jenis Baja	C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Fe
13Cr	0,14	0,003	0,002	0,98	0,32	13,60	0,02	0,29	Bal.
13Cr1Mo	0,13	0,003	0,002	0,94	0,31	13,13	0,80	0,29	Bal.
13Cr3Mo	0,13	0,005	0,002	0,87	0,24	12,85	2,43	0,28	Bal.
13Cr3Mo3Ni	0,10	0,005	0,002	0,61	0,24	12,73	2,52	2,93	Bal.

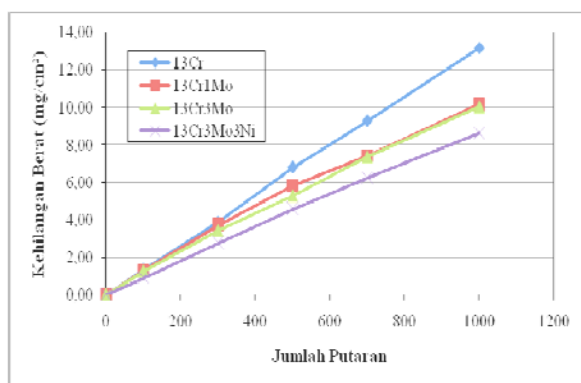
Setelah proses tempa (*forging*) selesai kemudian dilakukan proses austenisasi pada temperatur 1000 °C selama 1 jam diikuti dengan pendinginan cepat di dalam oli. Paduan austenisasi kemudian ditemper pada temperatur 625 °C selama 1 jam diikuti oleh pendinginan udara.

Pengujian abrasi dilakukan dengan rotari abrasi ADAMEL LHOMARGY pada sampel berbentuk silinder dengan luas permukaan 2 – 3 cm² dimana sampel tersebut diletakkan di bawah kertas SiC no. 120 yang berputar dengan kecepatan 100 rpm sebanyak 100, 300, 500, 700 dan 1000 putaran dengan pembebanan 100, 500 dan 1000 g pada temperatur ruang sekitar 30 °C. Hasil dari pengujian abrasi adalah kehilangan berat dengan satuan mg/cm² yang menunjukkan ketahanan abrasinya. Hubungan antara kekerasan dengan ketahanan abrasi ke-empat jenis sampel baja tahan karat juga dianalisa pada tulisan ini. Setelah uji abrasi pada masing-masing permukaan sampel dibersihkan dengan ethanol dan goresan-goresan jejak abrasi diamati dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) merk JEOL JSM 6390 A.

3. HASIL DAN DISKUSI

A. Pembebanan 100 g

Gambar 1 menunjukkan ketahanan abrasi ke-empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 100 g. Pada gambar ini, perbedaan ketahanan abrasi pada 100 kali putaran tidak terlalu signifikan untuk ke-empat jenis baja tahan karat. Pada putaran 300 kali baja tahan karat 13 Cr, 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo menunjukkan ketahanan abrasi yang relatif hampir sama.



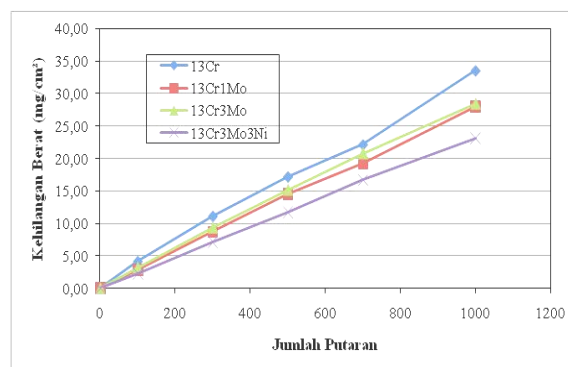
Gambar 1. Ketahanan abrasi empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 100 g

Pada putaran di atas 300 kali menunjukkan nilai ketahanan abrasi yang signifikan untuk ke-empat jenis baja tahan karat kecuali baja tahan karat 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo pada putaran 700 kali dan 1000 kali menunjukkan nilai ketahanan

abrasi relatif sama. Secara keseluruhan, ketahanan abrasi yang paling tinggi ditemukan pada sampel baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni daripada baja tahan karat lainnya pada 100 sampai 1000 kali putaran. Hal ini ditunjukkan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni yang memiliki nilai kehilangan berat yang lebih rendah 35% daripada baja tahan karat 13Cr dan 15% daripada 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo pada 1000 kali putaran.

B. Pembebanan 500 g

Gambar 2 menunjukkan ketahanan abrasi ke-empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 500 g. Pada gambar ini, perbedaan ketahanan abrasi pada 100 kali putaran tidak terlalu signifikan untuk ke-empat jenis baja tahan karat. Pada 100 kali putaran atau lebih baja tahan karat 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo menunjukkan ketahanan terhadap aus abrasi relatif hampir sama.



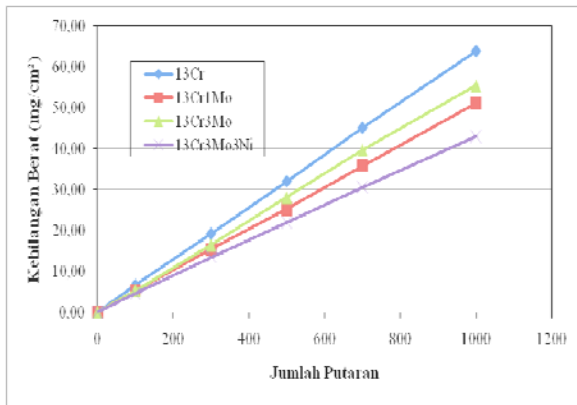
Gambar 2. Ketahanan abrasi empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 500 g

Secara keseluruhan, ketahanan abrasi yang paling tinggi ditemukan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni daripada baja tahan karat lainnya pada 100 sampai 1000 kali putaran. Hal ini ditunjukkan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni memiliki nilai kehilangan berat yang lebih rendah 31% daripada baja tahan karat 13Cr dan 18% daripada baja tahan karat 13Cr1Mo, serta 13Cr3Mo pada 1000 kali putaran.

C. Pembebanan 1000 g

Gambar 3 menunjukkan ketahanan abrasi ke-empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 1000 g. Pada gambar ini, perbedaan ketahanan abrasi pada 100 kali putaran tidak terlalu signifikan untuk ke-empat jenis baja tahan karat. Pada putaran 300 kali baja tahan karat 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo menunjukkan ketahanan abrasi yang relatif hampir sama. Secara keseluruhan, ketahanan abrasi yang paling tinggi ditemukan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni daripada

baja tahan karat lainnya pada 100 sampai 1000 kali putaran. Hal ini ditunjukkan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni yang memiliki nilai kehilangan berat yang lebih rendah 33% daripada baja tahan karat 13Cr; 22% daripada baja tahan karat 13Cr3Mo dan 16% daripada baja tahan karat 13Cr1Mo pada 1000 kali putaran.

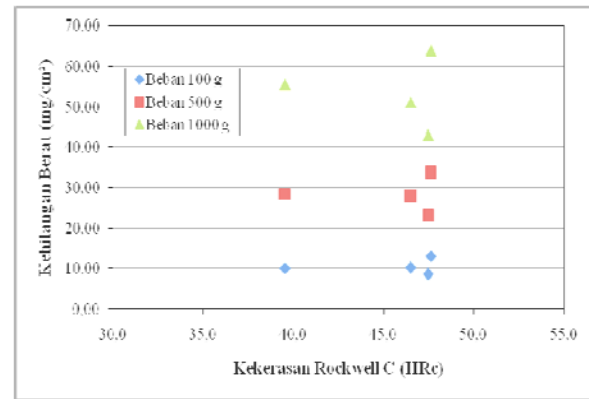


Gambar 3. Ketahanan abrasi empat jenis baja tahan karat dengan pembebanan 1000 g

D. Korelasi Antara Kekerasan dan Ketahanan Aus Abrasi

Pada Gambar 4 menampilkan korelasi antara uji kekerasan Rockwell C (HRC) dengan kehilangan berat hasil uji abrasi pada 1000 kali putaran dan pembebanan berbeda. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan bertambahnya pembebanan abrasi maka kehilangan berat yang dihasilkan pada masing-masing baja tahan karat juga bertambah. Hal tersebut mengindikasikan bahwa ketahanan aus abrasi pada masing-masing baja tahan karat menjadi berkurang dengan bertambahnya pembebanan. Namun, nilai kekerasan Rockwell C pada masing-masing baja tahan karat tidak menunjukkan peningkatan secara linier dengan peningkatan nilai kehilangan berat. Nilai kehilangan berat yang paling sedikit ditemukan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni yang memiliki kekerasan 47,5 HRC sedangkan nilai kehilangan berat yang paling banyak ditemukan pada baja tahan karat 13Cr yang memiliki kekerasan 47,7 HRC. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya^[5]. Jadi korelasi antara kekerasan dan ketahanan aus abrasi pada penelitian ini adalah baja tahan karat dengan nilai kekerasan tinggi tidak selalu memiliki sifat ketahanan aus abrasi yang tinggi. Begitu juga untuk baja tahan karat dengan nilai kekerasan rendah tidak selalu memiliki sifat ketahanan aus abrasi yang paling rendah juga. Hal tersebut disebabkan karena adanya pengaruh dari nilai kekerasan dan

struktur mikro yang terbentuk selama proses perlakuan panas pada masing-masing jenis baja tahan karat^[12]. Pada tingkat kekerasan dan pembebanan abrasi tertentu, baja tahan karat yang memiliki nilai kekerasan 39,6 HRC memiliki ketahanan abrasi yang sama dengan baja tahan karat yang memiliki nilai kekerasan 46,5 HRC pada pembebanan abrasi 100 dan 500 gram.



Gambar 4. Hubungan kekerasan HRC dengan ketahanan abrasi empat jenis baja tahan karat pada 1000 kali putaran dan pembebanan berbeda

E. Pengamatan Hasil SEM

Gambar 5 menunjukkan hasil pengamatan SEM pada masing-masing jenis baja tahan karat setelah uji abrasi pada pembesaran 1500X dan mode SEI. Setelah uji abrasi semua baja tahan karat menunjukkan goresan-goresan akibat dari abrasi dengan kertas SiC.

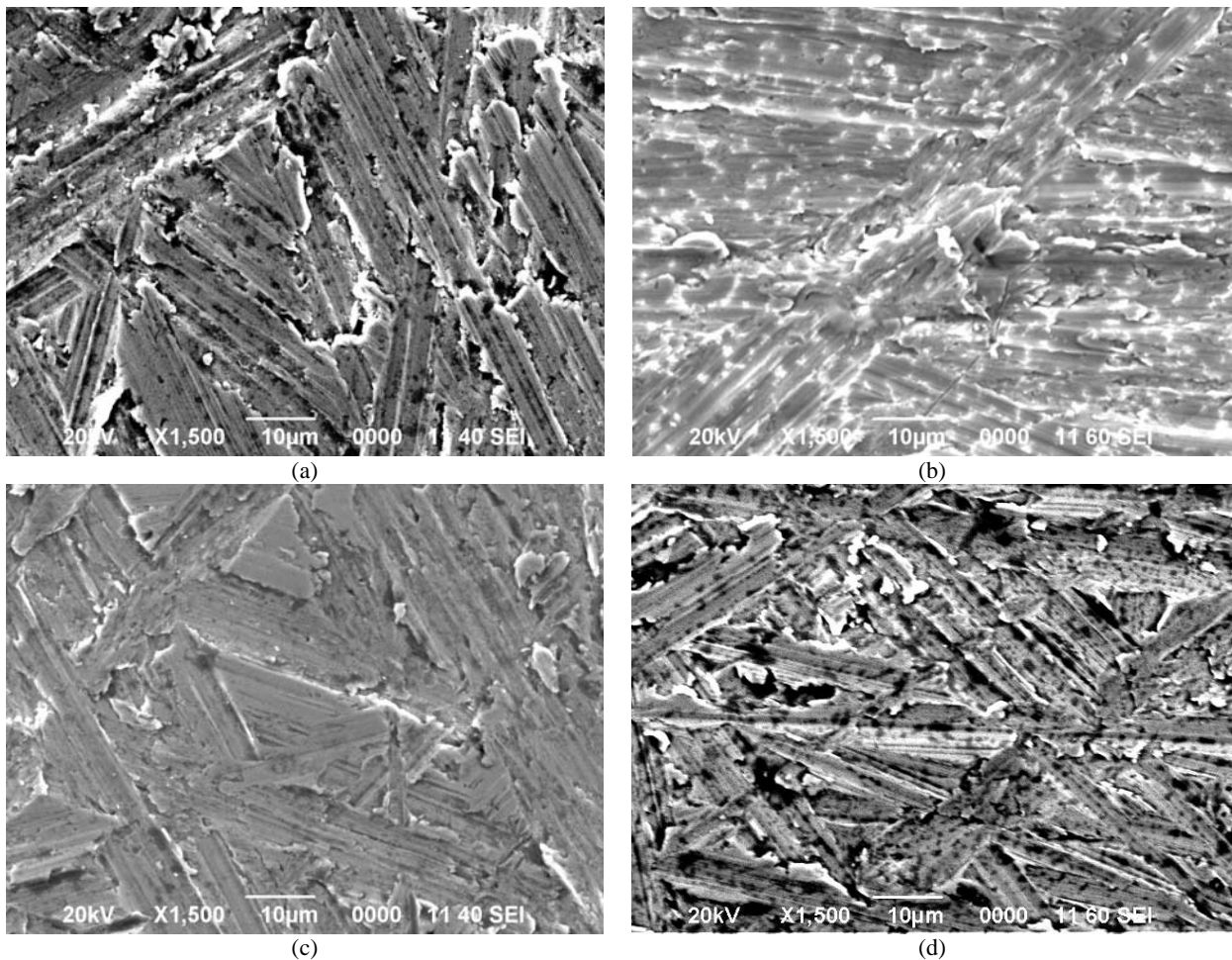
Pada Gambar 5a menunjukkan bahwa baja tahan karat 13Cr tidak memperlihatkan adanya presipitasi karbida logam.

Baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 1% Mo memperlihatkan kemungkinan adanya presipitasi karbida logam yang berbentuk bulat kecil putih yang ditunjukkan pada Gambar 5b. Sedangkan pada Gambar 5c menunjukkan bahwa baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 3% Mo tidak memperlihatkan adanya presipitasi karbida logam. Pada Gambar 5d menunjukkan bahwa baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 3% Mo dan 3% Ni memperlihatkan kemungkinan adanya presipitasi karbida logam yang berbentuk bulat kecil hitam.

Empat baja tahan karat setelah melalui proses perlakuan panas tempering, maka terbentuklah karbida logam (M_7C_3) sekunder. Karbida logam sekunder pada baja tahan karat 13Cr1Mo dan 13Cr3Mo3Ni dapat terlihat dengan menggunakan SEM pada pembesaran 1500X. Karbida logam yang terkandung di dalam baja tahan karat martensitik tersebut menghasilkan karbida krom dan karbida molibdenum^[13] di

dalam baja dengan sifat keras dan jika ditambahkan nikel maka kemungkinan menghasilkan baja dengan sifat yang keras dan ulet sehingga ketahanan terhadap aus abrasi menjadi tinggi. Oleh sebab itu baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni memiliki ketahanan aus abrasi lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja tahan karat lainnya. Baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 1% Mo memperlihatkan kemungkinan adanya presipitasi karbida logam yang berbentuk bulat kecil putih yang

ditunjukkan pada Gambar 5b. Sedangkan pada Gambar 5c menunjukkan bahwa baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 3% Mo tidak memperlihatkan adanya presipitasi karbida logam. Pada Gambar 5d menunjukkan bahwa baja tahan karat 13Cr dengan penambahan 3% Mo dan 3% Ni memperlihatkan kemungkinan adanya presipitasi karbida logam yang berbentuk bulat kecil hitam.



Gambar 5. Pengamatan SEM pada baja tahan karat; (a) 13Cr, (b) 13Cr1Mo, (c) 13Cr3Mo dan (d) 13Cr3Mo3Ni setelah uji abrasi pada pembesaran 1500X

4. KESIMPULAN

Dari serangkaian pengujian dan pembahasan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa sifat ketahanan aus abrasi dari baja tahan karat 13Cr, 13Cr1Mo, 13Cr3Mo, dan 13Cr3Mo3Ni dipengaruhi oleh sejumlah jenis karbida logam yang terbentuk di dalam masing-masing jenis baja tahan karat tersebut. Nilai ketahanan abrasi tidak naik secara linier dengan nilai kekerasan pada masing-masing jenis baja tahan karat. Sifat ketahanan aus abrasi yang paling tinggi terdapat pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni dengan nilai kehilangan berat 43,13 mg/cm² dan

kekerasan 47,5 HRc. Sedangkan sifat ketahanan aus abrasi yang paling rendah terdapat pada baja tahan karat martensitik 13Cr dengan nilai kehilangan berat 63,87 mg/cm² dan kekerasan 47,7 HRc.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) yang telah mendanai penelitian ini melalui kegiatan Kompetensi Inti pada Tahun Anggaran 2015.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Committee of stainless steel producers, "Review of the wear and galling characteristics of stainless steel," *American Iron and Steel Institute.*, USA, 1978.
- [2] J.Rendo'n, M. Olsson, "Abrasive wear resistance of some commercial abrasion resistant steels evaluated by laboratory test methods," *Wear.*, Vol. 267, pp. 2055–2061, 2009.
- [3] Artem Vyacheslavovich Ryzhenkov, Gennady Viktorovich Kachalin, Alexey Feliksovich Mednikov & Aleksander Borisovich Tkhabisimov, "The Investigation of Construction Materials and Protective Coatings Wear Resistance to Solid Particle Erosion," *Modern Applied Science.*, Vol. 9, No. 4, 2015.
- [4] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, "Engineering Tribology. 3th edition," *Elsevier.*, USA, 2005.
- [5] Yi Cao, Zhao-dong Wang, Jian Kang, Di Wu, Guo-dong Wang, "Effects of Tempering Temperature and Mo/Ni on Microstructures and Properties of Lath Martensitic Wear-Resistant Steels," *Journal of Iron and Steel Research, International.*, Vol. 20, Issue 4, pp. 70–75, 2013.
- [6] Xiaojun Xu, Wei Xu, Fre Hipgrave Ederveen, Sybrand van der Zwaag, "Design of low hardness abrasion resistant steels," *Wear.*, Volume 301, Hal. 89–93, 2013.
- [7] B.S. Mann, "Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behavior," *Wear.*, Vol. 208, pp. 125-131, 1997.
- [8] Bruna C.E.S. Kurelo, Gelson B. de Souza, Silvio L. Rutz da Silva, Francisco C. Serbena, Carlos E. Foerster, "Plasma nitriding of HP13Cr supermartensitic stainless steel," *Applied Surface Science.*, Vol. 349, pp. 403–414, 2015.
- [9] Eugenia L. Dalibon, Vladimir Trava-Airoldi, Lânia A. Pereira, Amado Cabo, Sonia P. Brühl, "Wear resistance of nitrided and DLC coated PH stainless steel," *Surface and Coatings Technology.*, Vol. 255, pp. 22–27, 2014.
- [10] L. Zhu, S. Zhu, F. Wang, J. Zhang, "Comparison of the cyclic oxidation behavior of a low expansion Ni + CrAlYSiN nanocomposite and a NiCrAlYSi coating," *Corrosion Science.*, Vol. 80, pp. 393–401, 2014.
- [11] N. Chaia, S. Mathieu, T. Cozzika, F. Rouillard, C. Desgranges, J.L. Courouau, C. Petitjean, N. David, M. Vilasi, "An overview of the oxidation performance of silicide diffusion coatings for vanadium-based alloys for generation IV reactors," *Corrosion Science.*, Vol. 66, pp. 285–291, 2013.
- [12] Tianjun Liu. Matthew T. Kiser and Thomas E. Clements, "Effect of Microstructures on Low Stress Abrasive Wear of Steel Plates," *International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels.*, 2011
- [13] Dararat Arparjirasakul, Tapany Patcharawit, and Usanee Kitkamthorn, "Dry Sliding Wear Characteristics of AISI440C Martensitic Stainless Steel," *International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014).*, March 29-30, Singapore, 2014.

STUDI AWAL KOROSI PADUAN INTERMETALIK $Ni_3(SiTi)$ DENGAN VARIASI SUHU LARUTAN NETRAL SODIUM KLORIDA

Gadang Priyotomo

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI
Gedung 470, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan
E-Mail: gadangp@gmail.com

Masuk Tanggal : 19-05-2015, revisi tanggal : 17-11-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 15-12-2015

Intisari

Paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$ berfasa tunggal $L1_2$ digunakan sebagai kandidat material pada lingkungan suhu tinggi. Studi awal ini dilakukan melalui investigasi dengan uji rendam dan uji polarisasi dalam larutan netral NaCl 0,5 M pada suhu ruang, 40 °C, dan 60 °C, dimana pengamatan morfologi paduan yang terkorosi dilakukan dengan peralatan SEM (*scanning electron microscope*). Kerentanan akibat korosi batas butir pada paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$ meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur uji. Peningkatan temperatur uji memberikan efek sulitnya terbentuk lapisan film stabil ditandai oleh pengecilan daerah pasif paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$. Serangan batas butir paduan $Ni_3(Si,Ti)$ diindikasikan karena segregasi boron pada batas butir.

Kata Kunci: Korosi batas butir, Paduan intermetalik, Kurva polarisasi, Uji rendam, Sodium klorida

Abstract

The intermetallic compound of $Ni_3(Si,Ti)$ containing $L1_2$ single phase, have been applied as a candidate for high temperature material. This preliminary study have been investigated using immersion test and polarization test in neutral 0.5 M NaCl solution at ambient temperature, of 40 °C and 60 °C, where the morphology of the corroded specimens were observed by scanning electron microscope. The susceptibility of intergranular corrosion for this compound increases with increasing the temperature of solutions. The increase of temperature contributes for the difficulty of stable film formation with decreasing passive regions. The corrosion resistance of the compound decreased with increasing temperature test. It implies that intergranular attack of the compound took place due to the presence of boron in grain boundaries.

Keywords: Intergranular corrosion, Intermetallic compound, Polarization curve, Immersion test, Sodium chloride

1. PENDAHULUAN

Paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$ dengan struktur fasa tunggal $L1_2$ mempunyai sifat keuletan dan kekuatan yang khas antara lain kekuatan alir meningkat dengan meningkatnya suhu dan kestabilan sifat keuletan paduan di rentang temperatur operasional yang luas^[1,2]. Paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$ menunjukkan performa ketahanan oksidasi yang baik pada suhu ruang dan tinggi^[3]. Pada performa kekuatan bahan, paduan intermetalik ini memiliki nilai tertinggi dibandingkan paduan komersial konvensional lainnya antara lain baja, paduan nikel, baja tahan karat (*stainless steel*) dan paduan intermetalik berstruktur $L1_2$ lainnya^[4]. Di sisi lain, paduan ini juga sangat rentan

terhadap penggetasan khususnya penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*) pada suhu ruang di lingkungan dengan kelembaban tinggi, dimana kerusakan ini terjadi melalui masuknya atom hidrogen melalui reaksi korosi^[5]. Kerusakan ini dapat diminimalisir dengan penambahan sedikit elemen boron ke dalam paduan ini^[6].

Walaupun demikian, Priyotomo dan kawan-kawan^[7,8,9] telah menemukan bahwa segregasi elemen boron pada batas butir menjadi daerah potensial untuk terjadinya proses korosi dengan ditandai dengan serangan batas butir pada paduan intermetalik $Ni_3(Si,Ti)$ setelah proses homogenisasi atau proses TMP (*thermomechanical process*) pada larutan

asam^[7,8,9]. Lebih jauh lagi, investigasi lainnya tentang performa ketahanan korosi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti. Wagle dan Priyotomo^[10,11] telah menginvestigasi performa korosi sumuran pada paduan ini pada lingkungan netral larutan sodium klorida. Potensi degradasi paduan ini akibat korosi akan terjadi saat unit proses mengalami *shutdown* produksi atau proses hingga suhu di bawah 100 °C atau suhu kamar. Lebih jauh lagi, makalah-makalah sebelumnya belum mengkaji performa ketahanan korosi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) dari sisi parameter suhu larutan uji.

Oleh karena itu, tujuan dari tulisan ini adalah mengetahui performa ketahanan korosi paduan Ni₃(Si,Ti) setelah proses TMP kemudian proses anil dengan variasi temperatur ruang, 40 °C dan 60 °C di larutan netral sodium klorida 0,5 M.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

A. Persiapan Spesimen dan Larutan Uji

Paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) dipersiapkan melalui proses pencampuran unsur-unsur terdiri dari 11% atom nikel, 9,5% atom silikon dan 9,5% atom titanium kemudian ditambah 50 ppm boron. Proses peleburan dilakukan pada tungku vakum arc di lingkungan atmosfer gas argon. Ingot dihomogenisasi pada suhu 1050 °C ditahan 48 jam kemudian didinginkan dengan laju pendinginan 10 °C/menit pada *muffle vacuum furnace* di lingkungan gas argon.

Ingot yang telah dihomogenisasi dilakukan rol hangat pada suhu 300 °C di udara terbuka hingga mendapatkan ketebalan tertentu dan kemudian dilakukan rol dingin hingga mendapatkan ketebalan akhir sekitar 1,2 mm. Setelah mendapatkan lembaran hasil rol, bahan tersebut dianil pada suhu 1000 °C dengan penahanan waktu sekitar satu jam. Semua pengerjaan preparasi bahan paduan dilakukan di Osaka prefecture University. Paduan intermetalik tersebut sama dan identik dengan spesimen yang dipakai di dalam penelitian ini terlihat pada Tabel 1. Nilai persen berat masing-masing unsur ekuivalen dengan nilai persen atom unsur-unsur tersebut. Komposisi kimia paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) dalam tulisan ini sama dengan paduan yang telah dipublikasikan dalam beberapa makalah^[7,8].

Tabel 1. Komposisi kimia paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti)

Unsur	% berat
Ni	85,9
Si	5,7
Ti	8,4

Spesimen uji dipotong dengan dimensi 1,2 mm x 9 mm x 15 mm. Kemudian diampelas, poles hingga 1,0 µm dengan alumina pasta, dibersihkan lemak dan kotoran dengan aseton pada mesin *ultrasonic cleaner* dan dibasuh dengan air distilasi. Larutan uji garam NaCl 0,5 M dipersiapkan dengan melakukan pencampuran air distilasi dan garam pro analisa NaCl. Observasi struktur mikro paduan menggunakan etsa elektrolitik, dimana spesimen dipoles di dalam larutan 17,8 M H₂SO₄ sebanyak 15 mL dan methanol sebanyak 85 mL pada kondisi nilai rapat arus sekitar 0,446 A/cm² ditahan 30 detik pada suhu -30 °C.

B. Uji korosi

1. Uji Rendam

Uji rendam pada spesimen dilakukan untuk mendapatkan data kehilangan berat (ΔW). Kehilangan berat didapat dengan melakukan perhitungan perbedaan berat spesimen sebelum dan sesudah uji rendam hingga 30 hari dengan variasi suhu ruang, 40 °C dan 60 °C pada kondisi sirkuit terbuka. Setelah pengujian tersebut, morfologi permukaan spesimen diobservasi dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*).

2. Pengujian Polarisasi

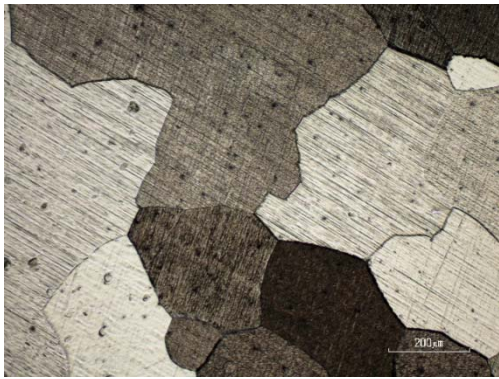
Pengukuran polarisasi menggunakan metode *potential step* dalam media larutan NaCl 0,5 M dengan variasi suhu ruang, 40 °C dan 60 °C dalam lingkungan udara terbuka. Elektroda acuan dan *electrode counter* yang digunakan adalah Ag/AgCl di dalam larutan jenuh potasium klorida dan lembaran platina. Pengukuran polarisasi dilakukan dengan rentang potensial antara -800 mV dan 1000 mV vs Ag/AgCl dimana nilai potensial diatur dari potensial korosi bebas dengan interval potensial sekitar 100 mV atau sebagian 50 mV dan ditahan sekitar 10 menit setiap pengukuran.

3. HASIL DAN DISKUSI

A. Mikrostruktur dan Identifikasi Paduan

Bahan spesimen pengujian penelitian ini digunakan bersama dengan Wagle^[10] dimana telah diuji pola difraksi puncak-puncak dengan alat XRD (*x-ray diffraction*). Hasil pengujian tersebut mengindikasikan paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) merupakan struktur L12^[10], dimana sama hasilnya yang dilakukan oleh Takasugi^[1].

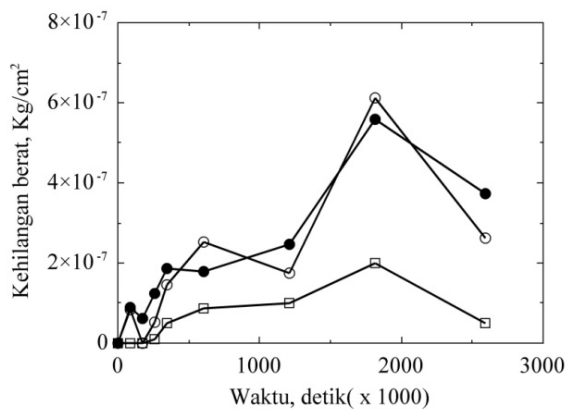
Pada Gambar 1 memperlihatkan mikrostruktur paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) dimana penampakan jelas butir-butir logam berstruktur fasa tunggal L1₂.



Gambar 1. Mikrostruktur paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) setelah di etsa elektrolitik

B. Uji Rendam

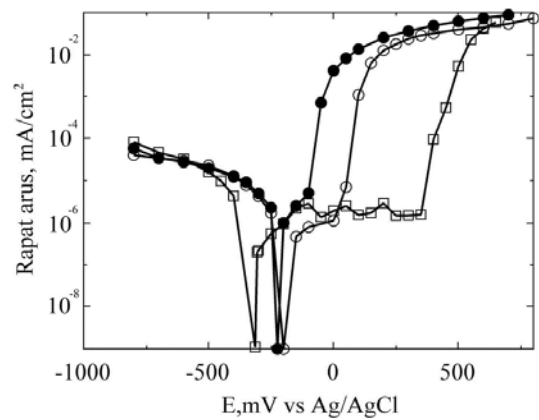
Gambar 2 memperlihatkan kurva kehilangan berat paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) terhadap waktu rendam hingga 30 hari dengan variasi suhu ruang, 40 °C dan 60 °C di dalam larutan netral NaCl 0,5 M. Nilai kehilangan berat pada masing-masing sampel meningkat seiring dengan meningkatnya waktu rendam dan temperatur larutan. Lebih jauh lagi, kurva kehilangan berat memperlihatkan bahwa ketahanan korosi menurun seiring dengan peningkatan suhu hingga 60 °C. Pengaruh suhu terhadap laju korosi juga terjadi pada *stainless steel* 316 dimana laju korosi meningkat dengan meningkatnya suhu^[12].



Gambar 2. Hasil kehilangan berat paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) terhadap waktu rendam hingga 30 hari dengan variasi suhu: □ruang; ○40 °C dan ●60 °C di larutan netral NaCl 0,5 M

C. Uji Polarisasi

Gambar 3 memperlihatkan kurva polarisasi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) terhadap waktu rendam hingga 30 hari dengan variasi suhu ruang, 40 °C dan 60 °C di dalam larutan netral NaCl 0,5 M, dimana kurva tersebut terbagi daerah anodik dan katodik.



Gambar 3. Hasil uji polarisasi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) terhadap waktu rendam hingga 30 hari dengan variasi suhu: □ruang; ○40 °C dan ●60 °C di larutan netral NaCl 0,5 M

Kurva polarisasi anodik paduan Ni₃(Si,Ti) pada suhu ruang tidak terlihat daerah aktif secara jelas, dimana rentang daerah pasif sekitar 400 mV. Di sisi lain, kenaikan temperatur larutan menurunkan daerah pasif paduan. Sebagai bahan perbandingan bahwa peningkatan temperatur larutan pada paduan INCOLOY 800 menurunkan daerah pasif, dimana daerah pasif hampir hilang pada suhu 60 °C dalam larutan klorida^[13]. Perilaku hilangnya daerah pasif pada temperatur 60 °C juga terjadi pada paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti). Sebagai tambahan, peningkatan temperatur larutan juga mengubah potensial evolusi oksigen ke arah negatif.

Pada daerah katodik, peningkatan temperatur larutan meningkatkan rapat arus katodik. Peningkatan rapat arus bersamaan dengan peningkatan jumlah partikel elektron setiap unit area yang disumbangkan melalui reaksi anodik dimana diindikasikan jumlah partikel elektron semakin tinggi seiring dengan peningkatan temperatur larutan. Lebih jauh lagi, pengukuran nilai rapat arus korosi (I_{corr}) dilakukan pada kurva polarisasi, dimana nilai rapat arus korosi pada suhu ruang lebih rendah ($1,5 \times 10^{-7}$ A/cm²) dibandingkan suhu 40 °C (6×10^{-7} A/cm²) dan 60 °C (1×10^{-6} A/cm²). Nilai rapat arus terbesar pada suhu 60 °C. Hasil – hasil yang didapat dari uji rendam dan uji polarisasi dapat diringkaskan antara lain :

- Ketahanan korosi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) menurun dengan meningkatnya suhu larutan dilihat dari kenaikan rapat arus korosi.
- Ketahanan korosi terendah terjadi pada suhu 60 °C, sebaliknya ketahanan korosi tertinggi pada suhu ruang di dalam larutan netral NaCl.

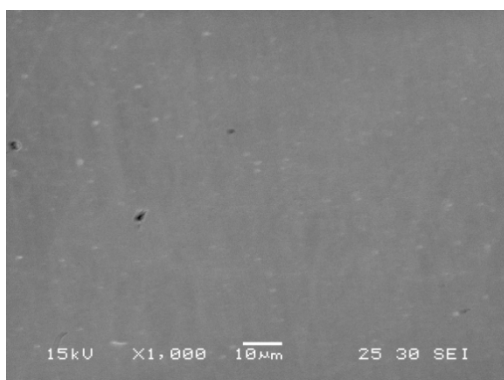
- Hasil uji rendam dan polarisasi bersinergis satu sama lain melalui urutan tingkat kerentanan korosi.

D. Morfologi Permukaan Paduan Setelah Uji Korosi

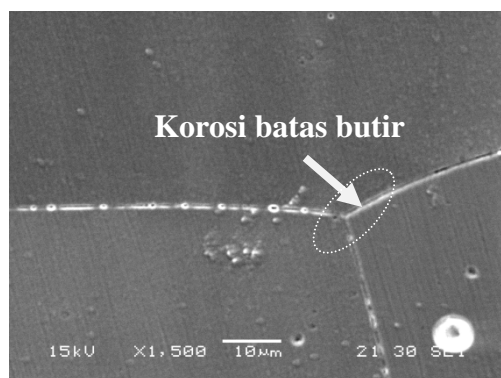
Pada Gambar 4a, 4b, dan 4c memperlihatkan morfologi permukaan paduan Ni₃(Si,Ti) setelah dilakukan waktu rendam selama 21 hari dengan variasi suhu ruang, 40 °C dan 60 °C dalam larutan netral NaCl 0,5 M. Pada suhu ruang, tidak jelas kegagalan atau sangat kecil kerusakan akibat korosi, sedangkan pada suhu 40 °C, kegagalan material akibat korosi mulai nampak dengan terbentuknya pola-pola garis putus serangan batas butir. Serangan batas butir semakin nampak, saat peningkatan suhu terjadi hingga 60 °C.

E. Penyebab Korosi Paduan Ni₃(Si,Ti)

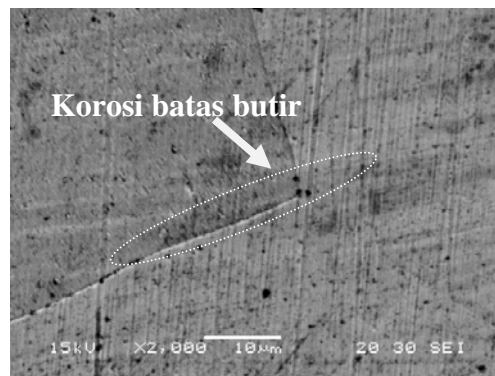
Pada Gambar 4b dan 4c terlihat indikasi serangan batas butir dengan pola parit di permukaan paduan intermetalik. Di sisi lain, serangan batas butir juga terjadi pada paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) di dalam larutan klorida berpH rendah pada waktu rendam di bawah 10 jam [7].



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Mikrostruktur paduan Ni₃(Si,Ti) setelah direndam selama 21 hari dalam larutan netral NaCl 0,5 M pada suhu (°C); (a) ruang, (b) 40, (c) 60. Etsa Elektrolitik

Pada suhu 40 °C dan 60 °C, dipertimbangkan telah terjadi korosi batas butir pada lingkungan kurang agresif berpH netral dengan waktu rendaman yang panjang, dimana serangan tersebut sama dengan paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) pada lingkungan agresif (korosif) dengan waktu rendaman yang pendek^[8]. Keberadaan segregasi boron di batas butir juga dimungkinkan untuk terjadinya serangan batas butir^[8]. Laju serangan korosi batas butir dikarenakan adanya peningkatan laju proses kimia dengan meningkatnya suhu berdasarkan hukum Arrhenius;

$$\text{Log } K = A - \frac{C}{T}$$

Dimana A dan C adalah konstanta, T adalah suhu absolut dan K adalah laju reaksi. Peningkatan laju reaksi kimia berhubungan dengan reaksi anodik dan katodik. Khususnya reaksi anodik dengan lepasnya kation. Reaksi reduksi oksigen dan air membentuk anion hidroksil (OH⁻). Anion OH⁻ bereaksi dengan kation logam membentuk lapisan pasif. Keberadaan lapisan pasif yang cukup stabil dideteksi melalui kurva polarisasi anodik melalui daerah pasif pada suhu ruang. Peningkatan temperatur larutan dapat meningkatkan jumlah partikel elektron setiap unit area di daerah anoda dimana proses transportasi ion melalui lapisan pasif sehingga konduktif dan pecah^[14].

4. KESIMPULAN

Pada tulisan yang berjudul studi awal korosi paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) dengan variasi suhu larutan netral sodium klorida memberikan suatu resume antara lain : kerentanan terjadinya korosi batas butir pada paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti) meningkat seiring dengan

meningkatnya temperatur uji. Adanya peningkatan temperatur uji memberikan efek sulitnya terbentuk lapisan film stabil diindikasikan mengecilnya daerah pasif paduan intermetalik Ni₃(Si,Ti), dan serangan batas butir paduan Ni₃(Si,Ti) diindikasikan karena segregasi boron pada batas butir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Professor [Ret] T. Takasugi, Professor [Ret] R. Nishimura, Associate Professor Y. Kaneno dan rekan-rekan di Osaka Prefecture University.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Takasugi, T., Nagashima, M. and Izumi, O, "Strengthening and ductilization of Ni₃Si by the addition of Ti elements," *Acta Metallurgica Et Materialia.*, vol. 38, pp. 747-755, 1990.
- [2] Takasugi, T. and Yoshida, M, "Mechanical properties of Ni₃(Si,Ti) polycrystals alloyed with substitutional additions," *Journal of Materials Science.*, vol.26, pp. 3517-3525, 1991.
- [3] Kaneno, T. and Takasugi, T, "The effects of Nb and Cr addition on mechanical and chemical properites of cold-rolled Ni₃(Si,Ti) intermetallic foils," *Materials Science Forum.*, vol. 561-565(1), pp. 411-414, 2007.
- [4] Kaneno, Y., Myoki, T. and Takasugi, T, "Tensile properties of L12 intermetallic foils fabricated by cold rolling," *International Journal of Materials Research.*, vol. 99(11), pp. 1229-1236, 2008.
- [5] Takasugi, T., Hono, K., Suzuki, S., Hanada, S. and Sakurai, T, "Environmental embrittlement and grain boundary segregation of boron in Ni₃(Si,Ti) and Co₃Ti alloys," *Scripta Metallurgica et Materialia.*, vol. 29(12), pp. 1587-1591, 1993.
- [6] Takasugi, T., Ma, C.L. and Hanada, S, "Environmental embrittlement and grain boundary segregation of boron and carbon in Ni₃(Si, Ti) alloys," *Materials Science and Engineering A.*, vol. 192/193, pp. 407-412, 1995.
- [7] Priyotomo, G., Okitsu, K., Iwase, A., Kaneno, Y., Nishimura, R. and Takasugi, T, "The corrosion behavior of intermetallic compounds Ni₃(Si,Ti) and Ni₃(Si,Ti) + 2Mo in acidic solutions," *Applied Surface Science.*, vol. 257(19), pp. 8268-8274, 2011.
- [8] Priyotomo, G., Wagle, S., Okitsu, K., Iwase, A., Kaneno, Y., Nishimura, R. and Takasugi, T, "The corrosion behavior of Ni₃(Si,Ti) intermetallic compounds with Al, Cr, and Mo in various acidic solutions," *Corrosion Science.*, vol. 60, pp. 10-17, 2012.
- [9] Priyotomo, G, "The effect of Annealing Temperature after Thermomechanical Process to The Corrosion Behavior of Ni₃(Si,Ti) in Chloride Solution," *Teknologi Indonesia.*, vol.36 (2), pp. 97-104, 2013.
- [10] Wagle, S., Priyotomo, G., Kaneno, Y., Iwase, A., Takasugi, T. and Nishimura, R, "Pitting Corrosion of Intermetallic Compound Ni₃(Si,Ti) in Sodium Chloride Solutions," *Corrosion Science.*, vol.53, pp. 2514-2517, 2011.
- [11] Priyotomo, G, "Pitting Corrosion of Ni₃(Si,Ti) Intermetallic Compound at Various Chloride Concentrations," *International Journal of Science and Engineering.*, vol. 5(2), pp. 25-28, 2013.
- [12] Christine Trépanier and Alan R. Pelton, "Effect of Temperature and pH on The Corrosion Resistance of Passivated Nitinol and Stainless Steel," in *Proc. SMST-2004.*, pp. 361-366, 2006.
- [13] Sherif, M.S and Seikh, H.A, "Effect of Exposure Period and Temperature on the Corrosion of Incoloy® Alloy 800™ in Hydrochloric Acid Pickling Solutions," *International Journal of Electrochemical Science.*, vol.10, pp. 1843-1854, 2015.
- [14] Frankel, G.S, Issacs, H.S, Scully, J.R and Sinclair, J.D, "Corrosion Science: A Retrospective and Current Status in Honor of Robert P. Frankenthal., New York: *The Electrochemical Society Inc.*, pp. 211, 2002.

