

# Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Ketahanan Oksidasi Suhu Tinggi Pada Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr3Mo3Ni-Cast

Moch. Syaiful Anwar<sup>1,\*</sup>, Eric Jonathan Yulianto<sup>2</sup>, Septian Adi Chandra<sup>1</sup>, Rahma Nisa Hakim<sup>1</sup>, Sri Hastuty<sup>3</sup>, Efendi Mabruri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 470, Tangerang Selatan, Indonesia 15314

<sup>2</sup> Teknik Energi Fisika, Universitas Surya  
Jl. Boulevard Gading Serpong Kav. M5 no. 21, Summarecon Serpong, Tangerang, Indonesia 15810

<sup>3</sup> Teknik Mesin, Universitas Pertamina,  
Jl. Teuku Nyak Arief, Simprung, Jakarta, Indonesia 12220

## Abstrak

Tulisan ini memaparkan pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan oksidasi suhu tinggi pada baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni-cor. Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan kualitas baja tersebut melalui proses perlakuan panas terhadap struktur mikro, kekerasan dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi. Proses pembuatan baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cor dilakukan menggunakan proses peleburan induksi dan pengecoran sedangkan perlakuan panas yang dialami oleh baja tersebut antara lain austenitasi, tempering tunggal dan tempering ganda. Proses austenitasi dilakukan pada temperatur 1020°C selama 4 jam dan didinginkan di air kemudian dilanjutkan proses tempering 650°C selama 2 jam dan didinginkan di udara dan kemudian dilanjutkan proses tempering ganda 550°C selama 2 jam dan didinginkan di udara. Pengujian struktur mikro, kekerasan dan uji oksidasi temperatur tinggi 400-700 °C dilakukan pada masing-masing baja dengan perlakuan panas yang berbeda. Kemudian, hasil eksperimen baja temper ganda dibandingkan dengan baja kontrol, baja austenitasi dan baja temper tunggal. Perlakuan panas temper ganda menghasilkan dampak positif terhadap ketahanan baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni-cor di lingkungan suhu tinggi.

**Kata kunci:** suhu tinggi; oksidasi; baja tahan karat martensitik; 13Cr3Mo3Ni-cor; perlakuan panas; struktur mikro; kekerasan vikors

## Abstract

**[Title: Effect of heat treatment on micro structure, hardness, high temperature oxidation resistance of martensitic stainless steel 13Cr3Mo3Ni-cast].** This paper reports the effect of heat treatment on microstructure, hardness and high temperature oxidation resistance of martensitic stainless steels 13Cr3Mo3Ni-cast. The aim of this research is to increase quality of the steel through heat treatment process on microstructure, hardness and high temperature oxidation resistance. The steel samples were prepared by a process sequence of induction melting, casting, austenitization, single tempered and double tempered. Austenitization process of 1020°C was conducted until 4 hours and quenched in water. Then, tempering process of 650°C was carried out until 2 hours and cooled in the air and then double tempering process of 550°C was carried out until 2 hours and air cooled. The double tempered steels were subjected to microstructure, hardness and high temperature oxidation test of 400 – 700 °C. Then, the experimental results of double tempered steel were compared with control, austenitized and single tempered steels. The double tempered treatment revealed a positive effect on the increment properties of martensitic stainless steel 13Cr3Mo3Ni-cast in the high temperature environment.

<sup>\*</sup> Penulis Korespondensi.  
E-mail: moch026@lipi.go.id

**Keywords:** *high temperature; oxidation; martensitic stainless steel; 13Cr3Mo3Ni-cast; heat treatment; microstructure; hardness vikers*

**1. Pendahuluan**

Baja tahan karat martensitik merupakan baja untuk sudu turbin uap yang memiliki temperatur operasi antara 600-700 °C dengan tekanan uap air superkritis sekitar 24 MPa. Adanya konversi uap air yang memiliki tekanan tinggi menjadi uap air yang memiliki kecepatan tinggi dapat menggerakkan sudu-sudu turbin berputar sangat cepat sehingga generator dapat menghasilkan tenaga listrik (Anwar & Mabruri, 2010). Selain itu, adanya atmosfer turbin seperti gas CO, CO<sub>2</sub> dan uap air yang terkontaminasi ion klorida dapat merusak lapisan tipis kromium oksida yang terbentuk dipermukaan sudu turbin (McCloskey dkk., 1999). Umumnya, modifikasi komposisi kimia merupakan salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi baja tahan karat martensitik. Kadar kromium kurang dari 18% memiliki ketahanan terhadap suhu dibawah 816°C. Kadar kromium antara 18-20% digunakan pada suhu 982°C. Kadar kromium sampai 25% memiliki ketahanan oksidasi atau scaling cukup baik (www.nickel Institute.org, 2018). Penambahan unsur nikel didalam kandungan baja tahan karat martensitik juga dapat meningkatkan ketahanan oksidasi suhu tinggi dan paduan ini telah digunakan di pembangkit listrik (Liu dkk, 2015). Selain itu, ketahanan oksidasi suhu tinggi juga dipengaruhi oleh ukuran butiran meskipun kadar kromium didalam baja tahan karat dibawah 10%. Pada penelitian sebelumnya, baja dengan kadar krom rendah (kurang dari 2 %wt Cr) dengan ukuran butiran yang lebih halus (4 µm) dapat menghasilkan ketahanan oksidasi terhadap suhu tinggi semakin baik dibandingkan dengan baja dengan ukuran butiran kasar (Trindade, 2010). Lapisan krom oksida (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang terbentuk dipermukaan baja tahan karat yang terekspos pada suhu tinggi dapat berkontribusi sebagai proteksi diri dari pengaruh kontaminan (ion klorida) (Huttunen dkk, 2016). Pada penelitian ini, ketahanan oksidasi suhu tinggi baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni hasil dari proses pengecoran akan diinvestigasi. Suhu oksidasi 400-700 °C dipilih karena mensimulasikan berbagai macam suhu operasi turbin di PLTU (Di Gianfrancesco, 2017). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari perlakuan panas tempering ganda terhadap ketahanan oksidasi suhu tinggi serta struktur mikro dan kekerasan pada baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni.

**2. Bahan dan Metode**

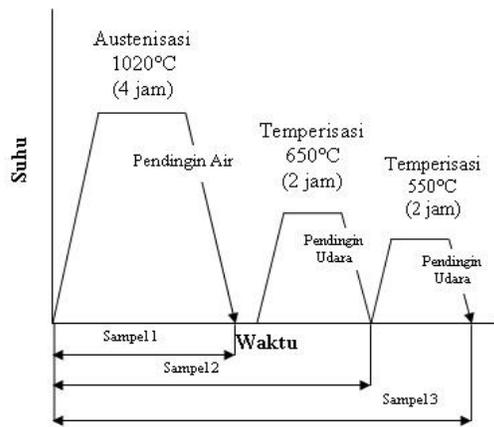
Baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni dibuat dari bahan baku skrap baja dan beberapa ingot *ferro alloy* yang digunakan sebagai unsur pepadu dengan menggunakan tungku peleburan induksi. Kemudian,

logam cair dicor di dalam cetakan pasir yang berbentuk balok. Logam cair yang telah beku dipotong melintang menjadi empat buah sampel baja dengan masing-masing ukuran 1x1x1 cm.

Salah satu sampel uji dengan ketebalan sekitar 1 cm untuk digunakan sebagai sampel uji komposisi kimia dengan alat OES (*Optical Emission Spectrometry*) dan hasilnya disajikan pada Tabel 1. Masing-masing potongan sampel uji dilakukan perlakuan panas yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sampel kontrol merupakan sampel tanpa perlakuan panas, sampel 1 merupakan sampel dengan perlakuan panas austenisasi pada suhu 1020°C selama 4 jam dan didinginkan cepat (*quenching*) di dalam air, sampel 2 merupakan sampel austenisasi yang dilanjutkan dengan pemanasan temperisasi pada suhu 650°C selama 2 jam dan didinginkan di udara terbuka dan sampel 3 merupakan sampel temperisasi yang dilanjutkan dengan pemanasan temperisasi lagi pada suhu 550°C selama 2 jam dan didinginkan di udara terbuka. Selama proses perlakuan panas austenisasi dan temperisasi, masing-masing sampel baja dimasukkan didalam crucible dan ditimbun dengan arang batok kemudian crucible yang berisikan sampel dimasukkan ke tungku *muffle*. Pada keempat sampel baja dilakukan pengujian metalografi (struktur mikro), kekerasan mikro Vickers dan uji oksidasi. Persiapan sampel untuk metalografi dilakukan dengan prosedur standar yang terdiri dari *grinding*, *polishing* dan *etching* menggunakan larutan Kalling. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Uji Oksidasi pada masing-masing sampel dilakukan didalam tungku *muffle* pada suhu 400, 500, 600 dan 700 °C selama 24 jam. Pengamatan lapisan oksida hasil uji oksidasi dilakukan dengan menggunakan SEM (*scanning electron microscopy*) JEOL Model JSM-5400 dan analisis unsur didalam lapisan oksida menggunakan EDS (*energy dispersive spectroscopy*) yang terintegrasi dengan SEM.

**Tabel 1.** Komposisi kimia (%berat) baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni yang dibuat dalam penelitian

No	Unsur Kimia	Komposisi kimia (%berat)
1	C	0,07408
2	S	0,0000
3	P	0,0092
4	Mn	0,59093
5	Si	0,43953
6	Cr	12,45719
7	Mo	2,70259
8	Ni	2,97479
9	Fe	Bal

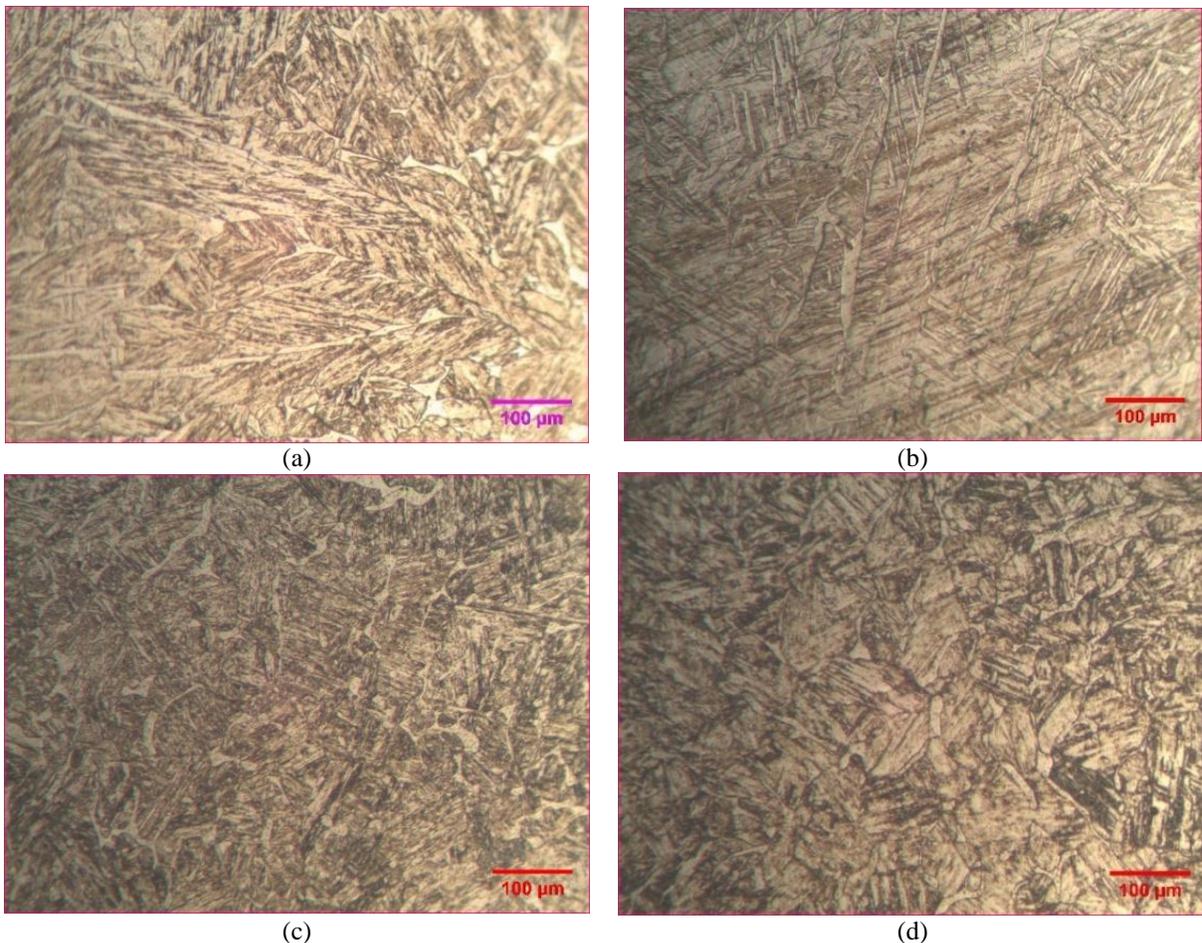


Gambar 1. Kondisi perlakuan panas didalam penelitian

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Struktur Mikro

Gambar 2 (a-d) menunjukkan struktur mikro baja tahan karat martensitik 13Cr3Mo3Ni-cast sebelum dilakukan uji oksidasi. Umumnya, struktur mikro yang terbentuk adalah martensit, austenit sisa, karbida logam dan ferrit delta pada baja dengan atau tanpa perlakuan panas. Namun, pada Gambar 2(a-d) memperlihatkan adanya perbedaan bentuk butiran. Pada Gambar 2(a-b) baja 13Cr3Mo3Ni-cast didominasi oleh bentuk butiran yang relatif panjang sedangkan pada Gambar 2(c-d) baja 13Cr3Mo3Ni-cast didominasi oleh bentuk butiran yang relatif bulat. Adanya perbedaan bentuk butiran ini adalah akibat dari pengaruh proses tempering pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast.



Gambar 2. Struktur mikro baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cast perbesaran 200X sebelum uji oksidasi, (a) Control, (b) Austenisasi 1020°C/4h dan Quenching air, (c)Tempering 650 °C/2h dan pendinginan udara, (d)Tempering ganda (650°C dan 550°C)/2h dan pendinginan udara

Proses tempering pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast juga memperlihatkan struktur mikro martensit yang lebih halus jika dibandingkan pada baja tanpa

dilakukan proses tempering. Proses tempering ganda pada 650°C dan 550°C yang ditunjukkan pada Gambar 2(d) memperlihatkan butiran yang relatif bulat dan

lebih rapat jika dibandingkan dengan baja yang hanya dilakukan perlakuan tempering tunggal pada suhu 650°C. Perubahan ukuran butiran dan struktur mikro yang disebabkan karena proses pelakuan panas juga ditemukan pada penelitian sebelumnya (Mabruri dkk., 2015; Siska dkk., 2016). Selain itu, proses tempering bertujuan untuk mengurangi austenit sisa pada baja ini dimana menurut Garrison Jr. keberadaan austenit sisa ini tidak diinginkan pada baja tahan karat martensitik (Garrison Jr & Amuda, 2017).

3.2. Kekerasan Vickers Sebelum Uji Oksidasi

Perbedaan struktur mikro tersebut mempengaruhi nilai kekerasan pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast. Tabel 1 menunjukkan hasil uji kekerasan mikro vickers (HV) baja 13Cr3Mo3Ni-cast sebelum uji oksidasi. Sebanyak enam titik dicatat nilai kekerasannya pada masing-masing baja dan kemudian dirata-rata. Posisi ke-enam titik tersebut terletak dibagian tengah penampang cross section pada baja. Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kekerasan paling tinggi 451,8 HV terdapat pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast yang mengalami

proses austenisasi 1020°C selama 4 jam dengan quench air. Sedangkan nilai kekerasan paling rendah 304 HV terdapat pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast yang mengalami tempering ganda. Nilai kekerasan Baja 13Cr3Mo3Ni dengan perlakuan proses temper ganda (304 HV ≈ 300 BHN) memiliki kekerasan yang sesuai dengan kekerasan material standar (270-300 BHN) untuk aplikasi sudu tekanan rendah pada turbin uap. Penurunan nilai kekerasan yang disebabkan karena proses temper ganda juga ditemukan pada penelitian Tao, 2016. Menurut Tao, proses temper ganda mengakibatkan kekerasan baja tersebut turun namun ketahanan terhadap impact meningkat (Tao dkk., 2016).

Sedangkan, baja 13Cr3Mo3Ni-cast dengan perlakuan austenisasi, temper tunggal (650°C) dan control memiliki nilai kekerasan lebih tinggi jika dibandingkan dengan kekerasan material standar sudu tekanan rendah pada turbin uap. Hal tersebut dapat menginisiasi retak mikro pada baja ketika baja tersebut terekspos pada kecepatan putaran tinggi (Ziegler dkk, 2013).

**Tabel 1.** Hasil Uji kekerasan mikro vickers (HV) baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cast sebelum uji oksidasi

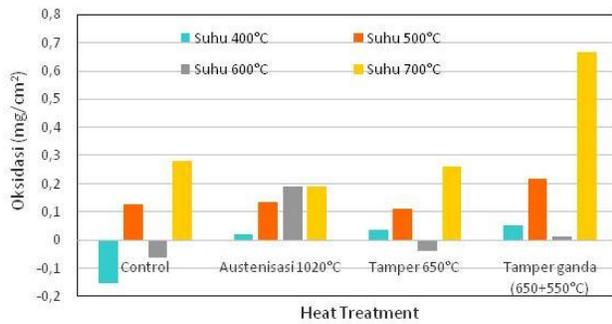
Titik	Kekerasan Vickers (HV)			
	Control	Austenisasi	Temper 650°C	Temper ganda (650°C dan 550°C)
1	449,5	472,1	294,7	313,1
2	423,4	454,6	323,9	311,6
3	401	450,5	312,7	295,9
4	416,9	446,7	335,4	299,7
5	402,9	448,8	314,6	306,5
6	394,1	437,9	316	297,2
<b>Rata-rata</b>	<b>414,6</b>	<b>451,8</b>	<b>316,2</b>	<b>304</b>

3.3. Uji Oksidasi Suhu Tinggi

Gambar 3 menunjukkan hasil uji oksidasi baja 13Cr3Mo3Ni-cast pada variasi suhu selama 24 jam. Ketahanan baja 13Cr3Mo3Ni-cast terhadap oksidasi dapat diamati berdasarkan pertambahan berat yang diperoleh dari hasil pemanasan baja pada suhu 400, 500, 600 dan 700 °C. Secara keseluruhan, baja 13Cr3Mo3Ni-cast dengan atau tanpa perlakuan panas memperlihatkan adanya pertambahan berat setelah dilakukan uji oksidasi pada suhu 400-700 °C kecuali baja kontrol dan baja temper 650°C dengan suhu pemanasan 400 dan 600 °C yang memperlihatkan adanya pengurangan berat. Adanya pertambahan berat mengindikasikan permukaan baja 13Cr3Mo3Ni-cast terdapat lapisan oksida yang sangat tipis dan stabil. Sedangkan lapisan oksida yang terbentuk diatas permukaan baja 13Cr3Mo3Ni-cast control dan temper 650°C memiliki sifat ductile pada suhu tinggi dan sifat brittle pada suhu rendah. Beberapa lapisan oksida

memiliki koefisien ekspansi termal berbeda-beda sehingga lapisan oksida yang terbentuk pada suhu tinggi dapat kehilangan ikatan dengan substrat ketika didinginkan pada suhu rendah dan menjadi lapisan non-protective (Rujisomnana dkk., 2010). Hal tersebut mengakibatkan terjadinya pengurangan berat pada baja tersebut setelah uji oksidasi suhu 400 dan 600 °C.

Pada Gambar 3 juga menunjukkan baja 13Cr3Mo3Ni-cast temper ganda memiliki nilai pertambahan berat paling kecil jika dibandingkan dengan baja lainnya setelah mengalami uji oksidasi suhu 600°C. Hal tersebut mengindikasikan baja 13Cr3Mo3Ni-cast hasil temper ganda memiliki ketahanan oksidasi suhu 600°C paling tinggi jika dibandingkan dengan baja lainnya. Namun, baja 13Cr3Mo3Ni-cast hasil temper ganda pada suhu oksidasi kurang dan lebih dari 600°C memiliki ketahanan oksidasi lebih rendah jika dibandingkan dengan baja lainnya.

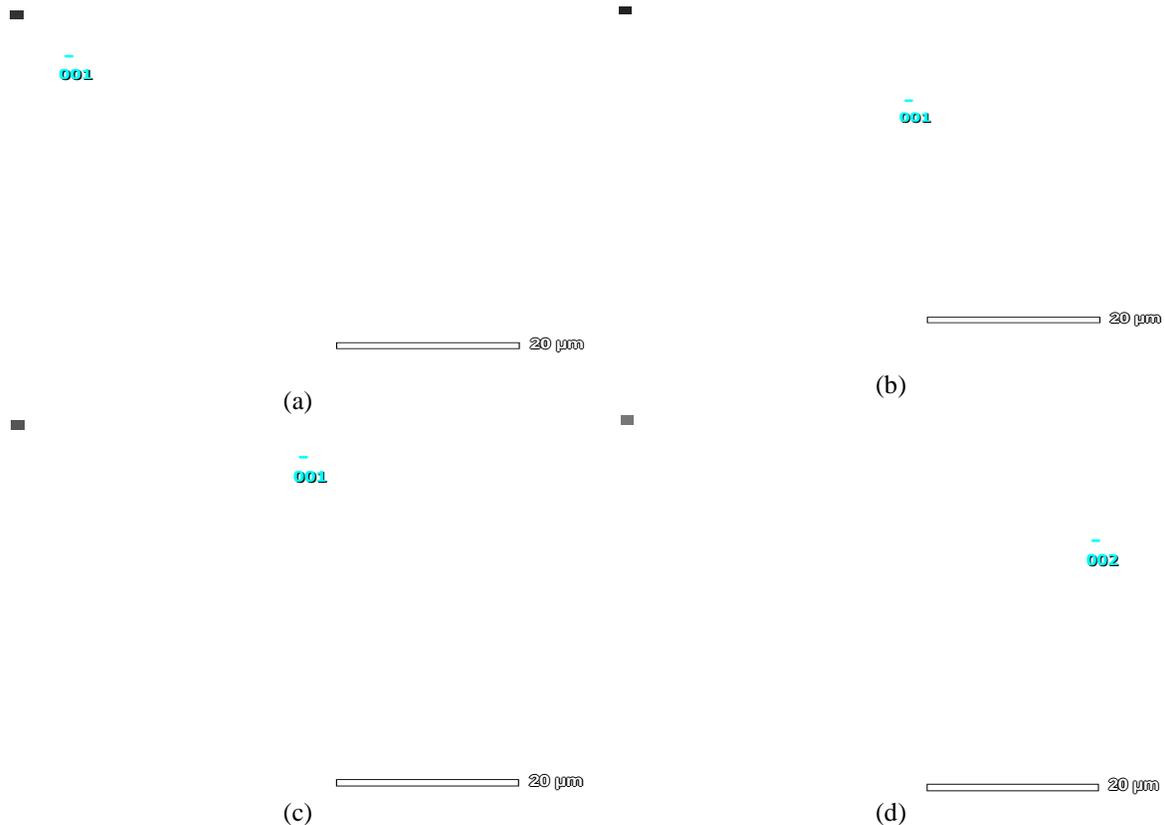


**Gambar 3.** Hasil Uji Oksidasi baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cast selama 24 jam pada variasi suhu

3.4. Observasi SEM dan EDS

Gambar 4(a-d) menunjukkan observasi SEM baja 13Cr3Mo3Ni-cast dengan dan tanpa perlakuan panas setelah uji oksidasi suhu 600°C. Secara keseluruhan lapisan oksida yang terbentuk di atas permukaan baja 13Cr3Mo3Ni tidak merata dan sangat tipis. Pada pembesaran 2000X, ketebalan lapisan oksida baja 13Cr3Mo3Ni-cast dengan perlakuan panas austenisasi 1020°C lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja lainnya.

Komposisi kimia dari lapisan oksida yang di analisa menggunakan partial EDS disajikan pada Tabel 2. Secara keseluruhan, lapisan oksida terbentuk diatas permukaan baja 13Cr3Mo3Ni-cast dengan atau tanpa perlakuan panas. Hasil yang sama juga ditemukan pada penelitian Liu dkk., 2015 yang menyatakan bahwa lapisan oksida yang terbentuk diatas baja tahan karat martensitik terdiri dari lapisan oksida luar dan lapisan oksida dalam (Liu dkk., 2015). Berdasarkan referensi (Xia dkk, 2015) lapisan oksida yang terbentuk pada baja tahan karat martensitik adalah  $(Fe, Cr)_2O_3$ ,  $FeCr_2O_4$ , dan  $Fe_3O_4$ . Unsur Si pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast austenisasi 1020°C lebih besar daripada baja lainnya. Hal ini mengindikasikan selain lapisan oksida lapisan kerak juga terbentuk diatas permukaan baja 13Cr3Mo3Ni-cast austenisasi 1020°C. Unsur Si berkurang lagi setelah baja 13Cr3Mo3Ni-cast mengalami proses temper. Pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast setelah ditemper ganda (650 dan 550°C) ditemukan unsur Cr lebih besar daripada baja lainnya. Hal ini mengindikasikan proses temper ganda pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast mempengaruhi stabilitas dari lapisan oksida  $Cr_2O_3$ .



**Gambar 4.** SEM lapisan oksida baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cast perbesaran 2000X setelah uji oksidasi suhu 600°C selama 24 jam, (a) Control, (b) Austenisasi 1020°C, (c) Tempering 650°C, (d) Tempering ganda (650°C dan 550°C)

**Tabel 2.** Hasil uji Partial-EDS lapisan oksida baja tahan karat 13Cr3Mo3Ni-cast setelah uji oksidasi suhu 600°C selama 24 jam

Unsur	% massa			
	Control	Austenisasi 1020°C	Temper 650°C	Temper ganda (650 dan 550°C)
O	3,14	27,94	61,34	12,93
Cr	11,70	8,80	10,55	33,45
Ni	2,67	-	-	1,91
Fe	81,43	43,91	28,11	50,57
Si	1,07	19,75	-	1,14

### 3.5. Kekerasan Vickers Setelah Uji Oksidasi

Tabel 3 menunjukkan nilai kekerasan vickers setelah uji oksidasi suhu 700°C. Secara keseluruhan kekerasan baja setelah uji oksidasi suhu 700°C lebih rendah daripada baja sebelum uji oksidasi. Sedangkan kekerasan baja dengan temper ganda setelah uji oksidasi suhu 700°C lebih tinggi daripada sebelum uji oksidasi namun tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan proses temper ganda (650 dan 550°C) pada baja dapat mempertahankan nilai kekerasannya setelah mengalami uji oksidasi suhu tinggi.

**Tabel 3.** Nilai Kekerasan Vickers setelah uji oksidasi temperatur 700°C

Perlakuan panas	Sebelum Uji Oksidasi suhu 700°C	Setelah Uji Oksidasi suhu 700°C
Control	414,6	321,8
Austenisasi 1020°C	451,8	318,5
Temper 650°C	316,2	307,3
Temper ganda (650 dan 550°C)	304	306

### 4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa proses temper ganda pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast menghasilkan nilai kekerasan yang memenuhi kriteria nilai kekerasan pada suhu tekanan rendah pada turbin uap. Selain itu, pada baja ini ketahanan oksidasi lebih tinggi dapat dicapai ketika suhu pemanasan 600°C yang disebabkan karena adanya lapisan protektif Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diatas permukaan baja. Baja ini memiliki nilai kekerasan yang relatif tetap setelah mengalami uji oksidasi 700°C meskipun ketahanan oksidasinya menurun. Secara keseluruhan, proses temper ganda pada baja 13Cr3Mo3Ni-cast memberikan pengaruh positif terhadap ketahanan material pada suhu tinggi.

### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini adalah bagian dari penelitian tentang pengembangan material suhu tinggi untuk pembangkit listrik tenaga uap. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan

Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) untuk mendukung penelitian ini.

### Daftar Pustaka

- Anwar, M. S., Maburri, E. (2010). Modifikasi Permukaan Baja Tahan Karat Martensitik 420 Dengan Bahan Coating Yang Berbeda. *Majalah Korosi*, 19, 29-36.
- Di Gianfrancesco, A. (2017). *Material for Ultra-Supercritical and Advance Ultra-Supercritical Power Plants* (p. 1-49). Woodhead Publishing Series in Energy, Number 104.
- Garrison Jr., W. M., Amuda, M. (2017). Stainless Steels: Martensitic, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02527-3>.
- Huttunen-Saarivirta, E., Kilpi, L., Hakala, T. J., Carpen, L., Ronkainen, H. (2016). Tribocorrosion study of martensitic and austenitic stainless steels. *Tribology International*, 95, 358-371.
- Liu, L., Yang, Z., Zhang, C., Ueda, M., Kawamura, K., Maruyama, T. (2015). Effect of grain size on the oxidation of Fe-13Cr-5Ni alloy at 973 K in Ar-21 vol% O<sub>2</sub>. *Corrosion Science*, 91, 195-202.
- Liu, L., Yang, Z., Zhang, C., Ueda, M., Kawamura, K., Maruyama, T. (2015). Effect of grain size on the oxidation of Fe-13Cr-5Ni alloy at 973 K in Ar-21 vol% O<sub>2</sub>. *Corrosion Science*, 91, 195-202.
- Maburri, E., Anwar, M. S., Prifiharni, S., Romijarso, T. B., Adjiantoro, B. (2015). Pengaruh Mo dan Ni Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr. *Majalah Metalurgi*, 3, 133-140.
- McCloskey, T., Dooley, R., McNaughton, W. (1999). *Turbine Steam Path Damage: Theory and Practice*. vol. 2: *Damage Mechanisms*, EPRI, Palo Alto, CA.
- Prifiharni, S., Anwar, M. S., Maburri, E. (2016). Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr-1Mo. *Widyariset*, 2(1), 9-16.

- Rujisomnapa, J., Seechompoo, P., Suwannachaoat, P., Suebca, S. and Wongpanya, P. (2010). High Temperature Oxidation Behaviour of Low Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(3), 31-36.
- Tao, X., Li, C., Han, L. and Gu, J., (2016). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of X12CrMoWVNbN10-1-1 Steel during Quenching and Tempering Process. *Journal of Materials Research and Technology*, 5(1), 45.
- Technical Guide, High-Temperature Characteristics of Stainless Steel. *American Iron and Steel Institute*, No. 9004. [https://www.nickelinstitute.org/library/?opt\\_perpag](https://www.nickelinstitute.org/library/?opt_perpag) e=20&opt\_layout=grid&searchTerm=9004&page=1.
- Trindade, V., Christ, H.-J., Krupp, U. (2010). Grain-size effects on the high-temperature oxidation behaviour of chromium steels. *Oxid. Met.*, 73, 551–563.
- Xia, Z. X., Zhang, C., Huang, X. F., Liu, W. B. & Yang, Z. G. (2015). Improve Oxidation Resistance at High Temperature by Nanocrystalline Surface Layer. *Scientific Reports*, volume 5, Article number: 13027.
- Ziegler, D., Puccinelli, M., Bergallo, B., Picasso, A. (2013). Investigation of Turbine Blade Failure in a Thermal Power Plant. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 1, 192–199.