

Pengaruh Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik AISI 410 terhadap Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi di Lingkungan Simulasi Geothermal dalam Larutan *Artificial Brine*

Mukhlis Agung Prasetyo^{1*}, Moch. Syaiful Anwar¹, Efendi Mabruri¹, Diah Tri Agustiningtyas², Rekha Chantya Noviana², Andromeda Dwi Laksono²

¹ Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Kawasan PUSPIPTEK Gedung 470, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

² Program Studi Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Kalimantan, Jl. Soekarno Hatta KM 15, Balikpapan Utara, Kalimantan Timur, Indonesia 76127

Abstrak

Energi Panas Bumi yang berlimpah memiliki potensi untuk digunakan sebagai pembangkit listrik. Pembangkit listrik panas bumi memanfaatkan uap panas bumi untuk memutar sudu turbin yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Baja tahan karat martensitik telah digunakan secara komersial untuk material sudu turbin pada turbin panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari perlakuan panas (*as-quench* dan *tempering*) terhadap struktur mikro, laju korosi material dan ketahanan korosi sumuran pada baja tahan karat AISI 410. Pengujian mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan uji korosi material didalam larutan brine sintesis dengan alat Gamry G750. Pengamatan struktur mikro baja AISI 410 setelah proses *annealing* adalah ferit dan karbida. Struktur mikro berupa *temper martensit* berbentuk bilah (*lath*) dengan austenit sisa dan karbida logam setelah dilakukan proses *austenisasi* 1050°C dengan pendinginan cepat (*quench*) media oli dan *temperature tempering* 650°C. Laju korosi dan ketahanan korosi pitting sangat tinggi ditemukan pada baja AISI 410 full *Annealing*.

Kata kunci: baja martensitik AISI 410; larutan brine sintesis; korosi sumuran; fasa martensit; austenit sisa; material sudu turbin

Abstract

[**Title: The Effect of Heat Treatment of AISI 410 Martensitic Stainless Steel on Microstructure and Corrosion Resistance in Artificial Geothermal Brine**] Geothermal energy is one of the considerable energy resources that can be used to generate electric energy. A geothermal powerplant utilizes geothermal steam to turn turbine blades, which are converted into electric energy. Martensitic stainless steel has been used commercially for turbine blade material in geothermal turbines. This study aims to determine the effect of heat treatment (*as-quench* and *tempering*) on microstructure, corrosion rate, and corrosion resistance in AISI 410 stainless steel. Microstructure testing was carried out using optical microscopy and corrosion test in artificial brine with the G750 Gamry tool. Observation of AISI 410 microstructure after the aniling process is ferrite and carbide. After an austenizing process of 1050°C, followed by quenching oil media and 650°C tempering, the microstructure of blade (*lath*)-shaped martensite temper were formed with retained austenite and metal carbides. Very high corrosion rate and corrosion resistance of pitting was found in AISI 410 full *Annealing* steel.

^{*} Penulis Korespondensi.
E-mail: mukh005@lipi.go.id

Keywords: martensitic steel AISI 410; artificial brine; pitting corrosion; martensite phase; retained Austenite; turbine blade material

1. Pendahuluan

Energi panas bumi adalah sumber energi yang murah, memiliki ketersediaan yang melimpah serta ramah lingkungan karena bentuk polusi yang dihasilkan kecil (Xu dan Liu, 2017). Saat ini banyak negara di berbagai belahan dunia memacu penggunaan energi panas bumi sebagai sumber energi dalam pembangkit listrik. Pada Tahun 2016, kapasitas terpasang pembangkit listrik panas bumi diseluruh dunia sekitar 12,7 GW dengan produksi listrik yang dihasilkan pertahun sekitar 80,9 TWh (Tomarov dkk., 2018).

Turbine blade merupakan komponen dari pembangkit listrik panas bumi yang berfungsi menggerakkan generator menggunakan tekanan uap panas bumi yang dialirkan pada sudu turbin. Uap yang dihasilkan dari sumber panas bumi mengandung beberapa komponen kimia yang bersifat korosif seperti Hidrogen Sulfida (H₂S), Karbon Dioksida (CO₂), Amonia (NH₃), Klor (Cl⁻), maupun Sulfat (SO₄²⁻) yang berdampak pada korosi material sudu turbin (Karlsdottir dkk., 2015). Selain itu uap panas bumi yang mengandung pengotor dan titik air (*droplet*) dapat mengakibatkan terjadinya korosi erosi pada jalur aliran uap di sudu turbin. Beban dinamik serta adanya konsentrasi dari senyawa korosi dapat menyebabkan terjadinya *corrosion fatigue* yang mengakibatkan kegagalan pada sudu turbin (Tomarov dkk., 2018). Oleh karena itu, baja tahan karat martensitik (AISI 403/410/420) banyak dipilih dan telah digunakan secara komersial sebagai material sudu turbin pada turbin uap geotermal (Dwisaputro dkk., 2018). Baja tahan karat dengan martensit temper memiliki kombinasi antara kekuatan, ketangguhan serta ketahanan korosi yang sangat baik (Harison dkk., 2016).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat ketahanan korosi material baja tahan karat martensitik AISI 410 terhadap lingkungan geotermal melalui simulasi korosi menggunakan *Synthetic Brine*.

2. Bahan dan Metode

Sampel baja AISI 410 yang telah di *full annealing* dengan diameter 2,5 cm dan luas 4,9 cm² diaustenisasi sampai dengan temperatur 1050°C pada *muffle furnace* selama 1 jam dan didinginkan cepat (*quenching*) dengan oli. Proses kemudian sampel yang telah diaustenisasi selanjutnya dilakukan *tempering* pada temperatur 650°C selama 2 jam (Dwisaputro dkk., 2018). Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia dari baja tahan karat AISI 410. Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan *Kalling's reagent*. Setelah itu, pengujian korosi dilakukan dengan metode elektrokimia yaitu uji potensial rangkaian terbuka (OCP), uji potensiodinamik dan uji polarisasi siklik dimana sampel baja AISI 410 full aneal dan temper sebagai elektroda kerja, SCE (*Saturated Calomel Electrode*) sebagai elektroda acuan dan Platina (Pt)

sebagai elektroda bantu (Dwisaputro dkk., 2018). Ketiga elektroda tersebut direndam dalam larutan *brine* buatan dengan atau tanpa dialiri oleh gas CO₂.

Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia dari larutan *brine* buatan (Nikitasari dkk., 2019). Analisis potensial korosi dan laju korosi dalam temperatur kamar menggunakan alat Gamry G750 *series*. Kemudian masing-masing sampel *full annealing* dan sampel temper dilakukan uji kekerasan dengan menggunakan Rockwell C.

Tabel 1. Komposisi kimia baja tahan karat AISI 410 (%berat)

Unsur	% Berat
C	0,03
S	0,0012
P	0,0162
Mn	0,34
Si	0,68
Cr	12,8
Mo	0,002
Ni	0,155
Fe	Bal.

Tabel 2. Komposisi kimia larutan *brine* buatan

Bahan kimia	g/l
NaCl	224,6
NaSO ₄ .10H ₂ O	12,074
MgCl.6H ₂ O	10,620
CaCl ₂ .2H ₂ O	6,452
KCl	0,390
KOH	0,321
NaHCO ₃	0,048

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Metalografi

Pada Gambar 1 merupakan hasil pengamatan mikrostruktur baja AISI 410 dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 200X. Pada Gambar 1(a), dapat dilihat bahwa pada sampel dengan proses *full annealing* didapatkan fasa ferit yang memiliki sifat lunak dan ulet dan karbida logam yang memiliki sifat keras dan getas (ASM Int, 1998). Lalu pada gambar 1(b), struktur mikro setelah proses *tempering* terdiri dari fasa martensit berbentuk bilah (*lath*), austenit sisa (*retained austenite*), dan karbida logam. Namun karbida logam tidak tampak jelas pada pengamatan dengan mikroskop optik tersebut. Pada penelitian lain yang sudah dilakukan menyebutkan bahwa pembentukan fasa martensit temper akan

tampak bertambah banyak seiring dengan bertambahnya temperatur *tempering* (Mabruri dkk., 2017). Berdasarkan dari literatur, saat proses austenisasi pada temperatur tinggi antara 950°C hingga 1050°C menyebabkan karbida logam kaya kromium akan terlarut kembali dan membentuk martensit saat dilakukan pendinginan sedangkan fasa austenit sisa biasa ditemukan diantara martensit *lath* yang ditunjukkan pada daerah yang berwarna putih (Barlow dkk., 2012).

Penerapan perlakuan panas *tempering* bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa, sifat getas dan meningkatkan ketangguhan baja AISI 410 yang telah hilang atau berkurang selama mengalami pengerasan fasa martensit. Dengan semakin meningkatnya temperatur *temper* yang diberikan maka semakin besar peluang karbon untuk keluar dari fasa martensit dan berikatan dengan logam membentuk karbida logam dimana fasa martensit setelah proses *tempering* dinamakan martensit *temper* (Nurjayanti dkk, 2013).

3.2 Uji Kekerasan

Nilai kekerasan baja AISI 410 ditunjukkan pada Tabel 3 pada sampel *full* dan *tempering*. Nilai kekerasan pada sampel *tempering* memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel *full annealing*. Hal ini disebabkan karena terjadi pembentukan fasa yang keras setelah proses pendinginan yang dilakukan secara cepat pada media oli (*Oil Quench*). Fasa tersebut adalah fasa martensit yang terbentuk karena atom Fe sudah tidak lagi memiliki cukup energi dan waktu untuk

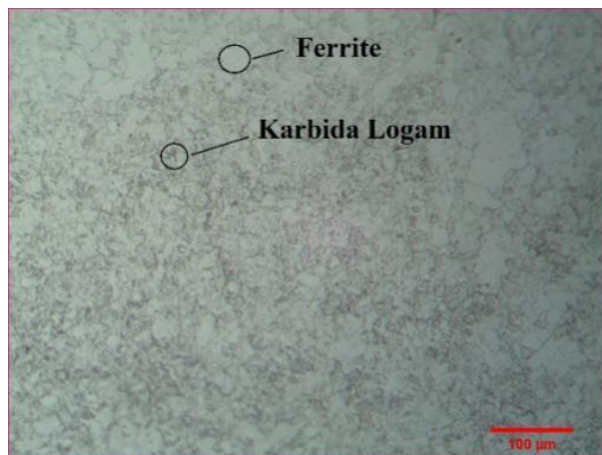
berdifusi karena pengaruh temperature yang rendah akibat proses pendinginan cepat sehingga menyebabkan atom Fe dari struktur kristal Austenit FCC tidak dapat melakukan difusi untuk membentuk kristal BCC yang berstruktur kristal stabil atom-atom Fe pada temperatur rendah. Atom Fe tersebut kemudian membentuk struktur kristal BCT dengan mekanisme geser dimana terdapat atom karbon yang terjebak diantara kisi kristal BCT (Herbirowo dan Adjiantoro, 2016). Fasa martensit yang terbentuk ini bersifat keras dan getas dikarenakan dislokasi pada martensit sulit untuk bergerak.

Tabel 3. Nilai kekerasan HRC baja AISI 410

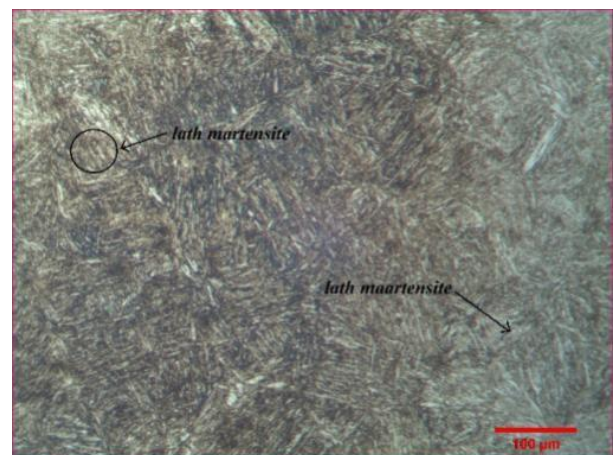
Posisi	AISI 410 Full Annealing	AISI 410 temper
Titik 1	16	35,6
Titik 2	15	35,2
Titik 3	16	35,1
Titik 4	16	35,9
Titik 5	18	35,1
Rata- Rata	16,2	35,28

3.3 Pengujian Korosi

Pengujian korosi pada baja AISI 410 dilakukan pada sampel *full annealing* dan sampel *tempering*. Gambar 2 menunjukkan OCP (*Open Circuit Potential*) dan Gambar 3 kurva polarisasi potensiodinamik pada baja AISI 410 yang dilakukan *full annealing* dan *tempering*.



(a)



(b)

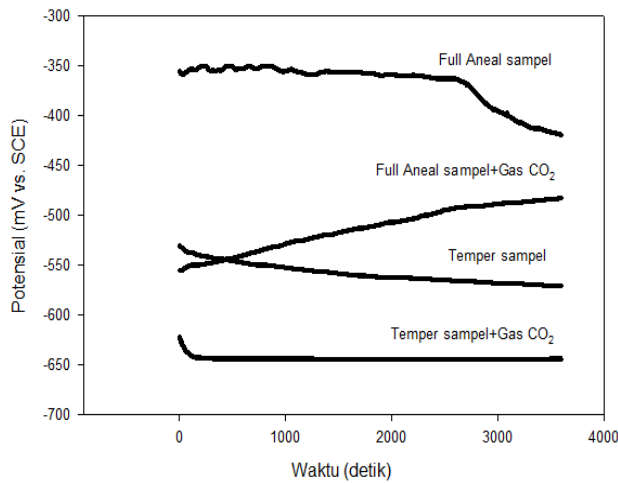
Gambar 1. Struktur mikro baja AISI 410 setelah proses : (a) *full annealing*, dan (b) *tempering* dengan etsa *Kalling's reagent* Pembesaran 200X

Berdasarkan Gambar 2 nilai OCP meningkat pada sampel dengan injeksi gas CO₂. Hal ini juga ditunjukkan pada Tabel 4 bahwa nilai OCP paling negatif (paling rendah) adalah sampel temper dengan injeksi gas CO₂. Sedangkan nilai OCP paling positif (paling tinggi) adalah sampel full aneal tanpa injeksi. Penyuntikan gas CO₂ dalam larutan menyebabkan perubahan nilai pH larutan menjadi lebih asam sehingga nilai OCP material menjadi lebih negatif pada pengujian dengan larutan *brine* sintesis yang diinjeksi CO₂.

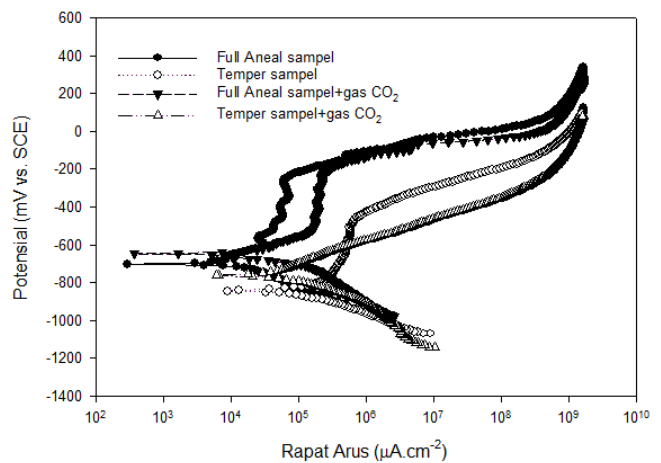
Setelah dilakukan *fitting* kurva pada Gambar 3 maka didapatkan nilai potensial korosi (E_{corr}) dan arus korosi (I_{corr}) seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Potensial korosi (E_{corr}) merupakan kemampuan/kemudahan suatu logam untuk bereaksi secara elektrokimia dengan lingkungannya sedangkan arus korosi (I_{corr}) menandakan banyaknya pergerakan elektron yang dikaitkan dengan laju korosi yang terjadi pada baja (Dwisaputro *dkk.*, 2018). Tabel 5 menunjukkan nilai arus korosi (I_{corr}) dan laju korosi pada sampel baja AISI 410 *full annealing* lebih rendah

dibandingkan dengan baja AISI 410 dalam kondisi *temper* saat diuji dalam larutan *brine* sintesis dengan atau tanpa injeksi gas CO₂. Hal ini terjadi karena adanya pembentukan fasa martensit temper pada baja AISI 410 temper serta adanya presipitat karbida pada batas butir yang menyebabkan menurunnya ketahanan korosi material (Perdana *dkk.*, 2017).

Pada penelitian lainnya menyatakan bahwa dengan melakukan austenisi baja tahan karat martensitik di temperatur tinggi menjadikan karbida yang terbentuk terlarut dalam austenit (Lu *dkk.*, 2015). Fasa Austenit yang terbentuk saat proses austenisasi akan bertransformasi menjadi fasa martensit saat dilakukan pendinginan cepat dan menjadi martensit temper saat material diberi perlakuan panas berupa *tempering* (Mabruri *dkk.* 2017). Adanya martensit temper pada AISI 410 temper inilah yang menyebabkan arus yang dihasilkan pada pengujian korosi elektrokimia lebih tinggi dibandingkan AISI 410 dalam kondisi aneal dalam pengujian korosi dengan atau tanpa injeksi gas CO₂ dalam larutan *brine* sintesis.



Gambar 2. Potensial rangkaian terbuka (OCP) baja AISI 410 dengan perlakuan panas berbeda di larutan *brine* dengan atau tanpa gas CO₂



Gambar 3. Kurva polarisasi potensiodinamik baja AISI 410 dengan perlakuan panas berbeda di larutan *brine* dengan atau tanpa gas CO₂

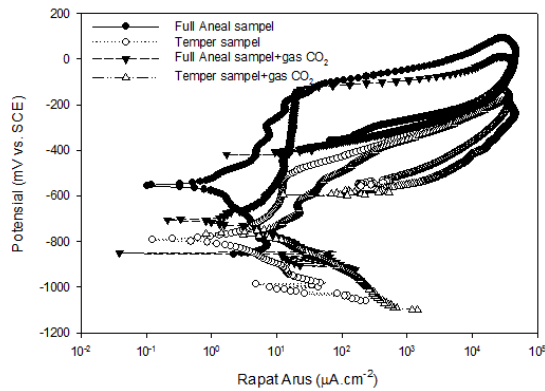
Tabel 4. Pengukuran Potensial Sirkuit Terbuka (OCP)

Sampel	Vmax (mV vs SCE)	Vmin (mV vs SCE)
Full Aneal	-349,6	-418,6
Temper	-530,3	-571
Full Aneal+CO ₂	-483,2	-555,4
Temper+CO ₂	-622,0	-645,1

Tabel 5. E_{corr}, I_{corr} dan Laju Korosi baja AISI 410

	E _{corr} (mV. vs. SCE)	I _{corr} (µA/cm ²)	Laju Korosi (mmpy)
Full Aneal	-702,9	1,343	13,93
Temper	-845,2	11,97	124,2
Full Aneal + CO ₂	-647,5	7,672	79,59
Temper + CO ₂	-758,6	27,75	287,9

Pengujian selanjutnya adalah mengetahui kerentanan material AISI 410 terhadap korosi sumuran (*pitting*). Pengujian dapat dilakukan dengan menggunakan metode polarisasi siklik menggunakan larutan *brine* sintesis (Bäbler *dkk.*, 2015). Hasil pengujian polarisasi siklik pada AISI 410 ditunjukkan pada Gambar 4. Adapun data yang diperoleh dari pengujian korosi dengan polarisasi siklik ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 4. Kurva polarisasi siklik baja AISI 410 dengan perlakuan panas berbeda di larutan brine dengan atau tanpa gas CO₂

Kurva hasil pengujian siklik yang membentuk *loop* mengindikasikan adanya korosi sumuran (*pitting corrosion*). Dari hasil pengujian korosi polarisasi siklik, diperoleh data *potensial pitting* dan arus *pitting* seperti yang ditampilkan pada tabel 6. Pada kurva hasil pengujian polarisasi siklik AISI 410 *full anneal* dalam larutan tanpa injeksi gas CO₂, *loop* yang terbentuk lebih besar dan lebih tinggi jika dibandingkan dengan AISI 410 *full anneal* dalam larutan dengan injeksi gas CO₂. Selain itu, nilai potensial pitting pada sampel AISI 410 *full anneal* dalam larutan dengan injeksi CO₂ menghasilkan nilai potensial pitting yang lebih negatif sebesar -

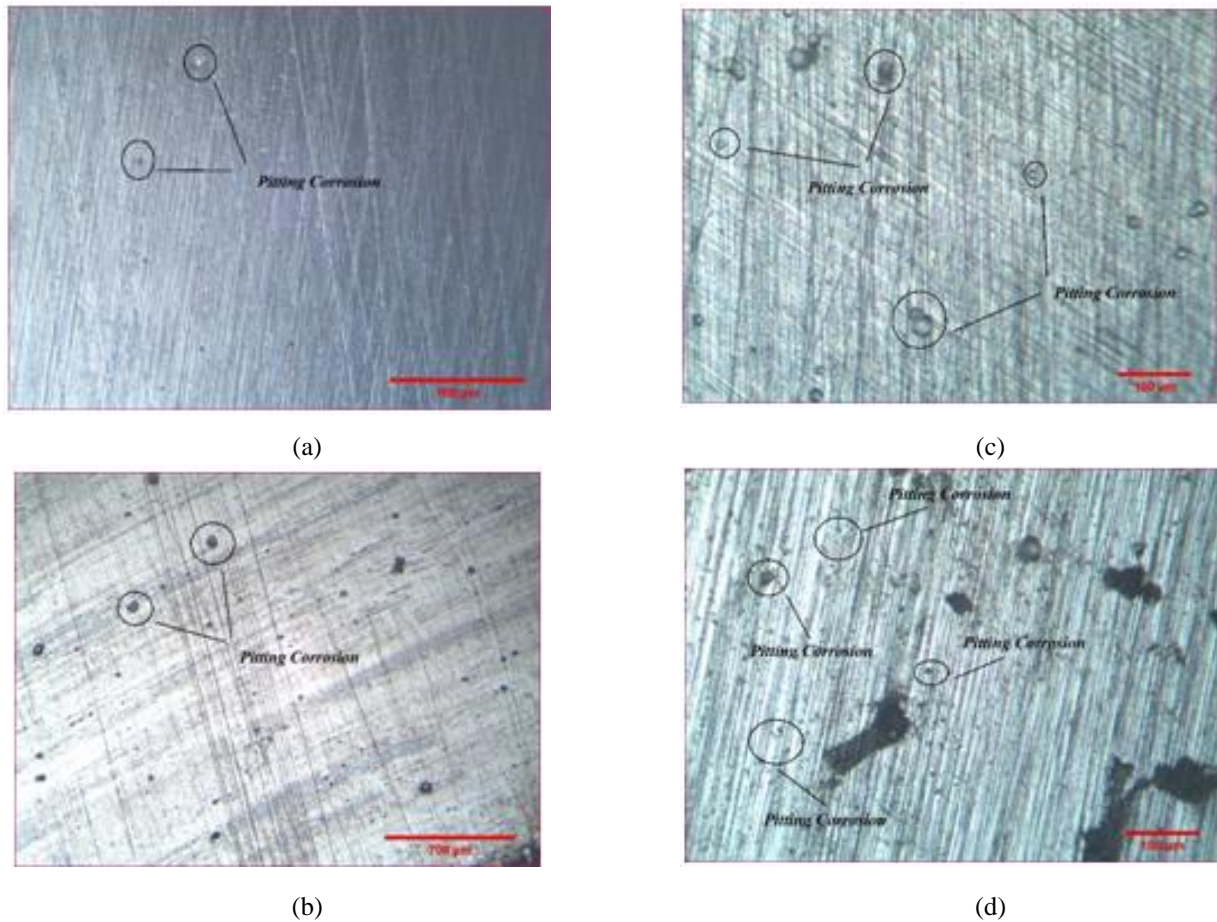
262,3 mV dibandingkan AISI 410 Full anneal tanpa injeksi CO₂ sebesar -186,1 mV. Hal ini menunjukkan AISI 410 *full anneal* lebih rentan terjadi korosi piting dalam larutan *brine* sintesis yang kaya CO₂. Sedangkan Material AISI 410 temper dalam larutan *brine* dengan atau tanpa injeksi CO₂, pembentukan *Loop* berada pada potensial yang lebih rendah dan ukuran *loop* yang kecil yang terlihat pada Gambar 4 serta nilai potensial pitting menjadi lebih negatif dibandingkan AISI 410 kondisi *full anneal* seperti yang ditunjukkan pada tabel 6. Kondisi ini menandakan AISI 410 yang di *temper* memiliki kerentanan korosi pitting yang lebih tinggi dibanding dalam kondisi *Full Annealing*. Fenomena ini disebabkan oleh adanya pembentukan fasa martensit temper pada saat dilakukan proses tempering. Martensit temper yang terbentuk memiliki *internal stress* pada struktur kristalnya. Adanya *internal stress* inilah yang membuat material AISI 410 yang di temper lebih rentan terhadap serangan korosi sumuran (*pitting corrosion*). Ketahanan korosi material AISI 410 juga akan semakin menurun seiring dari pengaruh dari terbentuknya karbida logam saat dilakukan proses temper (Dwisaputro *dkk.*, 2018).

3.4 Pengamatan Korosi Pitting

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk mengidentifikasi sampel yang terjadi korosi piting seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada hasil makroskopi perbandingan kondisi dan persebaran korosi sumuran tersebut dapat dilihat bahwa korosi sumuran (*pitting*) terjadi lebih banyak pada sampel dalam larutan dengan injeksi gas CO₂. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh CO₂ yang terlarut dalam larutan pengujian menyebabkan peningkatan laju korosi sumuran dikarenakan CO₂ dapat membentuk suatu asam karbonat (HCO₃⁻) saat bereaksi dengan air sehingga meningkatkan keasaman larutan (Bai *dkk.*, 2018).

Tabel 6. Parameter uji polarisasi siklik

	Epit (mV vs. SCE)	Ipit (µA/cm ²)	Eprot (mV vs. SCE)	Iprot (µA/cm ²)
Full Anneal	-186,1	14,12	-356,5	6,16
Temper	-468,6	13,91	-553,8	12,94
Full Anneal + CO ₂	-262,3	20,3	-405,8	14,74
Temper + CO ₂	-542,6	46,48	-596,4	30,81



Gambar 5. Distribusi korosi sumuran AISI 410 dalam larutan *brine* buatan pada kondisi (a) *Full Anneal* dengan injeksi gas CO₂ perbesaran 50X, (b) *Full anneal* tanpa injeksi gas CO₂ dengan perbesaran 50X, (c) *Temper* tanpa injeksi gas CO₂ perbesaran 200X, (d) *Temper* dengan injeksi gas CO₂ perbesaran 200X.

4. Kesimpulan

Perlakuan panas (*quench* dan *tempering*) sangat berpengaruh terhadap perubahan struktur mikro dan ketahanan korosi material baja tahan karat martensitik AISI 410. Struktur mikro yang terbentuk pada AISI 410 *full annealing* berupa ferit dan karbida logam. Sedangkan pada AISI 410 yang telah dilakukan perlakuan panas *quench* dan *tempering* berupa martensit temper, austenit sisa, dan karbida logam. Nilai kekerasan yang diperoleh menunjukkan tingkat kekerasan pada sampel yang telah di *tempering* lebih tinggi karena adanya pembentukan fasa martensit dibanding dengan sampel *full annealing*. Nilai laju korosi paling rendah pada sampel AISI 410 *full annealing* sedangkan untuk material AISI 410 temper lebih rentan terjadi korosi sumuran pada lingkungan larutan *brine* sintesis dengan atau tanpa injeksi CO₂ kedalam larutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI yang telah memfasilitasi selama melakukan pengujian.

Daftar Pustaka

- Bai, H., Wang, Y., Ma, Y., Zhang, Q., Zhang, N., (2018). Effect of CO₂ Partial Pressure on the Corrosion Behaviour of J55 Carbon Steel in 30% Crude Oil/Brine Mixture. *Materials*, 11(9), 1765.
- Barlow, L. D., & Du Toit, M. (2012). Effect of the austenitising heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420. *J. Mater. Eng. Perform.*, 21, 1327–1336.

- Bäßler, R., Keserović, A., Beck, J., Klapper, H. S. (2015). Material Evaluation for Geothermal Applications in Different Geothermal Waters. In *Proc. World Geothermal Congress* (pp. 1-7). Australia.
- Davis, Joseph, R (Ed.) (1998). *Metals Handbook Desk Edition*. Ed. 2. United States: ASM International
- Dwisaputro, R., Anwar, M. S., Rusnaldy, Mabruri, E. (2018). Pengaruh Perlakuan Panas Baja Tahan Karat Martensitik AISI 410 Terhadap Struktur Mikro dan Ketahanan Korosi. *Maj. Metal.*, 33(1), 19-26.
- Harison, M. C. A., Swamy, M., Pavan, A. H. V., Jayaraman, G. (2016). Root Cause Analysis of Steam Turbine Blade Failure. *Trans India Inst Met*, 69(2), 659-663.
- Herbirowo, S., & Adjiantoro, B. (2016). Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanik Baja Nikel Laterit. *Widyariset*, 22(2), 153-160.
- Karlsdottir, S. N., Ragnarsdottir, K. R., Thorbjornsson, I. O., Einarrson, A. (2015). Corrosion testing in superheated geothermal steam in Iceland. *Geothermics*, 53, 281-290.
- Lu, S., Yao, K. F., Chen, Y. B., Wang, M., Shao, Y., Ge, X. (2015) Effect of Austenitizing Temperature on the Microstructure and Electrochemical Behaviour of a Martensitic Stainless Steel. *J. Appl. Electrochem.*, 45, 375-383.
- Mabruri, E., Pasaribu, R. R., Sugandi, M. T., Sunardi. (2018). Effect of High Temperature Tempering on the Mechanical Properties and Microstructure of the Modified 410 Martensitic Stainless Steel. In *AIP Conference Proceedings*, 1964(1).
- Nikitasari, A., Prasetyo, M. A., Riastuti, R., Mabruri, E. (2019). Pitting corrosion resistance of CA6NM as geothermal turbine blade material in simulated artificial geothermal brine. In *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 541.
- Perdana, H., Anwar, M. S., Juniarsih, A., Mabruri, E. (2017). Pengaruh Suhu dan Waktu Tempering Terhadap Kekerasan, Struktur Mikro dan Laju Korosi Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr₃Mo₃Ni. *Maj. Metal.*, 32(1), 37-44.
- Tomarov, G. V., Borzenko, V. I., Shipkov, A., Sorokina, E. V. (2018). Achieving More Efficient and Reliable Operation of Geothermal Turbines by Using a Secondary Flash Steam Superheating System. *Thermal Engineering*, 65(10), 734-740.
- Xu, Y., Liu, M. (2017). Corrosion behaviour of polysiloxane-ferroferric oxide coating coated on carbon steel in NaCl Solution and geothermal water. *Geothermics*, 70, 339-350.