

---

## Studi sensitasi baja tahan karat tipe 316 sebagai bahan kelongsong dan struktur *fast breeder reactors*

Maman Kartaman A, Rosika Kriswarini, Dian Anggraini

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,  
Kawasan Puspiptek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia  
e-mail : makar@batan.go.id  
(Naskah diterima 26-12-2014 disetujui 23-01-2015)

### **Abstract**

*Sensitization study of type-316 stainless steel as cladding and structure of fast breeder reactor. Stainless steel was used in nuclear industry as cladding of Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR), which operation temperature above 500 °C. According to the theory, resistance of stainless steel type 316 is good enough, but in the high temperature tend to influence by intergranular corrosion. The sensitization degree of Stainless Steel type 316 ( SS 316 ) was calculated by potentiostat using potentiodynamic method, and was observed by scanning electron microscope ( SEM ). The objective of this research was to analyzed the effect of heat treatment on corrosion resistance. First, samples were heat treated at 1,000°C for 3 hours and then were quenched in the water for 30 minutes. Samples were heat treated for 6 hours on the temperature : 350, 450, 550, and 650°C. The heat treated samples were corrosion tested by Potensiostat model M 273 with Potensiodynamic method. The surface of samples were observed by scanning Electron Microscope. Three kinds of SS 316 samples : Blank, solution treatment, and ageing for 650°C were characterized by X – ray diffractor. The result showed that the corrosion rates increased with the increasing temperature. The corrosion rate of samples heat treated at 550 and 650°C were 105,9 and 118.37 mpy, the samples were heat treated at 350 and 450 °C after solution treatment did not exhibit intergranular, corrosion rate respectively were 89,39 and 91,06 mpy. The corrosion rates of samples that were heat treated at 550°C and 650°C without solution treatment, revealed were higher than with solution treatment.*

**Keywords** : *inter granular corrosion, austenitic stainless steel type of 316, sensitization*

## Abstrak

**Studi sensitasi baja tahan karat tipe 316 sebagai bahan kelongsong dan struktur *fast breeder reactors*.** Dalam industri nuklir, baja tahan karat, paduan aluminium dan zirkaloy digunakan sebagai komponen pendukung reaktor riset atau daya dalam bentuk tangki bertekanan, pipa, kelongsong, bahan struktur dan lain – lain. Baja tahan karat tipe 316 dan 316L digunakan sebagai kelongsong bahan bakar LMFBR dimana temperatur operasinya bisa mencapai sekitar 500 °C. Temperatur operasi yang tinggi akan mengakibatkan fenomena sensitasi, yaitu fenomena dimana baja tahan karat menjadi rentan terhadap serangan korosi terutama korosi batas butir. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk mengetahui sejauh mana pengaruh panas terhadap ketahanan korosinya. Sampel SS 316 terlebih dahulu diberi perlakuan panas dari suhu 350 hingga 650 °C, selanjutnya diuji korosi menggunakan metode potensiodinamik. Hasilnya menunjukkan bahwa laju korosi sampel SS 316 yang telah dilaku panas yaitu *solution treatment* pada suhu 1000 °C dan diikuti *artificial aging* pada suhu 350, 450, 550 dan 650 °C berturut-turut adalah 56,59 mpy, 89,39 mpy, 91,06 mpy ; 105,9 mpy dan 118,37 mpy. Semakin tinggi suhu aging terlihat laju korosinya semakin tinggi. Pada mikrograf sampel SS 316 yang diamati menggunakan mikroskop elektron (SEM) menunjukkan telah terjadi korosi yang cukup signifikan pada bahan yang telah di aging pada suhu 550 dan 650°C. Pola difraksi untuk sampel SS 316 yang dilaku panas *solution treatment* dan diikuti aging suhu 650°C menunjukkan terjadi perubahan fasa yaitu fasa kedua atau senyawa intermetalik yang menyebabkan laju korosi sampel SS 316 menjadi relatif tinggi.

**Kata Kunci :** korosi batas butir, baja tahan karat SS 316, sensitasi

## 1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu alternatif sumber energi listrik yang menjanjikan dimasa depan. Efisiensi PLTN sangat besar bila dibanding jenis sumber energi listrik lainnya. Energi yang dihasilkan adalah sebesar 17 milyar k.cal, atau setara dengan energi yang dihasilkan dari pembakaran 2,4 juta kg batubara. Energi ini berasal dari panas yang dikeluarkan oleh pembelahan satu kilogram inti bahan nuklir  $^{235}\text{U}$ <sup>[1]</sup>. PLTN memerlukan pengamanan yang lebih besar untuk menjaga integritas bahan nuklir tidak lepas kelingkungan. Salah satu yang harus diperhatikan adalah masalah kelongsong bahan bakar nuklir<sup>[1]</sup>. Secara

umum bahan struktur dan kelongsong harus mempunyai sifat penyerapan neutron yang rendah, kekuatan mekanik, dan stabilitas termal, stabilitas terhadap radiasi tinggi, penghantar panas yang baik, serta tahan korosi pada suhu tinggi<sup>[2]</sup>. Masalah kelongsong sangat penting karena bahan bakar yang digunakan dalam PLTN dapat menghasilkan radiasi dan panas sehingga tidak semua bahan dapat digunakan sebagai kelongsong<sup>[1]</sup>. Bahan kelongsong harus mampu mengungkung isotop hasil pembelahan  $^{235}\text{U}$  sehingga isotop tersebut tidak dapat keluar dari kelongsong dan larut dalam air pendingin. Selain itu juga harus tahan terhadap korosi pada suhu tinggi.

Hal ini dilakukan agar efisiensi daya dari bahan bakar dapat dicapai dengan mudah. Efisiensi daya akan mudah dicapai jika suhu operasi reaktor terus berada pada interval suhu 400–600°C<sup>[3]</sup>. Dalam industri nuklir, baja tahan karat digunakan sebagai komponen pendukung reaktor riset atau daya dalam bentuk tangki bertekanan, pipa, kelongsong, bahan struktur dan lain – lain. Baja tahan karat tipe 304 dan 304L digunakan sebagai bejana bertekanan, tipe 316 dan 316L digunakan sebagai kelongsong bahan bakar sedangkan tipe 347 selain untuk bejana bertekanan juga bahan struktur reaktor LMFBR<sup>4,5]</sup>. Baja tahan karat tipe 316 dengan 20% pengerjaan dingin digunakan secara luas sebagai bahan kelongsong FBR baik prototipe maupun komersial, dimana suhu operasinya bisa mencapai sekitar 500°C<sup>[6]</sup>. Baja tahan karat austenitik mempunyai masalah utama apabila mengalami pemanasan atau pengelasan pada rentang suhu antara 500–800°C dan rentan terhadap serangan korosi batas butir dan *stress corrosion cracking* pada lingkungan klorida dan basa<sup>[4]</sup>, karena pembentukan kromium karbida yang menyebabkan sepanjang batas butir kekurangan unsur kromium/ *chromium depleted zone*. Hal tersebut menyebabkan baja tahan karat menjadi tersensitasi dan rentan terhadap korosi batas butir. Sensitasi baja tahan karat SS 316 dapat ditentukan dengan uji korosi metode elektrokimia yaitu

potensiodinamik. Dalam penelitian ini ditentukan tingkat sensitasi baja tahan karat tipe 316 untuk mengetahui dan menganalisa pengaruh suhu pada proses *normalizing* dan *solution annealing*. Pada penelitian sebelumnya<sup>[7]</sup>, uji korosi elektrokimia dilakukan menggunakan metode *electrochemical potentiokinetic reactivation* (EPR) terhadap bahan AISI 321 yang dipanaskan pada suhu 600°C. Perlakuan panas bahan AISI 321 pada suhu 600°C selama 60 jam menyebabkan terjadinya korosi batas butir yang parah, akan tetapi korosi batas butir tidak terjadi apabila bahan mengalami *solution treatment* terlebih dahulu pada suhu 900°C. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu perlakuan panas bahan SS 316 terhadap ketahanan dan mekanisme korosi yang terjadi.

## 2. Metodologi

Bahan yang digunakan adalah baja tahan karat austenitik tipe 316, berbentuk rod dengan diameter 15 mm. Bahan SS 316 dikenai perlakuan panas seperti *normalizing* dan *solution annealing* menggunakan alat Tungku Tabung dalam atmosfer gas argon. Proses *normalizing* dilakukan pada suhu 550 dan 650°C selama 6 jam, sedangkan proses *solution annealing* dengan memanaskan sampel uji pada suhu 1000°C selama 3 jam lalu didinginkan cepat / *quenching* dalam media air.

Selanjutnya bahan dipanaskan pada suhu 350, 450, 550 dan 650°C selama 6 jam dan didinginkan lambat dalam dapur / *furnace*.

Sampel uji tersebut selanjutnya disiapkan untuk uji korosi sesuai ASTM G5<sup>[8]</sup>.

Tabel 1. Penandaan spesimen uji dan parameter *heat treatment*

Jenis Sampel	Suhu, °C				
	Quenched	350	450	550	650
<i>Solution treatment</i>	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
<i>Normalizing</i>	-	-	-	A-5	A-6

Uji korosi dilakukan menggunakan media H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N dengan metode uji adalah potensiodinamik sesuai dengan ASTM G5<sup>[8]</sup>. Pengamatan morfologi / mikrostruktur permukaan hasil uji korosi dilakukan menggunakan mikroskop elektron (SEM) untuk mengetahui bentuk kerusakan atau korosi yang terjadi, sedangkan uji XRD dilakukan guna mengetahui perubahan fasa akibat perlakuan panas *normalizing* dan *solution annealing*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil uji komposisi kimia bahan SS 316 diperlihatkan pada Tabel 2. Dengan kadar paduan utama 16,51% Cr, 10,37% Ni, 1,79% Mo, maka paduan logam ini termasuk golongan baja tahan karat austenitik yang memiliki sifat tahan korosi, mampu bentuk dan mampu las yang baik dan juga tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan panas.

Tabel 2. Komposisi kimia sampel SS 316 menggunakan XRF dan spektrometer emisi

Tipe bahan	Komposisi kimia unsur (% berat)					
	Cr	Ni	Mo	C	N	Lain-lain
Standar AISI 316 <sup>[7]</sup>	16 - 18	10 – 14	2 – 3	0,08	0,1	-
Sampel SS 316	16,51	10,37	1,79	0,077	-	-

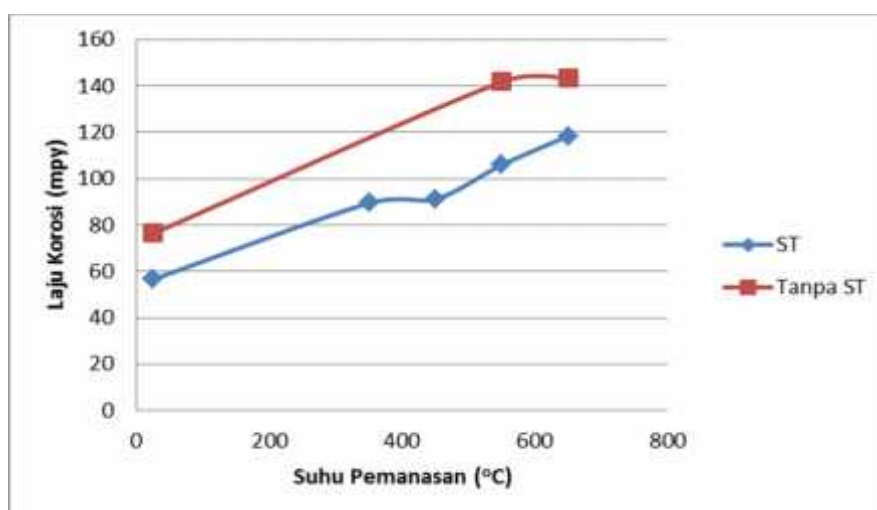
Sumber : Trethwaey KR & Chamberlain J. (1991)<sup>[9]</sup>

Hasil uji korosi menggunakan alat potensioostat ditunjukkan pada Gambar 1. Analisa fasa atau senyawa intermetalik sampel SS 316 pasca perlakuan panas ditunjukkan

pada Gambar 2, 3 dan 4. Pengamatan mikrograf hasil uji korosi bahan SS 316 menggunakan mikroskop

elektron (SEM) ditunjukkan pada Gambar 5, 6, 7 dan 8. Gambar 1 memperlihatkan laju korosi bahan SS 316 dalam larutan  $H_2SO_4$  pada berbagai suhu perlakuan panas. Laju korosi bahan SS 316 yang mengalami perlakuan lebih rendah dibanding bahan SS 316 tanpa perlakuan panas, yaitu masing-masing sebesar 56,59 dan 76,38 mile per year (mpy). Hal ini disebabkan bahan yang mengalami perlakuan pelarutan pada suhu  $1000^\circ C$  selama 3 jam yang diikuti dengan pendinginan cepat dalam media air dapat melarutkan fasa kedua atau senyawa intermetalik, sedangkan untuk bahan SS 316 tanpa perlakuan panas masih mengandung fasa kedua. Keberadaan fasa kedua atau senyawa intermetalik pada batas butir ini dapat menimbulkan korosi galvanik secara

mikro akibat adanya beda potensial dengan matriknya dan juga karena adanya daerah yang kekurangan unsur kromium disekitar batas butir sehingga laju korosinya lebih besar<sup>[9]</sup>. SS 316 mempunyai ketahanan korosi yang baik akibat adanya lapisan pasif pada permukaan. Dalam pemakaiannya pada suhu  $450 - 900^\circ C$  presipitat kromium karbida cenderung terbentuk pada batas butir<sup>[10]</sup>. Terbentuknya kromium karbida pada batas butir dapat mengakibatkan korosi batas butir. Pada suhu *solution treatment*  $700^\circ C$  selama 60 – 600 menit, bahan SS 316 mengalami sensitasi dan menghasilkan korosi batas butir sebagai akibat terbentuknya presipitat pada batas butir. Pengamatan dengan TEM menunjukkan adanya presipitat pada batas butir adalah  $M_{23}C_6$ <sup>[10]</sup>.

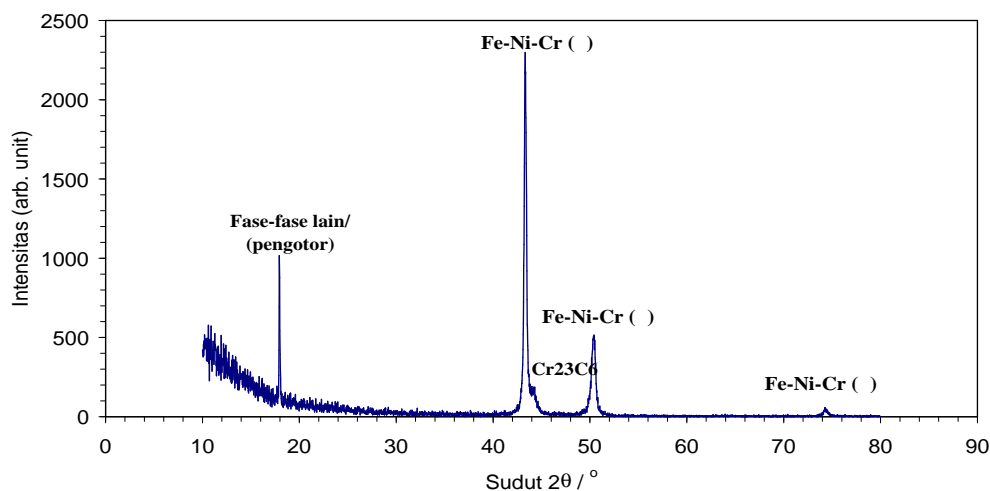


Gambar 1. Pengaruh suhu pemanasan terhadap laju korosi sampel SS 316

Untuk sampel SS 316 yang mengalami perlakuan *solution treatment (ST)* pada suhu ruang, 350, 450, 550 dan 650°C, laju korosi cenderung meningkat berturut-turut sebesar 56,59 ; 89,39 ; 91,06 ; 105,9 dan 118,37 mpy. Proses *solution treatment* meningkatkan laju korosi karena pada suhu tinggi atom karbon berdifusi ke batas butir. Semakin tinggi suhu pemanasan maka semakin tinggi pula laju difusi atom karbon. Atom karbon yang berdifusi kebatas butir akan berikatan dengan unsur kromium disekitar batas butir membentuk senyawa intermetalik yaitu senyawa kromium karbida  $(Fe,Cr)_{23}C$ . Pembentukan senyawa intermetalik ini dapat menimbulkan daerah kekurangan kromium atau *chromium depleted zone* dimana pada daerah tersebut kadar unsur kromium bisa turun hingga mencapai kurang dari 12%. Baja tahan karat tipe austenitik mengalami

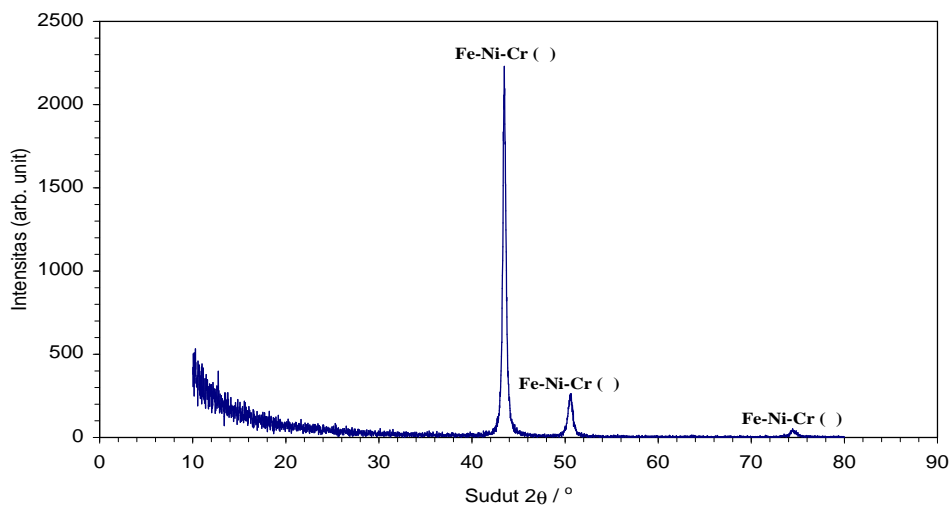
penurunan sifat tahan korosinya apabila kadar kromium kurang dari 12%<sup>[11,12]</sup>

Analisa fasa menggunakan alat XRD pada bahan SS 316 tanpa perlakuan panas, perlakuan pelarutan yang diikuti pendinginan cepat dan perlakuan pelarutan yang diikuti aging pada suhu 650°C ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4. Hasil analisis menunjukkan bahwa bahan SS 316 tanpa perlakuan panas memiliki fasa utama Fe-Ni-Cr atau austenit dan fasa kedua atau senyawa intermetalik serta fasa lainnya. Untuk bahan SS 316 pasca perlakuan pelarutan memiliki fasa utama Fe-Ni-Cr, sedangkan puncak-puncak fasa pengotor atau fasa kromium karbida tidak nampak karena telah larut selama perlakuan *solution treatment*. Untuk bahan SS 316 pasca *solution annealing* pada suhu 650°C menghasilkan senyawa intermetalik kembali seperti ditampilkan pada Gambar 4.

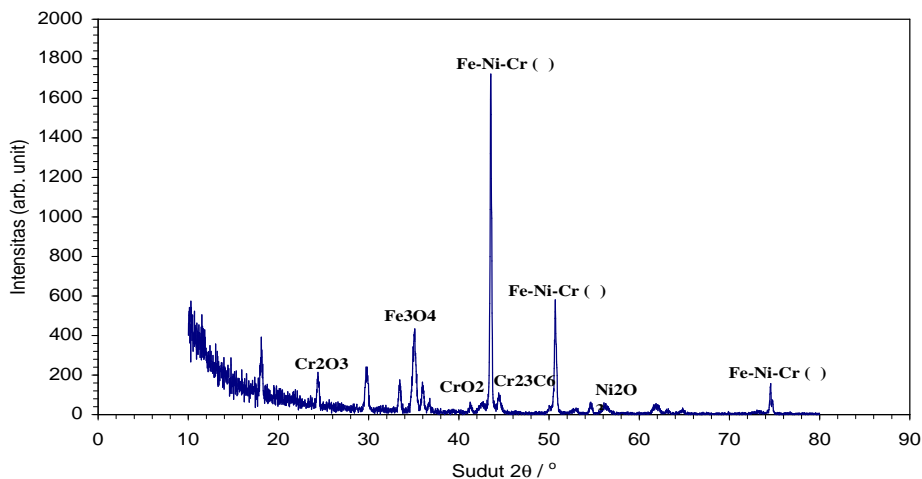


Gambar 2. Pola difraksi sampel SS 316 tanpa perlakuan panas

Proses aging yang dilakukan pada suhu 650°C ternyata mampu menggerakkan atom karbon berdifusi kebatas butir yang selanjutnya terbentuk senyawa intermetalik kromium karbida. Hasil analisa fasa dengan XRD ini sesuai dengan laju korosinya. Bahan SS 316 yang tidak mengandung senyawa kromium karbida yaitu pada SS pasca perlakuan pelarutan menghasilkan laju korosi paling rendah dibandingkan laju korosi bahan yang mengandung senyawa kromium karbida baik tanpa perlakuan maupun pasca perlakuan pelarutan yang diikuti aging pada suhu 650°C.



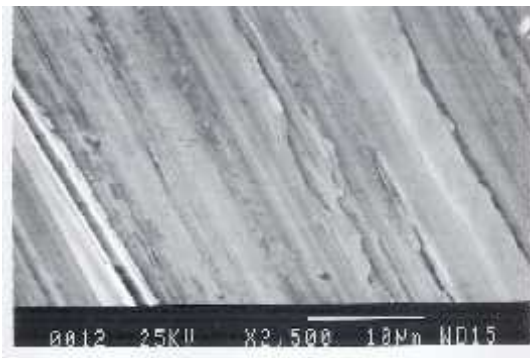
Gambar 3. Pola difraksi SS 316 pasca perlakuan *solution treatment*



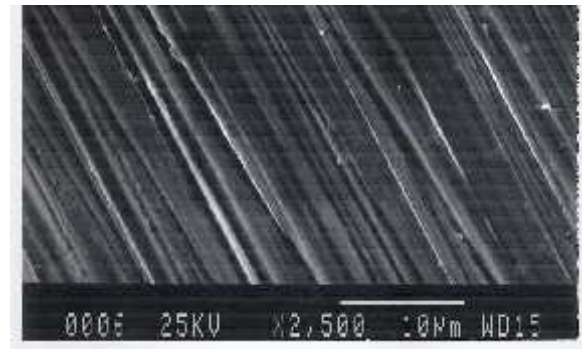
Gambar 4. Pola difraksi sampel SS 316 pasca *solution annealing* suhu 650°C

Data pengamatan mikrograf permukaan sampel hasil uji korosi pada Gambar 5, 6, 7 dan 8 memperlihatkan bagian yang permukaannya terang dan bagian-bagian yang permukaannya gelap. Diduga bagian yang permukaannya gelap atau tampak berlubang adalah bagian yang mengalami korosi. Korosi yang terjadi adalah korosi batas butir dan

korosi sumuran. Pada sampel SS 316 tanpa perlakuan panas dan yang dikenai perlakuan pelarutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.a dan 5.b, tidak mengalami korosi yang berarti dan tampak permukannya yang masih halus, sedangkan yang tampak seperti goresan adalah karena proses pengamplasan.



a. Tanpa perlakuan panas.

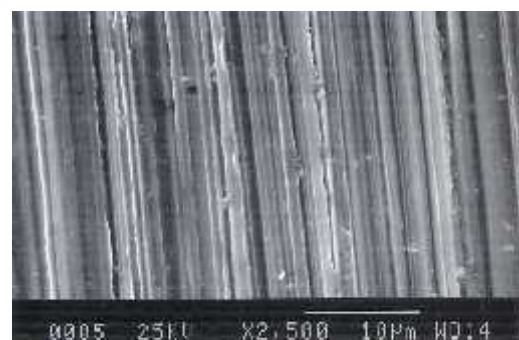


b. sampel A-2.

Gambar 5. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi



a. sampel A-3.



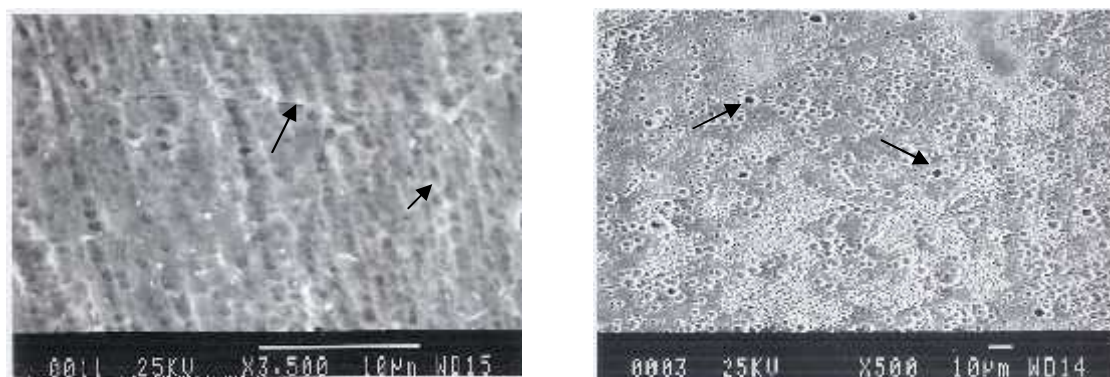
b. sampel A-4.

Gambar 6. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi.

Permukaan sampel yang mengalami perlakuan *solution treatment* pada suhu 350 dan 450°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.a dan 6.b sedikit mengalami korosi. Pada *solution annealing* suhu 350°C terlihat adanya sedikit korosi yang ditunjukkan dengan tanda panah. Hal ini dikarenakan

permukaan yang tidak homogen, sedangkan sampel pasca perlakuan *solution annealing* suhu 450°C tidak mengalami korosi yang berarti. Pada suhu tersebut energi yang diperlukan untuk difusi karbon tidak cukup sehingga bahan tersebut tidak tersensitasi ketika diuji korosi dalam media H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N.

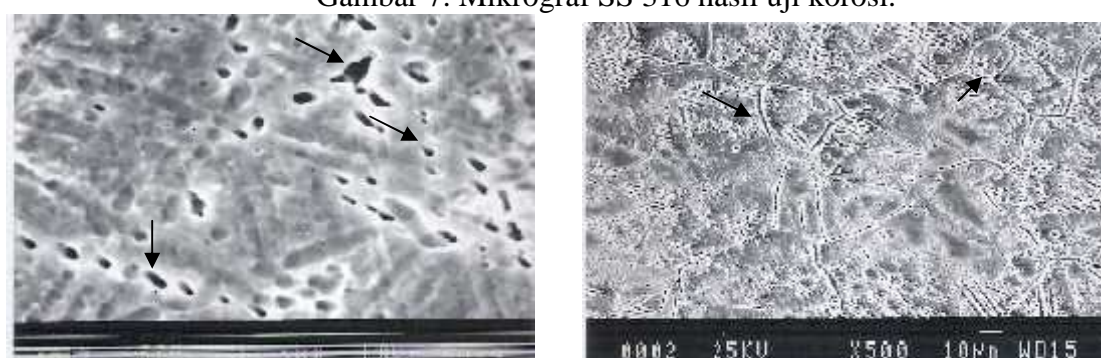




a. sampel A-5,

b. sampel A-6

Gambar 7. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi.



a. sampel B-1

b. sampel B-2

Gambar 8. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi.

Mikrograf bahan SS 316 pasca perlakuan *solution annealing* dan *normalizing* pada suhu 550 dan 650°C ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8. Gambar 7.a memperlihatkan mikrograf bahan SS 316 pasca *solution annealing* suhu 550°C, nampak batas butir yang terkorosi, sedangkan pada Gambar 7.b nampak lubang-lubang gelap seperti korosi sumuran. Gambar 8 memperlihatkan kondisi permukaan yang telah terkorosi lebih parah dibanding tingkat korosi pada bahan SS 316 pada perlakuan *solution annealing* suhu 550 dan 650 °C (Gambar 7). Hal ini disebabkan baik pada bahan SS 316 pasca perlakuan *normalizing* maupun pasca *solution annealing* telah terjadi

presipitasi karbida yang menyebabkan korosi batas butir. Secara umum, pengujian korosi metode potentiodynamik dapat memberikan perbedaan yang nyata atas respon perlakuan panas pada sampel SS 316. Semakin tinggi suhu *solution annealing* maka semakin tinggi pula laju korosinya. Pada rentang suhu 450–650°C, kenaikan laju korosinya relatif besar dibanding pada rentang suhu 350–450°C. Laju korosi yang tinggi pada rentang suhu 450–650°C ini sesuai dengan mikrograf permukaan yang diuji dengan alat SEM yang menghasilkan kerusakan permukaan akibat korosi semakin besar. Analisa fasa dengan alat XRD juga memperlihatkan hal yang sama.

Untuk bahan SS 316 pasca *solution annealing* suhu 650°C terlihat adanya fasa baru dan senyawa intermetalik kromium karbida yang menyebabkan korosi batas butir. Bahan SS 316 pasca *solution treatment* tidak nampak fasa pengotor dan senyawa intermetalik sehingga laju korosinya jauh lebih rendah dibanding bahan SS 316 pasca *solution annealing* pada suhu 650°C.

#### 4. Kesimpulan

Perlakuan panas *normalizing* dan *solution annealing* dapat mempengaruhi laju korosi sampel SS 316. Pada proses *solution annealing* semakin tinggi suhu maka semakin tinggi pula laju korosinya. Proses *solution annealing* pada suhu 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi paling besar yaitu berturut-turut 105,9 dan 118,37 mpy. Pada suhu 550 dan 650°C bahan SS 316 mengalami serangan korosi relatif besar yaitu korosi batas butir. Proses *normalizing* pada suhu 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi lebih besar dibanding proses *solution annealing* pada suhu yang sama yaitu 141,72 dan 143,34 mpy. Pada proses perlakuan pelarutan menghasilkan laju korosi paling kecil yaitu sebesar 56,59 mpy dan dapat mengurangi laju korosi sampel SS 316 apabila diekspos kembali pada suhu tinggi. Berdasarkan hal tersebut diatas, untuk aplikasi suhu tinggi atau pada proses pengelasan baja tahan karat SS 316 perlu dilakukan perlakuan pelarutan supaya lebih

tahan terhadap serangan korosi terutama korosi batas butir.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada Bapak Slamet Pribadi, A.Md yang telah membantu dalam preparasi metalografi, Bapak Junaedi yang telah membantu dalam pengoperasian SEM dan Rohmatulloh Nabhani yang telah banyak membantu dalam pengujian korosi serta pengujian pola difraksi sinar-x dan analisis unsur dengan spektrometer emisi optik.

#### 6. Daftar Pustaka

1. Akhadi, Muklis. (1997). Pengantar Teknologi Nuklir. PT Rineka Cipta, Jakarta
2. Soentono, Soedyartomo. (1998). Korosi di Industri Nuklir. Widyanuklida Vol. 1 No.2
3. Sugondo, Futichah. (2006). Karakterisasi ukuran kristalit, regangan mikro, dan kekuatan luluh Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dengan Difraksi Sinar – X. Jurnal Sain Materi Indonesia. 6:150-160
4. Baldev Raj, SL Mannan, PR Vasudeva Rao and MD Mathew. (2002). Development of Fuel and Structural Materials for Fast Breeder Reactors. Sadhana Vol. 27, Part 5, October 2002, pp 527 – 558.

5. V. Karthik, et.al (2010). Austenitic Stainless Steel for Fast Reactors – Irradiation Experiments, Property Evaluation and Microstructure Studies. Energy Procedia 00 (2010) 000-000.
6. Suripto, Asmedi. (1999). Aplikasi dan Pengembangan Logam Paduan Untuk Menunjang Reaktor Nuklir. *Prosiding Seminar Material '99*, Puslitbang – LIPI, Serpong.
7. Silva MJG, Sausa AA, Lima PD. (2003). Microstructural and electrochemical characterization of the low sensitization of AISI 321 SS tube used in petroleum refining plants. Kluwer academic publishers.
8. ASTM G5. Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
9. Trethwey KR, Chamberlain J. (1991). Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan. Widodo AT, penerjemah. Jakarta. PT Gramedia. Terjemahan dari : Corrosion for Student of Science and Engineering.
10. Kocsisova, Edina., Domankova, Maria., Slatkovsky, Ivan., Sahul, Martin. (2014). Study of The Sensitization on The Grain Boundary in Austenitic Stainless Steel AISI 316. Research Paper Faculty of Materials Science and Technology in Trnava, Slovak University of Technology In Bratislava, Volume 22, special Number.
11. Aydogdu GH. (2004). Determination of Susceptibility to Intergranular Corrosion in AISI 304L Type Stainless Steel by Electrochemical Reactivation Method : Tesis. Department of Metallurgical and Material Engineering of Teheran, Teheran.
12. Jones, DA. (1992). Principles and Prevention of corrosion. New York. Macmillan Publishing Company.