

## PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP KETAHANAN KOROSI BATAS BUTIR BAJA TAHAN KARAT TIPE 316

Maman K Ajiriyanto<sup>(1)</sup>, Joko Kisworo<sup>(1)</sup>, Rohmatulloh Nabhani<sup>(2)</sup>, Sri Mulijani<sup>(2)</sup>,

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

2. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam IPB, Bogor

### ABSTRAK

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS TERHADAP KETAHANAN KOROSI BATAS BUTIR BAJA TAHAN KARAT TIPE 316.** Dalam industri nuklir, baja tahan karat, paduan aluminium dan zirkaloy digunakan sebagai komponen pendukung reaktor riset atau daya dalam bentuk tangki bertekanan, pipa, kelongsong, dan bahan struktur. Baja tahan karat tipe 316 dan 316L digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor LMFBR dimana temperatur operasinya bisa mencapai sekitar 500°C. Pada suhu tinggi jenis baja ini akan mengalami sensitasi. Ketahanan sensitasi ini akan ditentukan menggunakan alat Potensiostat dengan metode uji potensiodinamik dan pengamatan permukaan hasil uji korosi dengan alat SEM. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh perlakuan panas terhadap ketahanan korosi terutama terhadap serangan kondisi batas butir. Bahan SS 316 yang telah dilaku panas *normalizing* pada suhu 550 dan 650 dan *solution treatment* pada suhu 350, 450, 550 dan 650 °C diuji korosi menggunakan alat potentiostat. Dari uji korosi dihasilkan bahwa laju korosi meningkat dengan meningkatnya suhu perlakuan panas baik proses *normalizing* maupun *solution treatment*. Laju korosi sampel yang dilaku panas pada suhu 550 dan 650 °C tanpa *solution treatment* menghasilkan laju korosi lebih besar dibanding dengan proses *solution treatment*, dengan perbedaan laju korosi sebesar 35,82 mpy untuk suhu 550 °C dan 24,97 mpy untuk suhu 650 °C. Hasil pengamatan morfologi permukaan memperlihatkan adanya korosi batas butir pada rentang suhu 550 – 650, sedangkan untuk rentang suhu 350 – 450 tidak menunjukkan terjadinya korosi batas butir.

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

### ABSTRACT

**HEAT TREATMENT FLUENCE TO INTERGRANULAR CORROSION SUCCEPTIBILITY OF STAINLESS STEEL TYPE 316.** 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 analized 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 Potentiostat model M 273 with Potensiodynamic method. The surface of samples were observed by SEM. Three kinds of SS 316 samples : blank, solution treatment, and ageing for 650°C were

characterized by x-ray diffractometer. 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 :** *intergranular corrosion, austenitic stainless steel, sensitization*

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia saat ini terus meningkat. Pembangkit Listrik tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu alternatif sumber energi listrik yang menjanjikan di masa depan. Efisiensi dari PLTN sangat besar bila dibandingkan dengan jenis sumber energi listrik lainnya. Energi yang dihasilkan adalah sebesar 17 milyar kkal, atau setara dengan energi yang dihasilkan dari pembakaran 2,4 juta Kg batubara. Energi ini berasal dari panas yang dikeluarkan dari pembelahan inti satu kilogram bahan nuklir  $^{235}\text{U}$ <sup>[1]</sup>. Selain efisiensi yang besar, PLTN juga memiliki resiko yang lebih besar dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya. Oleh karena itu, PLTN memerlukan suatu pengamanan yang lebih besar untuk menjaga integritas bahan nuklir agar tidak terlepas ke lingkungan. Salah satu yang harus diperhatikan adalah masalah kelongsong / *cladding* bahan bakar nuklir<sup>[1]</sup>. Secara umum bahan struktur, termasuk kelongsong atau *cladding* harus mempunyai sifat antara lain penyerapan neutron yang rendah (bahan dasar Zr, Al, Mg, Be), kekuatan mekanik tinggi, stabilitas termal tinggi, 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 ( $^{235}\text{U}$ ) dapat menghasilkan radiasi dan panas sehingga tidak semua bahan dapat digunakan sebagai kelongsong<sup>[1]</sup>. Bahan kelongsong yang digunakan harus mampu mengungkung unsur-unsur hasil fisi sehingga unsur-unsur tersebut tidak akan larut dalam air

pendingin atau keluar dari teras reaktor. Selain itu juga bahan 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, 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 304 dan 304L digunakan sebagai bejana bertekanan reaktor LMFBR, tipe 316 dan 316L digunakan sebagai kelongsong bahan bakar LMFBR sedangkan tipe 347 untuk bejana bertekanan atau bahan struktur reaktor LMFBR<sup>4</sup>. Baja tahan karat selain untuk industri umum juga digunakan untuk material nuklir, misalnya digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor LMFBR dimana suhu operasinya bisa mencapai sekitar 500°C<sup>[4]</sup>. Baja tahan karat austenitik mempunyai masalah utama apabila mengalami pemanasan atau pengelasan pada rentang suhu 500–800°C karena adanya pembentukan kromium karbida yang menyebabkan daerah kekurangan unsur kromium/ *chromium depleted zone* sepanjang batas butir. Hal ini menyebabkan baja tahan karat menjadi tersensitasi terhadap korosi batas butir. Tingkat sensitasi ini dapat ditentukan dengan uji korosi secara elektrokimia menggunakan alat Potensiostat M273 dengan metode potensiodinamik. Dalam penelitian ini tingkat sensitasi baja tahan karat tipe 316 ditentukan untuk mengetahui dan menganalisa pengaruh suhu pada proses

*normalizing* dan *solution annealing*. Selanjutnya permukaan sampel hasil uji korosi diamati menggunakan SEM. Pada penelitian sebelumnya<sup>[5]</sup>, dilakukan uji korosi elektrokimia menggunakan metode *electrochemical potentiokinetic reactivation* (EPR) pada bahan AISI 321 yang dipanaskan pada suhu 600°C. Dari hasil penelitian didapat bahwa perlakuan panas pada suhu 600°C selama 60 jam menyebabkan korosi batas butir yang parah pada bahan AISI 321, 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.

#### TATA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat austenitik tipe 316, berbentuk batang pejal dengan diameter 15 mm. Bahan SS 316 selanjutnya dikenai perlakuan panas secara *normalizing* dan *solution annealing* menggunakan tungku tabung dalam atmosfer gas argon. Proses *normalizing* dilakukan pada suhu 550 dan 650°C selama 6 jam, sedangkan proses

*solution annealing* dilakukan dengan memanaskan sampel uji pada suhu 1000°C selama 3 jam lalu didinginkan cepat/*quenching* dalam media air, lalu dipanaskan kembali pada suhu 350, 450, 550 dan 650°C selama 6 jam dan didinginkan lambat dalam dapur/*furnace*. Bahan hasil perlakuan panas tadi lalu disiapkan untuk uji korosi sesuai ASTM G1-90.

Uji korosi dilakukan dalam media H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N menggunakan alat Potensiostat M273 dengan metode Potensiodinamik sesuai dengan ASTM 1992<sup>6</sup>. Pengamatan morfologi/mikrostruktur permukaan hasil uji korosi dilakukan dengan 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*.

#### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji komposisi kimia bahan SS 316 diperlihatkan pada Tabel 1. 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 1. Hasil uji 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>6</sup>	16 - 18	10 - 14	2 - 3	0,08	0,1	-
Sampel SS 316	16,51	10,37	1,79	0,077	-	-

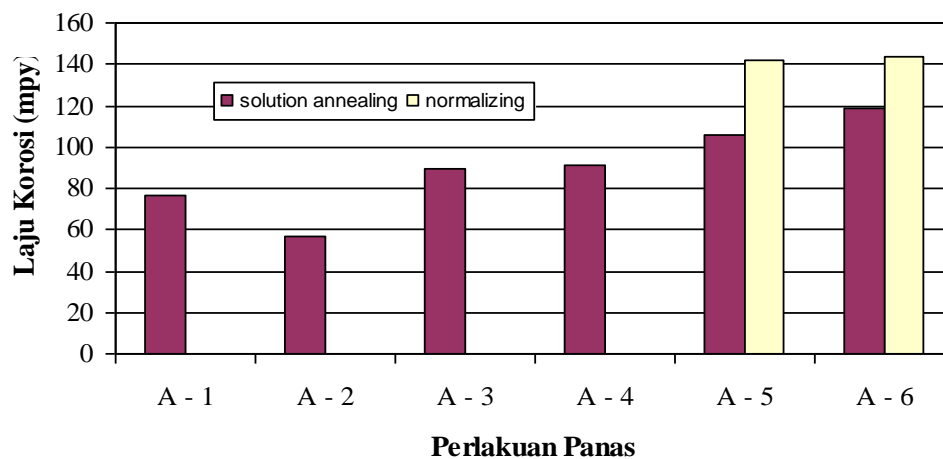
Sumber : Trethwaey KR & Chamberlain J. (1991)<sup>[7]</sup>

### • Laju Korosi

Hasil uji korosi menggunakan alat potensiostat ditunjukkan pada Gambar 1. Analisa fasa atau senyawa intermetalik bahan 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 pelarutan 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  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  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 di sekitar batas butir sehingga laju korosinya lebih besar<sup>7</sup>.



Gambar 1. Laju korosi bahan SS 316 pasca *normalizing* dan *solution annealing*

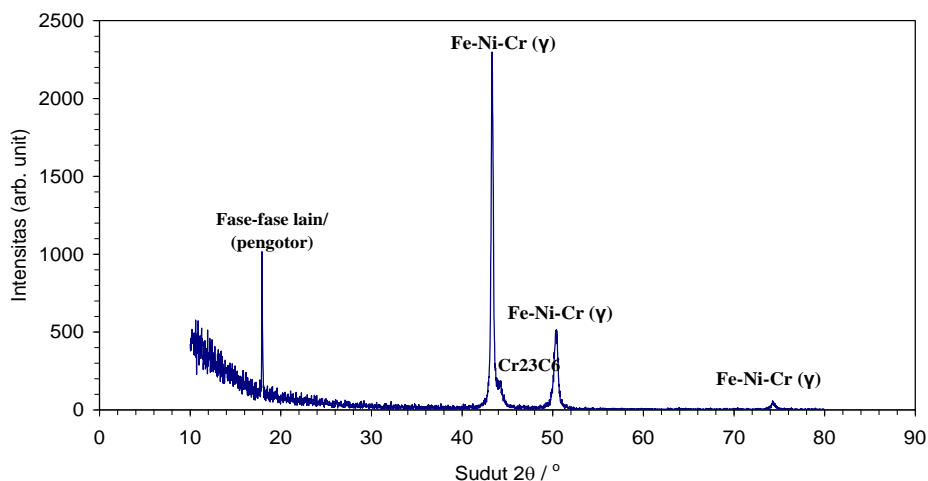
Keterangan :

- A - 1 : SS 316 tanpa perlakuan panas / blanko
- A - 2 : SS 316 pasca perlakuan pelarutan / *solution treatment*
- A - 3 : SS 316 pasca *solution annealing* suhu  $350\text{ }^\circ\text{C}$
- A - 4 : SS 316 pasca *solution annealing* suhu  $450\text{ }^\circ\text{C}$
- A - 5 : SS 316 pasca *solution annealing* suhu  $550\text{ }^\circ\text{C}$
- A - 6 : SS 316 pasca *solution annealing* suhu  $650\text{ }^\circ\text{C}$

Bahan SS 316 yang mengalami perlakuan *solution annealing* pada suhu ruang, 350, 450, 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi cenderung meningkat yaitu masing-masing sebesar 56,59 ; 89,39 ; 91,06 ; 105,9 dan 118,37 *mpy*. Proses *solution annealing* dapat meningkatkan laju korosi karena pada suhu tinggi atom karbon berdifusi ke batas butir. Semakin tinggi suhu *aging* maka semakin tinggi pula laju difusi atom karbon tersebut. Atom karbon yang berdifusi ke batas butir akan berikatan dengan unsur kromium di sekitar batas butir membentuk senyawa intermetalik yaitu senyawa kromium karbida,  $(Fe,Cr)_{23}C$ . Pembentukan senyawa intermetalik ini dapat pula 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>[8,9]</sup>

#### • Mikrostruktur

Hasil analisa mikrostruktur dengan menggunakan alat XRD dilakukan 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 pengujian menunjukkan bahwa pada bahan SS 316 tanpa perlakuan panas memiliki fasa utama yaitu Fe-Ni-Cr yaitu pada sudut  $2\theta$  sebesar 43,582 ; 50,791 ; dan 74,697 dengan bidang (hkl) berturut-turut bidang (111), (200) dan (220) dan juga mengandung fasa kedua atau senyawa intermetalik serta senyawa lainnya. Puncak intensitas pada bidang hkl (111), (200) dan (220) ini adalah merupakan pola difraksi dari struktur kristal *face center cubic* (FCC). 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 (Gambar 4).



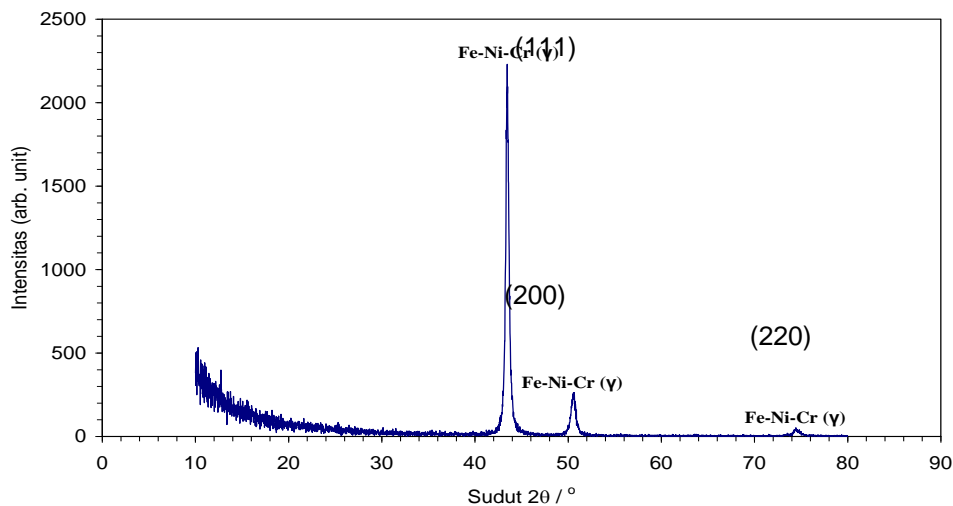
Gambar 2. XRD bahan SS 316 tanpa perlakuan panas

Pada suhu *aging* 650°C terjadi difusi atom karbon ke batas butir yang selanjutnya berikatan dengan unsur kromium yang ada di

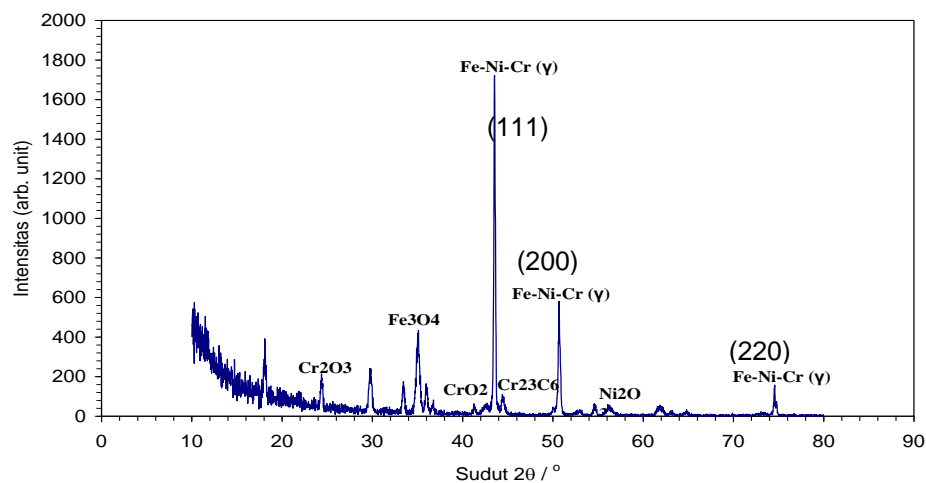
sekitar batas butir membentuk senyawa intermetalik yaitu kromium karbida. Senyawa intermetalik yang terbentuk ini menyebabkan

bahan SS 316 mengalami sensitasi dan rentan terhadap serangan korosi terutama korosi batas butir, karena senyawa kromium karbida ini lebih anodik dibanding matriknya sehingga terjadi sel galvanik secara mikro. Selain itu juga adanya senyawa kromium

karbida menyebabkan daerah sekitar batas butir kekurangan unsur kromium sehingga bahan SS 316 mengalami penurunan ketahanan korosi. Oleh karena itu bahan SS 316 pasca *normalizing* pada suhu 650 menghasilkan laju korosi paling besar.



Gambar 3. XRD bahan SS 316 pasca perlakuan *solution treatment*



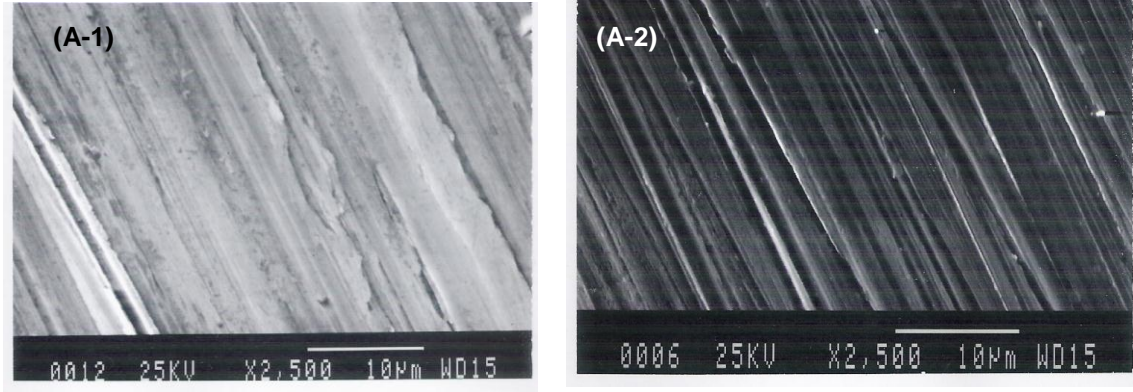
Gambar 4. XRD bahan SS 316 pasca *solution annealing* suhu 650°C

Hasil pengamatan mikroskop permukaan sampel hasil uji korosi dengan menggunakan SEM ditunjukkan pada Gambar 5, 6, 7 dan 8 yang memperlihatkan bagian permukaan terang dan bagian-bagian

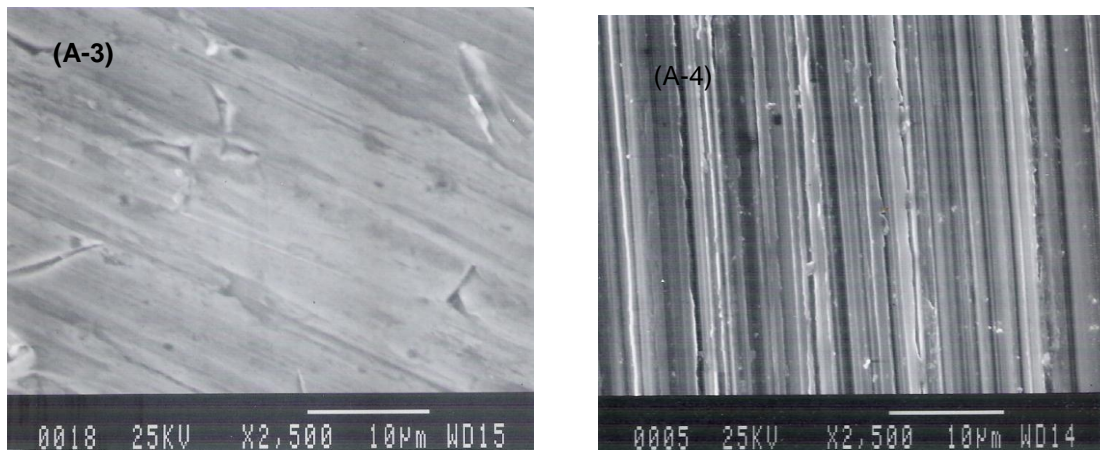
permukaan gelap. Diduga bagian permukaan gelap atau tampak berlubang adalah bagian yang mengalami korosi. Korosi yang terjadi adalah korosi batas butir dan korosi sumuran. Pada bahan SS 316 tanpa perlakuan panas

dan yang perlakuan pelarutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 tidak mengalami korosi yang berarti, tampak permukanya yang

masih halus, yang tampak seperti goresan adalah karena proses pengamplasan.



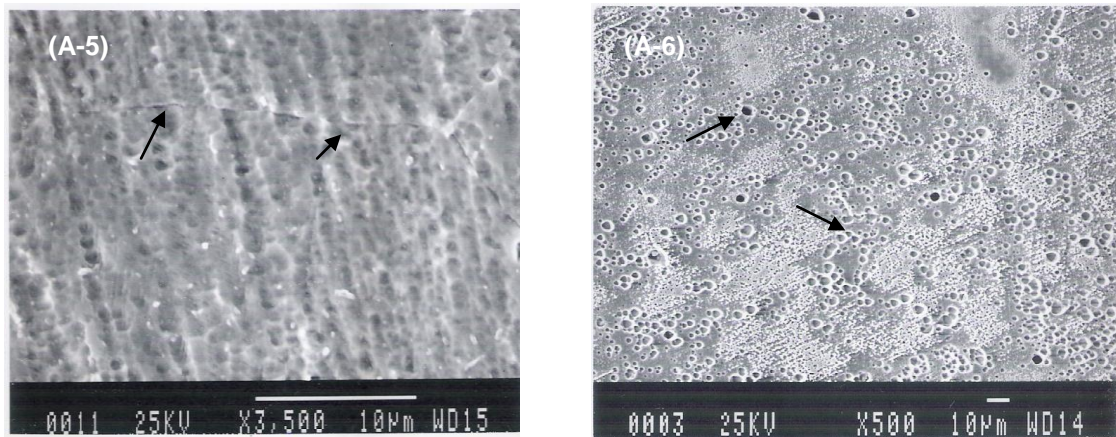
Gambar 5. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi.  
Tanpa perlakuan panas (A-1), Perlakuan pelarutan (A-2)



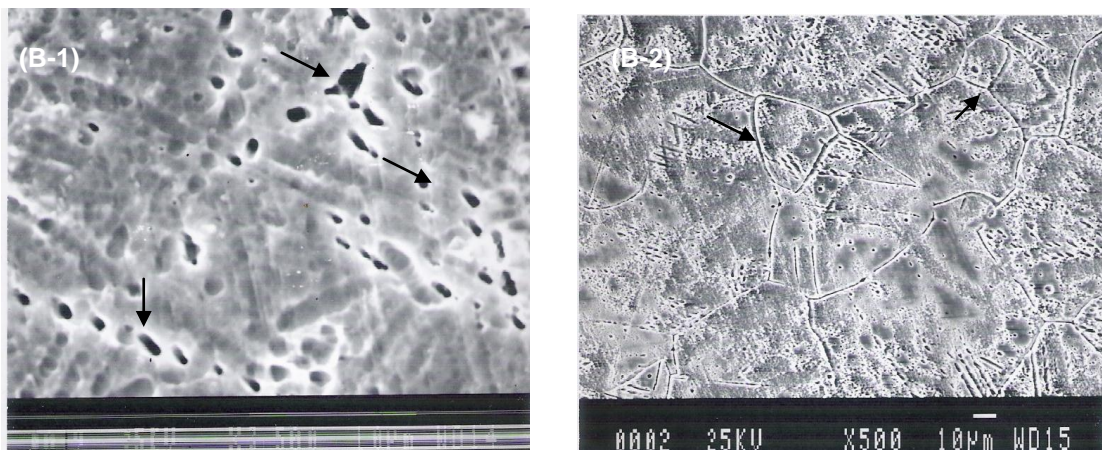
Gambar 6. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi. *Solution annealing* pada 350 °C (A-3),  
*solution annealing* 450 °C (A-4)

Permukaan sampel yang mengalami perlakuan *solution annealing* pada suhu 350 dan 450 °C seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 sedikit mengalami korosi. Pada *solution annealing* suhu 350 °C terlihat adanya sedikit korosi yang ditunjukkan dengan tanda panah, sedangkan sampel

pasca perlakuan *solution annealing* suhu 450 °C tidak mengalami korosi yang berarti. Hal ini dikarenakan permukaan yang tidak homogen. 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.



Gambar 7. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi. *Solution annealing* suhu 550 °C (A-5), *solution annealing* 650 °C (A- 6)



Gambar 8. Mikrograf SS 316 hasil uji korosi. *Normalizing* suhu 550 °C (B-1), *normalizing* suhu 650 °C (B-2)

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-5) memperlihatkan mikrograf bahan SS 316 pasca *solution annealing* suhu 550 °C, nampak batas butir yang terkorosi, sedangkan pada Gambar 7 (A-6) nampak lubang-lubang gelap seperti korosi sumuran yang ditunjukkan dengan tanda anak panah. Pada Gambar 8 memperlihatkan kondisi permukaan yang telah terkorosi lebih parah dibanding tingkat korosi pada Gambar 7 yaitu bahan SS 316 pada perlakuan *solution annealing* suhu 550 dan 650 °C. 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 memberikan perbedaan yang nyata atas respon perlakuan panas pada bahan SS 316. Semakin tinggi suhu *solution annealing* maka semakin tinggi pula laju korosinya. Pada selang suhu 450–650 °C, kenaikan laju korosinya relatif besar dibanding pada selang suhu 350–450 °C. Laju korosi yang tinggi pada selang suhu 450–650 °C ini sesuai dengan mikrograf permukaan yang diuji dengan alat SEM yang



menghasilkan kerusakan permukaan akibat korosi semakin besar. Hal ini disebabkan perlakuan panas pada rentang 450–650°C menyebabkan perubahan mikrostruktur, yaitu terbentuknya senyawa kromium karbida di batas butir dan adanya daerah kekurangan kromium di daerah sekitar batas butir. Pada pengujian mikrostruktur dengan alat XRD juga memperlihatkan hal yang sama. Untuk bahan SS 316 pasca *solution annealing* suhu 650°C terlihat adanya fasa baru yaitu fasa-fasa lain atau pengotor dan senyawa intermetalik kromium karbida yang menyebabkan korosi batas butir. Puncak intensitas senyawa kromium karbida muncul pada sudut  $2\theta$  sekitar 44,150 dengan bidang hkl (511). Pada 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* suhu 650°C.

## SIMPULAN

Perlakuan panas *normalizing* dan *solution annealing* pada bahan SS 316 berpengaruh terhadap laju korosi. Pada rentang suhu 550 – 650 bahan SS 316 telah mengalami sensitasi dan rentan terhadap serangan korosi batas butir. Pada proses *solution annealing* semakin tinggi suhu maka semakin tinggi pula laju korosinya. Perlakuan panas pada rentang suhu 550 dan 650°C menghasilkan laju korosi paling besar dengan jenis korosi yaitu korosi batas butir. Laju korosi perlakuan *solution annealing* pada suhu 550 dan 650 °C menghasilkan laju korosi lebih kecil dibandingkan dengan perlakuan *normalizing* pada suhu yang sama, dengan perbedaan laju korosi sebesar 35,82 mpy untuk suhu 550 °C dan 24,97 mpy untuk suhu 650 °C. Proses pelarutan atau *solution treatment* pada suhu 1000°C selama 3 jam dan di *quenching*, mampu membuat bahan SS 316 lebih stabil dan mampu mencegah terbentuknya senyawa kromium karbida di

batas butir apabila bahan tersebut dipanaskan kembali pada suhu tinggi. Oleh karena itu, pada aplikasi suhu tinggi atau pada proses pengelasan perlu dilakukan perlakuan pelarutan supaya bahan SS 316 lebih tahan terhadap serangan korosi batas butir.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada Bpk Slamet Pribadi, A Md yang telah membantu dalam preparasi metalografi dan juga Bpk Junaedi yang telah membantu dalam pengoperasian SEM.

## DAFTAR PUSTAKA

1. AKHADI M, “ Pengantar Teknologi Nuklir “, PT Rineka Cipta, Jakarta, 1997.
2. SOENTONO, S,” Korosi di Industri Nuklir “, Widyanuklida Vol. 1 No.2, 1998.
3. SUGONDO, FUTICHAH,” Karakterisasi Ukuran Kristalit, Regangan Mikro, dan Kekuatan Luluh Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dengan Difraksi Sinar – X “, Jurnal Sain Materi Indonesia. 2006 hal. 150-160
4. SURIPTO A,” Aplikasi dan Pengembangan Logam Paduan Untuk Menunjang Reaktor Nuklir “, Prosiding Seminar Material 1999, Puslitbang – LIPI, Serpong, September. 1999.
5. SILVA MJG, SAUSA AA, LIMA PD,” *Microstructural and Electrochemical Characterization of the Low Temperature Sensitization of AISI 321 SS Tube Used in Petroleum Refining Plants* “, Kluwer Academic Publishers, 2003.
6. ASTM 1992,” *Annual Book of ASTM Standard*”, Section 3, Vol 03.02.

- Philadelphia. American Society for Testing and Material
7. TRETWEY KR, CHAMBERLAIN J.: Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan. Widodo AT (penerjemah). Jakarta, PT Gramedia. Terjemahan dari : *Corrosion for Student of Science and Engineering*, 1991.
  8. AYDOGDU GH," *Determination of Susceptibility to Intergranular Corrosion in AISI 304L Type Stainless Steel by Electrochemical Reactivation Methode*" : Thesis. Department of Metallurgical and Material Engineering of Teheran, Teheran, 2004.
  9. PAT L. MANGONON," *The Principles of Material Selection for Engineering Design*", Prentice Hall.