

ANALISIS *STRESS CORROSION CRACKING* AUSTENITIC STAINLESS STEEL (AISI 304) DENGAN METODE *U-BEND* PADA MEDIA KOROSIF HCL 1M

*Chrisman¹, Athanasius Priharyoto Bayuseno²

¹) Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²) Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: chrismansinurat@gmail.com, bayuseno@undip.ac.id

Abstrak

Stress corrosion cracking merupakan salah satu mekanisme kegagalan dari material *stainless steel* yang melibatkan tegangan tarik dan dampak dari lingkungan yang korosif. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan laju korosi, mengevaluasi ketahanan, serta menganalisa perubahan nilai kekerasan dan struktur mikro pada *stainless steel* AISI 304 setelah pengujian *stress corrosion cracking* pada media korosif HCL 1M. Penelitian ini menggunakan variasi dari ketebalan material uji, yaitu 3 mm dan 6 mm dengan waktu pengujian selama 360 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kehilangan berat spesimen 2 dengan tebal 6 mm lebih tinggi dibandingkan spesimen 1 dengan tebal 3 mm setelah dilakukan pengujian SCC yaitu sebesar 23,99 gram dan 4,1 gram. Dari nilai kehilangan berat tersebut berbanding lurus dengan nilai laju korosinya yaitu sebesar 4,57 mm/y pada spesimen 2 dan 1,08 mm/y pada spesimen 1. Pada hasil pengujian kekerasan diketahui bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan spesimen setelah dilakukan pengujian SCC dengan media asam klorida 1M, baik pada spesimen 1 maupun spesimen 2. Dari gambar struktur mikro menunjukkan kenaikan *grain size* setelah pengujian SCC jika dibandingkan dengan *grain size* pada material awal sebesar 0,759 μm . Pada daerah pengamatan A, B, dan C, spesimen 1 memiliki *grain size* sebesar 0,930 μm , 0,959 μm , dan 1,052 μm . Sedangkan pada spesimen 2 sebesar 0,923 μm , 0,952 μm , dan 0,992 μm .

Kata Kunci: *Stress corrosion cracking*, *stainless steel*, ketebalan, kehilangan berat, laju korosi, kekerasan, *grain size*

Abstract

Stress corrosion cracking is one of the failure mechanism in the stainless steel tensile stress and due to corrosive environments. In the process of stress corrosion cracking, all the factors influence each other. The purpose of this study was to obtain the rate of corrosion, evaluate the corrosion resistance of the material, and analyze the hardness of values and microstructure of stainless steel AISI 304 after stress corrosion stress tested in corrosive media HCL 1M. This study used a variation of the thickness material, which are 3 mm and 6 mm with a time of testing for 360 hours. The result showed that the rate of weight loss for the second specimen with 6 mm thick is higher that of the first specimen with 3 mm thick which are 23,99 grams and 4,1 grams, the value of the weight loss is directly proportional to the value of the corrosion rate is equal to 4,57 mm/y for the second specimen and 1,08 mm/y for the first specimen. In the hardness test result there is a decrease in hardness value of both of the specimen after SCC testing of the specimen. The microstructure shows an increased grain size after SCC testing, if compared with the grain size of the original material. On the observation area of A, B, and C, provide that the first specimen have grain size of 0,930 μm , 0,959 μm , and 1,052 μm . Respectively while the second specimen have grain size of 0,923 μm , 0,952 μm and 0,992 μm .

Keywords: *Stress corrosion cracking*, *stainless steel*, thickness, weight loss, corrosion rate, hardness, grain size

1. PENDAHULUAN

Dunia industri selalu menggunakan logam *ferro* (besi dan baja) untuk komponen mesin maupun bahan baku produksi. Penggunaan logam lebih banyak dibandingkan dengan material lain seperti polimer dan keramik karena logam memiliki kekuatan yang memadai, penghantar panas dan listrik yang baik, memiliki sifat ulet, serta memiliki ketahanan aus yang baik. Namun logam juga memiliki beberapa kelemahan jika dibandingkan dengan material lain, karena logam mudah terkorosi jika berinteraksi dengan lingkungan.

Di sektor industri antara lain petrokimia, minyak dan gas bumi, farmasi dan lain-lain harus mengeluarkan biaya pemeliharaan untuk komponen –komponen pabriknya seperti *pressure vessel*, *heat exchanger*, pipa-pipa penyalur,

coller plant dan lain-lain. Pipa-pipa penyalur gas, air pendingin bertekanan tinggi juga menjadi persoalan jika terjadi kegagalan seperti pipa meledak atau bocor. Selain aspek korosi di lingkungan juga harus di lihat aspek internal material kemudian tekanan di dalam komponen tersebut yang bekerja pada material tersebut. Jenis korosi dibagi beberapa macam antara lain korosi seragam, korosi celah, korosi sumuran, korosi erosi, korosi retak tegang dan sebagainya. Korosi retak tegang merupakan kombinasi antara lingkungan korosif, beban di material logam dan internal material itu sendiri. Baja tahan karat AISI 304 merupakan material yang umumnya rentan terhadap serangan korosi retak tegang. Umumnya korosi retak tegang terdapat pada aplikasi pengelasan pipa atau komponen-komponen lainnya.

Korosi retak tegang atau *Stress corrosion cracking* (SCC) adalah salah satu bentuk korosi yang sering terjadi. SCC menjadi perhatian serius karena sulit diprediksi kapan terjadinya, bisa terjadi secara cepat serta bentuk patahannya tidak stabil. *Stress corrosion cracking* dapat didefinisikan sebagai suatu formasi retakan yang diakibatkan adanya aktivitas secara simultan antar tegangan tarik statik dan korosi itu sendiri. Tegangan tarik bisa sebabkan karena adanya beban dari luar, gaya sentrifugal, perubahan temperatur, atau tegangan internal akibat dari pekerjaan dingin (*cold working*), pengelasan, ataupun *heat treatment*. Maka dari itu perlu untuk mengamati dan mempelajari fenomena SCC ini terhadap suatu logam sehingga dapat menjadi referensi untuk mengatasi masalah korosi tersebut dalam aplikasi-aplikasi tertentu yang berkaitan dengan logam.[1] Adapun tujuan yang ingin diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan laju korosi pada *stainless steel* AISI 304 setelah pengujian *Stress Corrosion Cracking* (SCC) pada media korosif HCL 1M.
- Mengevaluasi ketahanan pada *stainless steel* AISI 304 didalam media korosif HCL 1M terhadap *Stress Corrosion Cracking* (SCC).
- Menganalisis struktur mikro *stainless steel* AISI 304 setelah mengalami *Stress Corrosion Cracking* (SCC).

2. BAHAN DAN PERALATAN PENGUJIAN

Dalam penelitian ini, spesimen yang digunakan adalah plat strip *stainless steel* AISI 304 variasi ketebalan 3 mm dan 6 mm dengan dimensi spesimen uji yang sama,



Gambar 1. Plat Strip *Stainless Steel* AISI 304.

a. Mesin *Bending*

Mesin *bending* digunakan untuk membentuk spesimen *u-bend*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Diponegoro dengan mesin *bending* yang dipakai adalah *Hydraulic Ultimate Tensile Machine* model WE -1000A.



Gambar 2. Mesin *Bending*

b. Timbangan Digital

Timbangan yang digunakan merupakan timbangan digital yang mempunyai ketelitian tinggi 0,01 dan 0,0001 gram.



Gambar 3. Timbangan Digital

c. Resin, Katalis, dan Kobalt

Resin, katalis, dan kobalt digunakan sebagai bahan campuran untuk membuat *mounting*.

d. HNO₃, HCl, Ethanol

HNO₃, HCl, dan *ethanol* dengan perbandingan 7.5 ml : 22.5 ml : 20 ml digunakan sebagai campuran pengetsaan untuk keperluan pengambilan gambar struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik.

e. Rockwell Hardness Tester

Digunakan untuk menguji nilai kekerasan material, membandingkan nilai kekerasan material sebelum dan setelah dilakukan pengujian SCC.



Gambar 4. Rockwell Hardness Tester Type HR150A

f. Mikroskop Optik dan Kamera

Mikroskop optik digunakan untuk mengamati struktur mikro. Mikroskop optik yang digunakan adalah mikroskop Olympus BX41M, dan kamera Olympus C-5060.



Gambar 5. Mikroskop Optik dan Kamera

2

3. METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah stainless steel AISI 304 dengan sifat mekanik awal adalah $\sigma_u = 590$ MPa, $\sigma_y = 267$ MPa, dan elongasi = 44%. Pembuatan spesimen mengacu pada standar pengujian ASTM G30-97, dengan spesifikasi dimensi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Dimensi Spesimen Uji

No.	L, mm	M, mm	W, mm	T, mm	D, mm	Y, mm	R, mm	α , rad
1.	250	200	20	3	6	36	15	1,57
2.	250	200	26	6	6	42	15	1,57

Dalam pengujian *stress corrosion cracking* ini dilakukan pengujian kehilangan berat (*weight loss*) untuk mencari laju korosi dari spesimen uji, pengujian kekerasan untuk mengetahui adanya perubahan nilai tegangan dengan pengkorelasian nilai kekerasan menjadi tegangan, dan pengujian struktur mikro untuk mengetahui pengaruh pengujian SCC terhadap perubahan ukuran diameter butir dari struktur mikro spesimen uji. Pengujian SCC dilakukan selama lima belas hari (360 jam) dari tiap masing - masing spesimen uji. Pengujian dilakukan dengan melakukan perendaman menggunakan media korosi asam klorida 1M pada masing - masing spesimen uji.



Gambar 6. Proses Perendaman Spesimen *U-Bend* pada Larutan Asam Klorida (HCL) 1M

Dilakukan penimbangan spesimen selama proses korosi per tiga hari (72 jam) selama lima belas hari (360 jam). Dalam perhitungan laju korosi digunakan metode *weight loss* dengan data pengurangan berat selama pengujian. Perhitungan laju korosi dengan metode *weight loss* dihitung menggunakan persamaan: [2]

$$\text{Laju korosi} = \frac{K W}{DAT} \quad (1)$$

Dimana, K, W, D, A, dan T masing-masing bernilai konstan dalam hal ini menggunakan $8,76 \times 10^4$ untuk laju korosi dalam milimeter per tahun, penurunan berat dalam gram, massa jenis g/cm^3 (7,98 untuk AISI 304), daerah uji dalam cm^2 dan waktu ekspos dalam jam.

Dalam menganalisa pengaruh SCC pada spesimen uji, dapat dilihat dari hasil nilai kekerasannya. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan alat *Rockwell Hardness Tester type HR-150A*. Pengujian menggunakan skala pengujian HRA dengan beban mayor sebesar 60 kgf. Pengujian dilakukan pada daerah sisi terluar spesimen dengan variasi 10 titik berjarak 10 mm, dari daerah pusat tegangan hingga daerah menjauhi pusat tegangan.

Dari gambar struktur mikro, kita dapat menginterpretasikan perubahan sifat dan karakteristik material tersebut. Dalam hal ini analisa yang digunakan adalah *grain size*. *Grain size* digunakan untuk membandingkan kekuatan suatu material. Dalam perhitungan *grain size* sesuai dengan standar ASTM E 112-96, salah satunya dapat menggunakan *linear intercept method*.

Dari persamaan tersebut, kita menggunakan garis yang diletakkan secara acak dalam gambar struktur mikro, kemudian menghitung jumlah butir dan jumlah persimpangan batas butir yang dilalui oleh garis tersebut. Kemudian rata-rata *line length intersected* dapat dicari dengan menggunakan persamaan: [3]

$$\text{Rata - rata Line Length Intersected} = \frac{\text{Line Length (mm)}}{\text{Rata - rata jumlah butir}} \quad (2)$$

Dari hasil perhitungan rata - rata *line length intersected* kemudian kita dapat mengetahui diameter butir (d) dengan persamaan berikut :

$$d = \frac{\text{Rata - rata Line Length Intersected}}{\text{Perbesaran}} \quad (3)$$

Dimana, d = Rata-rata diameter butir / *grain size* (mm)

Dari nilai rata-rata diameter butir / *grain size* pada gambar struktur mikro tersebut kita dapat mengetahui perubahan sifat mekanis yang terjadi pada material tersebut. Material yang memiliki butir yang padat, dan halus (*fine grain*) lebih kuat dan lebih keras dibandingkan material yang memiliki *grain size* yang besar. Kenaikan *grain size* material berbanding lurus dengan penurunan tegangan yang terjadi. Dari perhitungan tersebut kita dapat mengetahui efek dari pengujian *stress corrosion crack* pada material uji.

4. HASIL DAN ANALISA

4.1 Data Kuantitatif

Hasil Pengujian Kehilangan Berat

Penimbangan dilakukan per tiga hari (72 jam) selama lima belas hari (360 jam).

Tabel 2. Data Pengujian Kehilangan Berat (*Weight Loss Test*)

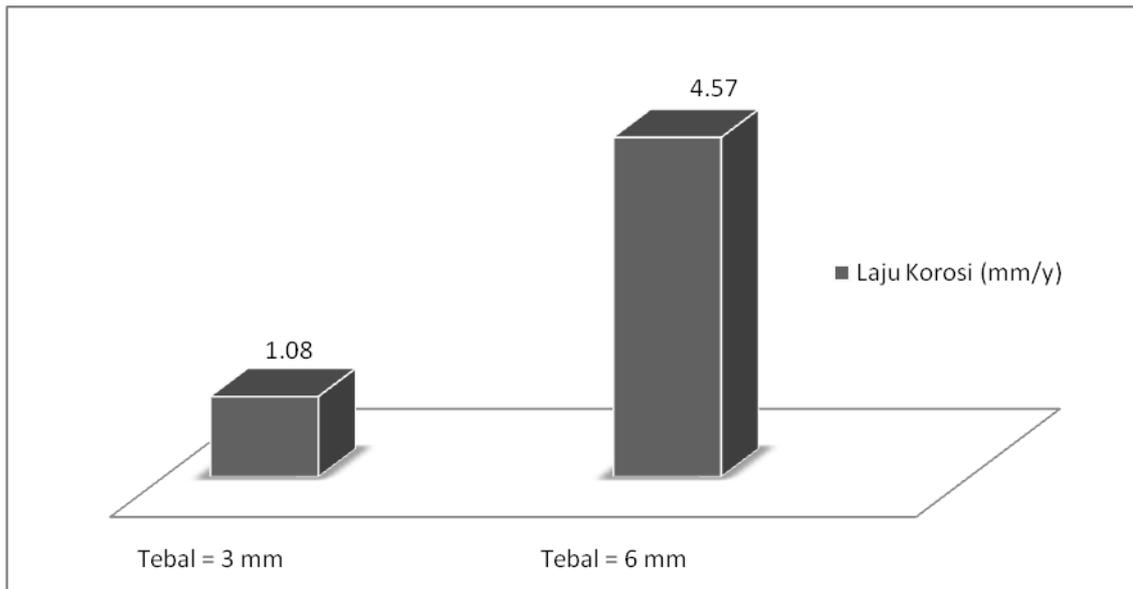
Waktu Penimbangan	Spesimen 1		Spesimen 2	
	Berat (gram)	\bar{m} (gram)	Berat (gram)	\bar{m} (gram)
Ke-0	155.5431	155.5423	327.98	327.9633
	155.5425		327.97	
	155.5412		327.94	
Ke-1	154.2195	154.2182	315.74	315.7400
	154.2178		315.75	
	154.2173		315.73	
Ke-2	153.2172	153.2166	310.97	310.9767
	153.2156		310.98	
	153.2169		310.98	
Ke-3	152.4522	152.4523	307.75	307.7433
	152.4532		307.74	
	152.4514		307.74	
Ke-4	151.8820	151.8823	305.64	305.6367
	151.8814		305.63	
	151.8835		305.64	
Ke-5	151.4434	151.4423	303.98	303.9700
	151.4423		303.96	
	151.4412		303.97	

Hasil Perhitungan Laju Korosi

Perhitungan laju korosi dengan menggunakan metode *weight loss* dilakukan dengan menghitung perubahan berat yang terjadi pada material selama material diaplikasikan pada lingkungan yang korosif.

Tabel 3. Laju Korosi Spesiman Uji *Stainless Steel* AISI 304

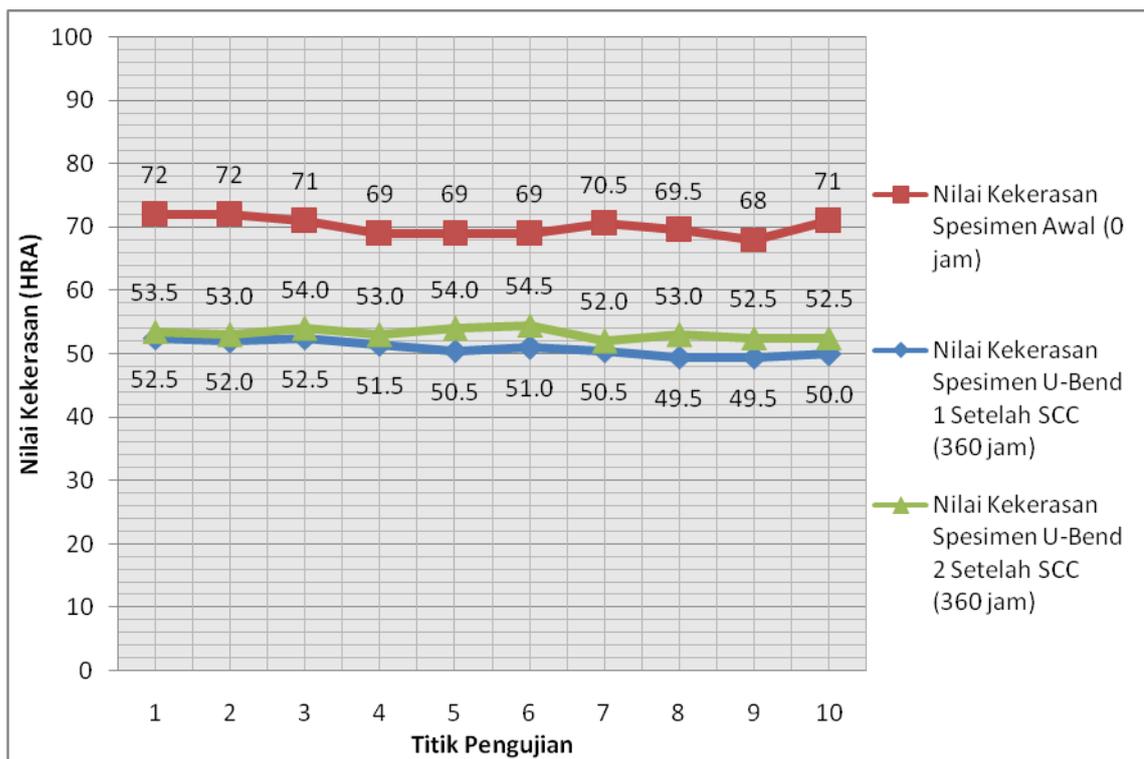
Kode	Metode Pengujian	ΔW (gram)	A (cm ²)	T (jam)	Laju Korosi (mm/y)
Spesimen 1 (Tebal = 3 mm)	Bentuk : <i>U-Bend</i>	4,1	115	360	1,08
	Media korosif : HCL 1M				
Spesimen 2 (Tebal = 6 mm)	Bentuk : <i>U-Bend</i>	23,99	160	360	4,57
	Media korosif : HCL 1M				



Gambar 7. Grafik Perbandingan Laju Korosi Variasi Ketebalan Material dalam Pengujian SCC

4.2 Data Nilai Kekerasan terhadap SCC

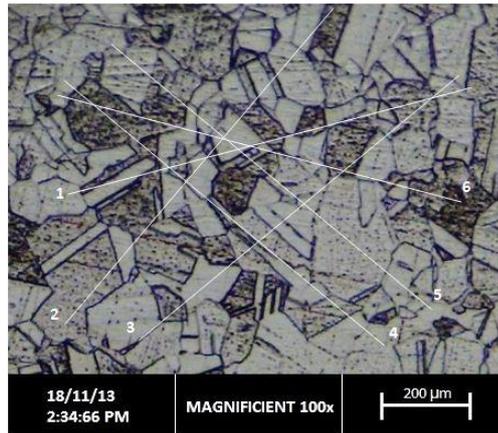
Pengujian SCC pada spesimen *U-Bend* dengan media asam klorida 1M terhadap nilai kekerasan material, diperlukan perbandingan nilai kekerasan sebelum dan setelah dilakukan pengujian SCC. Perbandingan nilai kekerasan tersebut seperti terlihat pada grafik.



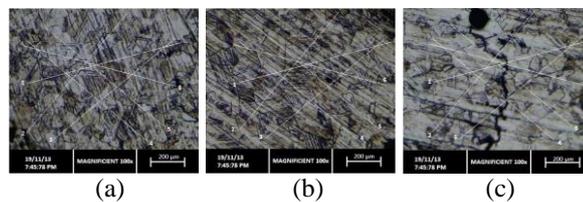
Gambar 8. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Spesimen sebelum dan setelah Pengujian SCC

4.3 Data Struktur Mikro

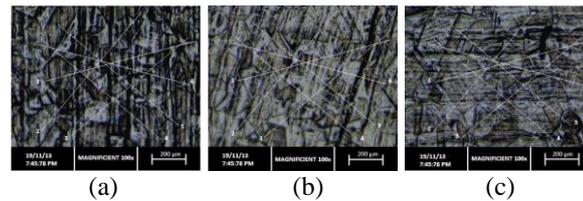
Perhitungan *grain size* dari gambar struktur mikro menggunakan *linear intercept method*.



Gambar 9. Struktur Mikro Material Awal (*Raw Material*)



Gambar 10. Struktur Mikro Spesimen 1 *U-Bend* Titik Pengamatan a) A ; b) B ; c) C



Gambar 11. Struktur Mikro Spesimen 2 *U-Bend* Titik Pengamatan a) A ; b) B ; c) C

Dari hasil perhitungan *grain size* didapatkan data seperti terlihat pada tabel.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Nilai Diameter Butir / *Grain Size*

No.	Kode Spesimen	Daerah Pengamatan	Waktu Pengamatan	<i>Grain size</i> (μm)
1.	Material awal (<i>Raw Material</i>)	-	0 jam	0,759
2.	Spesimen <i>U-Bend</i> 1	A	360 jam	0,930
	Spesimen <i>U-Bend</i> 2	A	360 jam	0,923
3.	Spesimen <i>U-Bend</i> 1	B	360 jam	0,959
	Spesimen <i>U-Bend</i> 2	B	360 jam	0,952
4.	Spesimen <i>U-Bend</i> 1	C	360 jam	1,052
	Spesimen <i>U-Bend</i> 2	C	360 jam	0,992

4.4 Analisa Hasil Pengujian Analisa Kuantitatif

Analisis kuantitatif yang diuraikan terdiri dari dua bagian, yaitu kehilangan berat (*weight lost*) dan laju korosi (*corrosion rate*) dengan variasi ketebalan spesimen uji. Dari data kuantitatif kehilangan berat dan laju korosi yang

terdapat pada Tabel 2 dan Tabel 3 kita dapat menganalisa hasil yang didapat terhadap *stress corrosion crack* yang terjadi pada material uji.

Dari data hasil pengujian yang didapat, bahwa tingkat kehilangan berat spesimen *u-bend* 2 (tebal = 6 mm) lebih tinggi dibandingkan spesimen *u-bend* 1 (tebal = 3 mm) dalam pengujian SCC dengan metode *u-bend* dengan dimensi spesimen dan larutan korosif yang sama. Didapatkan bahwa pada spesimen *u-bend* 1 (tebal = 3 mm) setelah dilakukan pengujian SCC selama 360 jam mengalami kehilangan berat sebesar 4,1 gram dan pada spesimen *u-bend* 2 (tebal = 6 mm) sebesar 23,99 gram.

Dari data pengujian kehilangan berat (*weight loss*) kita dapat menghitung laju korosi dari masing-masing spesimen. Selain variabel kehilangan berat, dalam menghitung laju korosi juga dilihat dari waktu pengujian, luas daerah yang terkorosi, massa jenis material uji serta konstanta yang digunakan dalam perhitungan.

Dari hasil perhitungan laju korosi pada spesimen uji, terlihat bahwa angka laju korosi (*corrosion rate*, mm/yr) menunjukkan gambaran yang sama dengan data tingkat kehilangan berat. Perbandingan laju korosi pada spesimen uji 1 *u-bend* dan spesimen uji 2 *u-bend* variasi ketebalan plat 3 mm dan 6 mm dengan media korosif HCL 1M dapat dilihat dari grafik pada Gambar 7. Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai laju korosi dengan variasi tebal material 6 mm lebih tinggi dari 3 mm dengan nilai laju korosi per spesimen yaitu 4,57 mm/yr dan 1,08 mm/yr. Dari analisa ketahanan material berdasarkan laju korosi, maka ketahanan kedua spesimen uji terhadap korosi pada lingkungan klorida termasuk buruk. Hal tersebut dapat dikarenakan beban kerja dalam proses pembuatan spesimen *u-bend* berdasarkan dimensi uji pada penelitian ini terlalu besar dalam tegangan yang dihasilkan pada spesimen uji.

Analisa Nilai Kekerasan terhadap SCC

Dalam menganalisa nilai kekerasan terhadap pengaruh SCC pada spesimen uji, dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan spesimen setelah dilakukan pengujian SCC dengan sebelum dilakukan pengujian.

Dari grafik pada Gambar 8 diketahui, bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan pada spesimen setelah dilakukan pengujian SCC dengan media asam klorida 1M, baik pada spesimen 1 *u-bend* (tebal = 3 mm) maupun spesimen 2 *U-Bend* (tebal = 6 mm). Penurunan nilai kekerasan ini adalah efek dari reaksi korosi media pengkorosi dengan material uji yang sudah mengalami perlakuan *bending*, sehingga mengakibatkan kekuatan material menurun.

Analisa Struktur Mikro

Analisa struktur mikro dalam pengujian *stress corrosion crack* pada spesimen *stainless steel* AISI 304 ini terdapat tegangan pada material akibat dari perlakuan *bending*, hal ini mengakibatkan penurunan tegangan yang berbanding lurus dengan kenaikan ukuran butir (*grain size*) material. Hasil dari struktur mikro *raw material* sebelum dilakukan pengujian SCC digunakan sebagai pembanding dengan struktur mikro material sesudah dilakukan pengujian korosi tegangan. Data hasil perhitungan *grain size* dapat terlihat pada Tabel 4.

Dari data hasil perhitungan, terlihat bahwa terjadi kenaikan *grain size* setelah pengujian SCC jika dibandingkan dengan *grain size* pada material awal (*raw material*). Hal tersebut dapat terlihat pada struktur mikro spesimen *u-bend* 1 daerah pengamatan A memiliki *grain size* sebesar 0,930 μm lebih besar dibanding material awal dengan *grain size* sebesar 0,759 μm . Hal tersebut juga terjadi pada struktur mikro spesimen *u-bend* 2 daerah pengamatan dengan *grain size* sebesar 0,923 μm . Hal tersebut juga terjadi pada *grain size* di daerah pengamatan B dan C pada kedua spesimen uji. Dari data hasil perhitungan tersebut juga dapat terlihat bahwa, besarnya kenaikan *grain size* di daerah A, B dan C berbeda. Daerah yang semakin dekat dengan titik pusat tegangan maka kenaikan *grain size*-nya pun semakin tinggi.

Dalam perbandingan efek korosi antara spesimen *u-bend* 1 dan spesimen *u-bend* 2 dengan variasi ketebalan, bahwa tingkat penurunan tegangan pada spesimen 1 dengan tebal spesimen 3 mm lebih tinggi dibanding dengan penurunan tegangan dengan tebal spesimen 6 mm. Ini bisa disebabkan tegangan yang terjadi pada spesimen 1 lebih besar dibandingkan spesimen 2. Pada gambar struktur mikro spesimen 1 *u-bend* hari ke-15 (360 jam) juga telah terlihat bentuk retakan transgranular. Hal tersebut menandakan bahwa pada hari ke-15 spesimen 1 *u-bend* telah mengalami kegagalan material akibat dari proses SCC yang terjadi.

5. KESIMPULAN

- Dari pengujian *weight loss* diketahui bahwa laju korosi spesimen *u-bend* 2 (tebal = 6 mm) adalah sebesar 4,57 mm/years, ini lebih besar dibandingkan dengan laju korosi spesimen 1 (tebal = 3 mm) yaitu 1,08 mm/years. Dan berdasarkan laju korosi tersebut, maka ketahanan kedua spesimen uji terhadap korosi pada lingkungan klorida termasuk buruk.
- Dari pengujian kekerasan diketahui bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan pada spesimen setelah dilakukan pengujian SCC dengan media asam klorida 1M, baik pada spesimen 1 *u-bend* (tebal = 3 mm) maupun spesimen 2 *u-bend* (tebal = 6 mm).
- Dari analisa *grain size* pada pengujian struktur mikro juga didapatkan bahwa terjadi kenaikan *grain size* pada spesimen setelah pengujian SCC jika dibandingkan *grain size* sebelum SCC, baik pada spesimen *u-bend* 1 maupun spesimen *u-bend* 2.
- Pada spesimen setelah pengujian SCC terjadi penurunan sifat mekanis material jika dibandingkan dengan spesimen awal, hal tersebut terlihat dari penurunan nilai kekerasan dan kenaikan *grain size* pada material uji.

6. REFERENSI

- [1]. Karl Sieradzki, *Stress Corrosion Cracking*, Arizona State University. 2003.
- [2]. ASTM G1. *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. 2004
- [3]. Callister Jr, William. D, 2010, "*Material Science and Engineering*", 8rd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.