

# Analisis Korosi Retak Tegangan pada Pipa Baja Karbon dalam Larutan Asam dan *Sweet Gas*

Nendi Suhendi Syafei<sup>1</sup>, Darmawan Hidayat<sup>2</sup>, Bernard Y. Tumbelaka<sup>3</sup>, Liu Kin Men<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran  
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM. 21, Jatinangor 45363, Jawa Barat, Indonesia  
<sup>4</sup>Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran  
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM. 21, Jatinangor 45363, Jawa Barat, Indonesia

n.suhendi@unpad.ac.id

---

---

## Abstrak

Pada eksplorasi di industri migas bahwa umumnya akan diikuti dengan zat korosif termasuk *sweet gas* (misalnya H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>), maka akan mengakibatkan terjadinya peristiwa korosi. Bila terjadi peristiwa korosi retak tegangan akan mengakibatkan pipa baja karbon pecah sehingga berdampak produksi migas bisa terhenti. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peristiwa korosi pipa baja karbon skala laboratorium dalam lingkungan asam dengan adanya *sweet gas* H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub> dengan menggunakan metoda tiga titik pembebanan. Penelitian ini menggunakan bahan pipa baja karbon API 5L-X65 yang berada dalam lingkungan larutan asam asetat dan amoniak, kemudian diisikan *sweet gas* CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dalam keadaan jenuh. Berdasarkan hasil uji mikrostruktur dan mikroskop terpolarisasi, terjadi peristiwa korosi retak tegangan, yaitu korosi retak tegangan transgranular dan korosi retak tegangan intergranular. Laju korosi yang terjadi pada sampel uji akan semakin besar, apabila defleksi yang diberikan semakin besar. Dalamnya retakan pada sampel uji akan semakin dalam apabila defleksi yang diberikan semakin besar. Laju korosi pada sampel uji akan semakin besar untuk defleksi yang sama tetapi variasi waktu paparan berbeda.

**Kata kunci:** korosi, retak tegangan, pembebanan tiga titik, *sweet gas*, pipa baja karbon

## Abstract

*In industry exploration oil and gas that will generally be followed by corrosive substances including sweet gas (e.g H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>), then will result in corrosion event. If there is event a corrosion stress cracking will cause the pipe carbon steel to break so that production oil and gas can be stopped. This research aims to analyze the corrosion event of pipe carbon steel in laboratory scale on acid environment with the existence of sweet gas H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> by using method three points loading. This research uses pipe carbon steel API 5L-X65 which is in the environment of acetic acid and ammonia solution, then filled with sweet gas CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S in saturated state. Based on microstructure and microscope polarized test results, there is a phenomenon corrosion stress cracking, i.e corrosion stress cracking transgranular stress and corrosion stress cracking intergranular. The corrosion rate occurs in test sample test will be greater if deflection to given is greater. Inside crack in test sample test will deeper if deflection to given is greater. The corrosion rate in test sample test will be greater for the same deflection but variation of exposure time is different.*

**Keywords:** corrosion, stress cracking, three-point loading, *sweet gas*, pipe carbon steel

---

---

## I. PENDAHULUAN

Pada sepanjang jalur pipa di industri migas, umumnya akan terjadi peristiwa fenomena korosi yang disebabkan oleh adanya zat korosif yang ikut serta mengalir di dalamnya. Dalam industri migas bila terjadi korosi retak regangan akan mengakibatkan fatal, yaitu pecahnya pipa sehingga akan mengakibatkan produksi migas akan terhenti. Korosi dapat menyerang pada logam baik yang

mengalami pembebanan maupun tidak. Pengaruh beban khususnya pada logam yang mengalami tegangan akan sangat berpengaruh terhadap ketahanan laju korosi. Korosi ini umumnya disebut peretakan korosi-tegangan. Berdasarkan data penelitian korosi yang telah dilakukan pada benda uji terdapat hasil laju korosi yang berbeda-beda dari masing-masing benda uji. Besarnya beban yang dikenakan pada benda uji memberikan pengaruh terhadap laju korosi. Pada benda uji dengan beban

yang semakin besar mengakibatkan cacat-cacat permukaan yang semakin banyak dimana banyak permukaan yang terkelupas dan membentuk suatu lubang-lubang atau ceruk. Lubang pada benda uji ini menyebabkan mempercepat terjadinya korosi [1]. Dari hasil pengamatan lain menunjukkan bahwa kegagalan disebabkan karena pengaruh media korosif. Hal ini ditunjukkan bahwa tegangan yang bekerja masih di bawah tegangan luluh material. Semakin besar tegangan, maka terjadinya *Stress Corrosion Cracking* (SCC) semakin cepat. Kekerasan uji menurun seiring dengan lamanya benda uji terendam dalam media korosif [2].

Penelitian ini merupakan kelanjutan dan bagian dari penelitian analisis laju korosi pada pipa baja yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian laju korosi pada pipa baja karbon API 5L-Grade B pada di lingkungan gas H<sub>2</sub>S kondisi CO<sub>2</sub> jenuh dalam larutan NaCl telah dilakukan [3]. Selanjutnya laju korosi diteliti pada pipa baja karbon API 5L-Grade B di lingkungan gas H<sub>2</sub>S dan kondisi CO<sub>2</sub> jenuh dalam larutan NaCl dan larutan asam asetat [4]. Kajian korosi retak tegangan akibat *sweet gas* (H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>) pada pipa baja karbon API 5L-X65 terhadap laju korosi dalam larutan asam asetat telah dilakukan pada [5][6]. Karakteristik pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda pembebanan tiga titik pada lingkungan gas H<sub>2</sub>S kondisi jenuh CO<sub>2</sub> dalam larutan asam asetat telah dikaji pada [7]. Kemudian pengujian kekerasan dan uji tarik untuk menentukan koefisien pengerasan *n* suatu bahan API 5L-X65 juga telah dilakukan [8]. Kemudian analisa fenomena korosi pelat pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 250 ml Asam Asetat dan 4750 Aquades pada kondisi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S jenuh pada suhu ruang juga telah diteliti [9]. Selain itu, perbandingan kajian korosi retak tegangan akibat *sweet gas* (H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>) pada pipa baja karbon API 5L-X65 terhadap laju korosi dalam larutan Asam Asetat-Amoniak dengan air laut dan dianalisis dengan menggunakan metoda ultrasonic telah dilakukan [10]. Laju korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda tiga titik pembebanan pada larutan asam asetat dengan diisi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dalam keadaan jenuh juga telah diteliti [11]. Analisa korosi retak regangan pada pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan air laut dan amoniak dengan diisi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dalam keadaan jenuh juga telah dilakukan [12]. Terakhir, analisa korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda pembebanan tiga titik pada lingkungan gas H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> jenuh di dalam larutan Asam Asetat juga telah diteliti [13].

Beberapa penelitian terkait lainnya pun telah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian pada pipa baja karbon API 5L-X60 yaitu 17H<sub>1</sub>S akan rentan

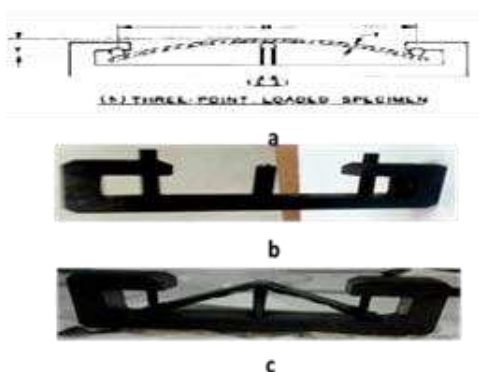
terhadap korosi retak tegangan dan sifat mekanik pipa baja karbon API 5L-X60 terdegradasi menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap korosi retak tegangan dari pada pipa baja karbon. Berdasarkan hasil pengamatan dengan fraktografik bahwa pipa baja karbon akibat proses *embrittlement* Hidrogen akan terjadi korosi retak tegangan, yaitu akibat disebabkan oleh atom Hidrogen yang meresap ke dalam pipa baja karbon [14]. Ketahanan korosi yang tinggi pada pipa baja karbon tahan karat (*super martensit*) pada umumnya digunakan dalam industri minyak dan gas, terutama di lingkungan asam. Namun ada beberapa yang rentan dengan adanya Hidrogen dan mekanisme proses korosi akan terjadi dengan adanya H<sub>2</sub>S serta tergantung pada pH. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa H<sub>2</sub>S akan berdifusi merembes di sepanjang struktur logam dan akan membentuk pori logam Sulfida karena bereaksi pada permukaan logam. Hal ini akan membebaskan Hidrogen terikat dengan sulfur yang dapat diserapnya dan Hidrogen yang ada dalam larutan H<sub>2</sub>S secara tidak langsung menyebabkan kegagalan [15]. Pada waktu bersamaan korosi retak tegangan telah diidentifikasi sebagai salah satu kegagalan dominan pada pipa baja karbon di lingkungan lembab, yaitu akan menyebabkan pecahnya pipa transmisi gas bertekanan tinggi serta kerugian ekonomi yang serius dan bencana [14]. Baja komersial SS-430 pun akan mengalami proses korosi terus menerus pada lingkungan NaCl. Reaksi korosi yang terjadi, didominasi oleh reaksi *anodis*. Laju korosi yang terukur sangatlah kecil dengan tendensi menurun seiring dengan kenaikan konsentrasi larutan NaCl. Jadi dapat disimpulkan bahwa SS-430 mempunyai ketahanan korosi yang luar biasa (*outstanding*) pada lingkungan NaCl. Produk korosi yang terjadi pada permukaan baja SS-430 di lingkungan NaCl didominasi oksida krom dan oksida besi [16].<sup>[4]</sup> Selain itu, terlihat adanya pengaruh suhu terhadap sifat proteksi bahan poli pada permukaan baja karbon dengan metode *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) pada beberapa variasi suhu, yaitu 25°C, 45°C, 60°C, dan 75°C. Dari hasil *fitting* yang dilakukan terhadap hasil pengukuran EIS diperoleh keterangan bahwa terdapat penurunan nilai impedansi sering kenaikan suhu yang memperlihatkan bahwa resistansi material proteksi korosi dalam kondisi kritis untuk melindungi baja karbon menurun [17].

Berdasarkan hasil percobaan awal ditunjukkan bahwa produk korosi yang dominan terbentuk adalah FeS dan kerawanan korosi retak tegang meningkat seiring dengan meningkatnya beban kerja, konsentrasi H<sub>2</sub>S terlarut, dan waktu pengkorosian. Pada penelitian ini, awalnya sampel

uji berada dalam lingkungan garam dan juga dalam lingkungan asam tanpa adanya amoniak. Kemudian dilanjutkan di dalam lingkungan asam dengan adanya amoniak, karena kondensat *Ammonia Anhydrous* (Amonia Anhidrat) dapat menyebabkan korosi retak tegang pada baja bertegangan (*stressed carbon steel*). Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peristiwa korosi retak tegangan (SCC) pada pipa baja karbon dalam berbagai kondisi lingkungan.

## II. METODOLOGI

Untuk membuat rumah sampel (*holder*) uji korosi, diperlukan lembaran baja berupa pelat atau *flat extruded section* yang berpenampang lintang persegi panjang. Selain itu, dapat juga digunakan besi cor atau besi dalam bentuk balok seperti terlihat pada Gambar 1. Bahan sampel uji korosi API 5L-X65 yang akan diuji ditipiskan dalam bentuk pelat tipis kemudian ditekuk pada kedua ujungnya sehingga mendapatkan tegangan. Besarnya regangan dapat diatur dengan memberikan lendutan melalui skrup yang digerakkan dengan ulir seperti pada Gambar 1(b) untuk menentukan defleksi  $y$ . Penelitian ini menggunakan sampel uji korosi berukuran panjang 12,5 cm, lebar 2 cm, dan tebal 2 mm (Gambar 2) disimpan pada *holder* spesimen tiga titik pembebanan seperti pada Gambar 1(a), Gambar 1(b) rancangan bentuk *holder*, dan sampel uji ditekuk seperti pada Gambar 1(c). Kemudian sampel uji dimasukkan kedalam ruang *chamber* uji korosi (Gambar 3) dengan dua variasi defleksi.



Gambar 1. Bentuk holder dan pemasangan spesimen uji: (a) desain tiga poin pembebanan, (b) holder, (c) sampel uji dengan holder



Gambar 2. Sampel uji korosi pelat API 5L-X65



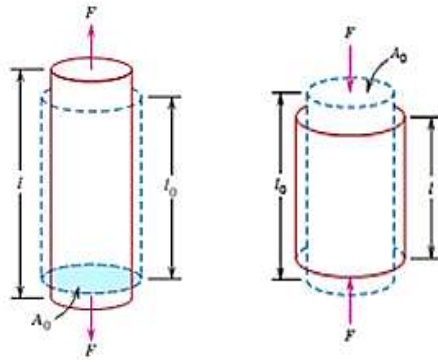
Gambar 3. Chamber uji korosi (tabung berwarna putih berisi gas  $H_2S$  dan tabung berwarna hitam berisi  $CO_2$ ) pada suhu ruang

Sampel uji korosi yang tersimpan dalam *holder* kemudian diisi larutan Aquades 4700 ml, Asam Asetat 250 ml, dan 50 ml Amoniak seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Populasi sampel uji korosi setiap variasi waktu terdiri dua buah sampel uji dengan 2 variasi defleksi. Baik berat sampel uji sebelum diuji korosi dan berat sampel sesudah diuji korosi kemudian ditimbang beratnya. Sampel uji pelat baja karbon API 5L-X65 yang berada pada ruang *chamber* selanjutnya diisi gas  $CO_2$  hingga jenuh, kemudian diisi gas  $H_2S$  sampai jenuh selama 10 menit (dalam selang 2 hari sekali).

Kemudian setelah itu dilakukan uji tarik pada sampel uji. Uji tarik adalah uji *stress-strain* mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tarik. Dalam pengujiannya bahwa bahan uji ditarik sampai putus dan biasanya yang menjadi fokus adalah kemampuan maksimum bahan tersebut dalam menahan beban tarik. Kemampuan/kekuatan tarik maksimum ini umumnya disebut *Ultimate Tensile Strength* (UTS). Perubahan panjang dalam kurva disebut sebagai regangan teknik ( $\epsilon$ ) yang didefinisikan sebagai perubahan panjang yang terjadi akibat perubahan statik ( $\Delta L$ ) terhadap panjang batang mula-mula ( $L_0$ ). Tegangan yang dihasilkan pada proses ini disebut dengan tegangan teknik ( $\sigma$ ), dimana didefinisikan sebagai nilai pembebanan yang terjadi ( $F$ ) pada suatu luas penampang awal ( $A_0$ ) seperti Gambar 4. Tegangan normal tersebut akibat beban tekan statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut [18]:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

dengan  $\sigma$  adalah tegangan normal akibat beban tarik statik ( $N/mm^2$ ),  $F$  adalah beban tarik (N), dan  $A_0$  adalah luas penampang spesimen mula-mula ( $mm^2$ ) seperti Gambar 2.



Gambar 4. Prinsip dasar tegangan/stress [17]

Regangan akibat beban tarik statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut [18]:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

dengan  $\Delta L = L - L_0$ ,  $\epsilon$  adalah regangan akibat beban tarik static,  $L$  adalah perubahan panjang spesimen akibat beban tarik (mm), dan  $L_0$  adalah panjang spesimen mula-mula (mm).

Spesimen berbentuk keping datar mempunyai dimensi lebar, panjang, dan ketebalan yang biasanya ditentukan. Penyangga spesimen sampel uji dikedua ujung ditahan kemudian ditebuk/ditekan dengan sekrup (dilengkapi dengan bola) dimana penyangga pendorong berada ditengah seperti pada Gambar 1(a) dan Gambar 1(b). Dimensi spesimen sampel yang digunakan dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan, tetapi dimensinya perlu diperkirakan secara proporsional. Perhitungan regangan elastik seperti pada persamaan berikut [19]:

$$\sigma = \frac{6.E.t.y}{H^2} \quad (3)$$

dengan  $\sigma$  adalah tegangan tarik maksimum ( $N/m^2$ ),  $E$  adalah modulus elastisitas ( $N/m^2$ ),  $t$  adalah ketebalan spesimen (mm),  $y$  adalah defleksi maksimum (mm), dan  $H$  adalah jarak antara penyangga luar (mm) dan defleksi kecil ( $y/H$  kurang dari 0,1) seperti ditunjukkan pada Gambar 1(a). Spesimen keping datar dengan 25-51 mm (1-2 inch), panjang 127-254 mm (5-10 inci) dan ketebalan spesimen uji bahan yang digunakan seperti pada Gambar 2.

Data yang diperoleh berdasarkan berat sebelum dan sesudah diuji korosi dari sampel uji, yaitu untuk menghitung laju korosinya. Kemudian sampel uji tersebut diuji menggunakan mikrostruktur, yaitu untuk melihat pola struktur pelat baja karbon. Penelitian ini perlu dikembangkan dengan menggunakan metoda ultrasonik untuk mengetahui panjang *crack* yaitu berdasarkan pantulan gelombang yang mengenai permukaan pelat baja karbon.

### III. HASIL PENELITIAN

Tabel 1 menunjukkan laju korosi untuk setiap perubahan defleksi dan waktu paparan. Tabel 2 merupakan hasil perhitungan regangan untuk sampel yang diuji. Tabel 3 menunjukkan laju korosi dengan variasi defleksi untuk beberapa sampel uji.

Tabel 1. Laju korosi (mmpy)

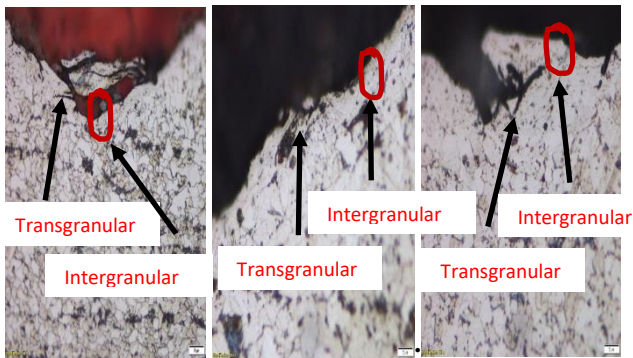
No.	Defleksi (cm)	Waktu Paparan (jam)	Ph <sub>i</sub>	Ph <sub>f</sub>	Laju Korosi (mmpy)
1	0.5	336	4	4	2,615746361
2	1	336	4	4	2,950561895
3	1.5	336	4	4	3,138895633
1	0.5	672	4	4	3,588804007
2	1	672	4	4	4,028249396
3	1.5	672	4	4	4,237509105
1	0.5	1008	4	4	1,72988026
2	1	1008	4	4	1,8449731
3	1.5	1008	4	4	1,900775689
1	0.5	1344	4	5	4,229661865
2	1	1344	4	5	4,253203583
3	1.5	1344	4	5	4,352601944

Tabel 2. Perhitungan regangan  $\sigma$  untuk sampel uji

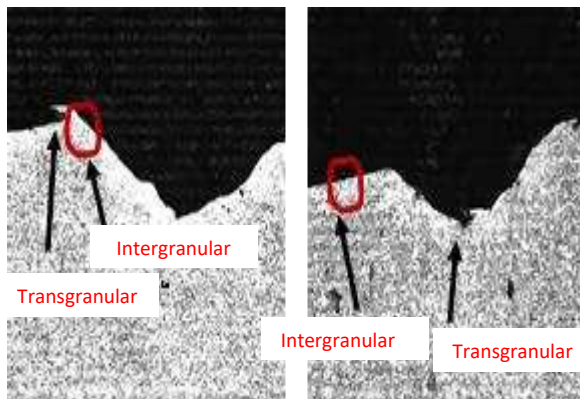
No.	E ( $N/m^2$ )	t (m)	y (m)	H (m)	$\sigma$ ( $N/m^2$ )
1	2,05E+11	0,0022	0,005	0,0946	1,51E+09
2	2,05E+11	0,0022	0,01	0,0946	3,02E+09
3	2,05E+11	0,0022	0,015	0,0946	4,54E+09

Tabel 3. Laju korosi dengan variasi defleksi

No.	Defleksi (cm)	Laju Korosi (mmpy)
A1	0,5	2,615746361
B1	1	2,950561895
C1	1,5	3,138895633
A2	0,5	3,588804007
B2	1	4,028249396
C2	1,5	4,237509105
A3	0,5	1,72988026
B3	1	1,8449731
C3	1,5	1,900775689
A4	0,5	4,229661865
B4	1	4,253203583
C4	1,5	4,352601944

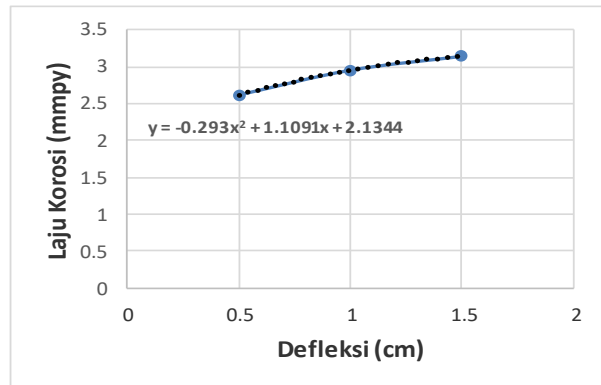


Gambar 5. Hasil mikrostruktur terjadi korosi retak tegangan transgranular dan intergranular (garis merah): sampel C3 (kiri), sampel A1 (tengah), dan sampel B1 (kanan)

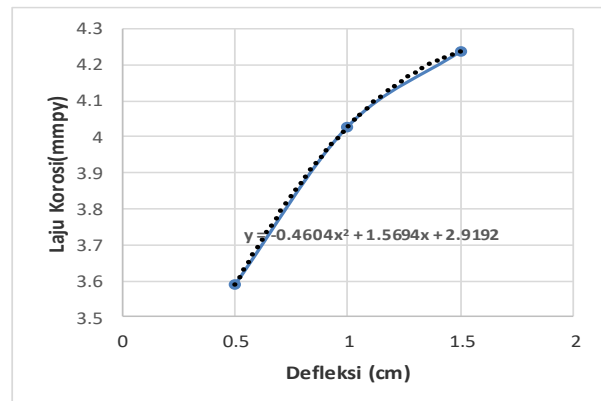


Gambar 6. Hasil mikroskop terpolarisasi terjadi korosi retak tegangan transgranular dan intergranular (garis merah): sampel B3 (kiri) dan sampel C3 (kanan)

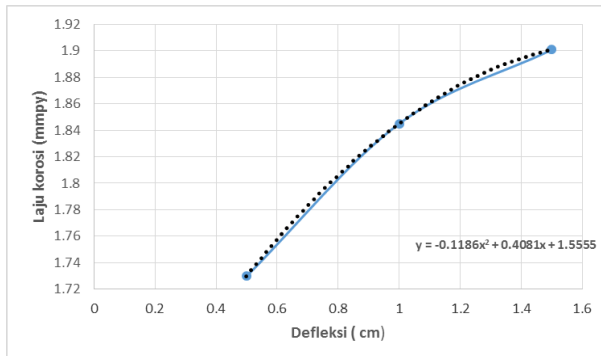
Berdasarkan hasil uji mikrostruktur seperti pada Gambar 5 dan berdasarkan hasil mikroskop terpolarisasi pada Gambar 6 bahwa ternyata sampel uji terjadi korosi retak tegangan transgranular dan intergranular. Berdasarkan grafik laju korosi terhadap waktu variasi defleksi dengan waktu paparan yang sama hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan Tabel 3 yang menunjukkan bahwa laju korosi makin lama makin besar dengan defleksi semakin besar, grafik laju korosi membentuk persamaan kuadratik. Berdasarkan hasil dari grafik untuk waktu paparan yang sama, diperoleh sampel uji 336 jam adalah  $y = -0,293x^2 + 1,1091x + 2,1344$  seperti pada Gambar 7(a), waktu paparan 672 jam adalah  $y = -0,4604x^2 + 1,5694x + 2,9192$  seperti pada Gambar 7(b), waktu paparan 1008 jam adalah  $y = -0,1186x^2 + 0,4081x + 4,282$  seperti Gambar 7(c) dan waktu paparan 1334 jam adalah  $y = 0,1517x^2 + 0,1805x + 1,5555$  seperti pada Gambar 7(d).



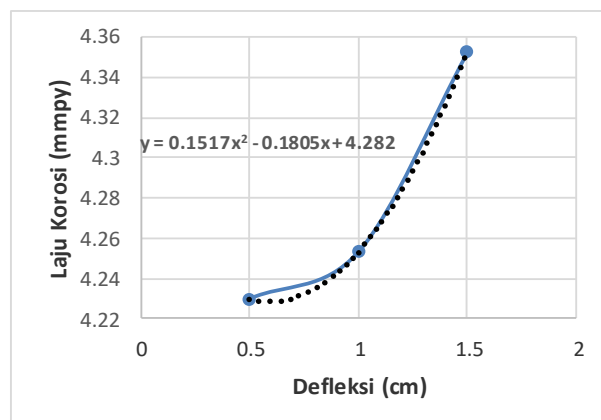
(a) Waktu paparan 336 jam



(b) Waktu paparan 672 jam



(c) Waktu paparan 1008 jam



(d) Waktu paparan 1334 jam

Gambar 7. Grafik laju korosi (mppy) terhadap variasi defleksi (cm) dengan waktu paparan yang sama

**Tabel 4. Data grafik dalamnya crack ( $\mu\text{m}$ ) terhadap waktu paparan (jam) dengan defleksi yang sama**

No.	Waktu Paparan (jam)	Dalamnya crack ( $\mu\text{m}$ )
1	336	47,79
2	672	90,41
3	1008	109,97
4	1344	110,33
1	336	61,63
2	672	91,36
3	1008	112,56
4	1344	127,34
1	336	94,88
2	672	125,1
3	1008	144,65
4	1344	150,03

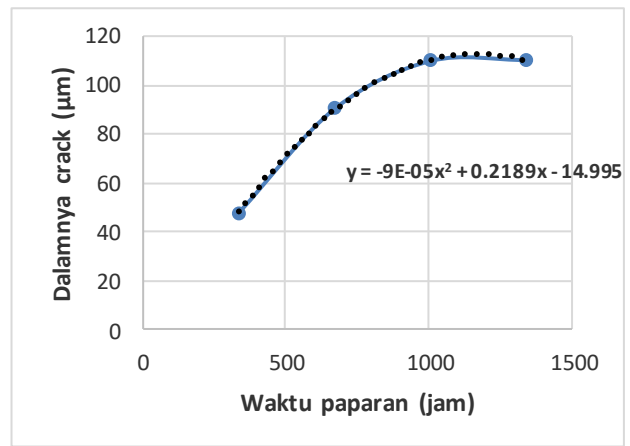
Berdasarkan hasil grafik dalamnya crack terhadap defleksi y berdasarkan Tabel 4 ditunjukkan pada Gambar 8. Dalamnya crack yang terjadi semakin lama semakin dalam dengan semakin lama waktu paparan sampel uji dengan defleksi yang sama membentuk persamaan kuadratik. Berdasarkan hasil dari grafik untuk defleksi 0,5 cm adalah  $y = -9E-05x^2 + 0,2189x - 14,995$  seperti pada Gambar 8(a), untuk defleksi 1,0 cm adalah  $y = -3E-05x^2 + 0,1206x + 24,952$  seperti pada Gambar 8(b) dan untuk defleksi 1,5 cm adalah  $y = -6E-05x^2 + 0,1475x + 51,365$  seperti pada Gambar 8(c).

#### IV. KESIMPULAN

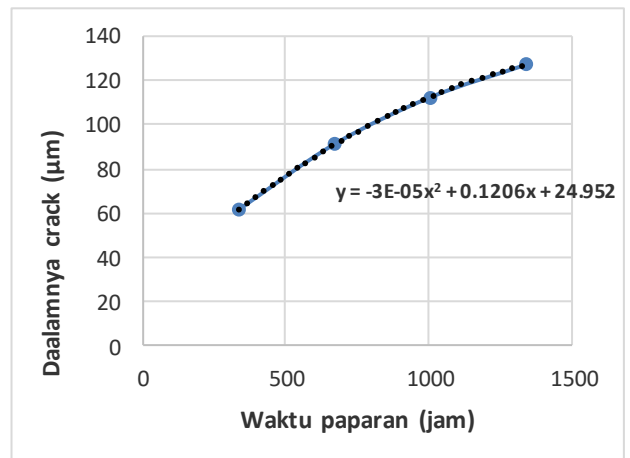
Penelitian uji korosi pelat baja karbon API 5L-X65 berada pada lingkungan larutan 7700 ml aquades, 250 ml asam asetat, 50 ml amoniak yang diisi dengan gas CO<sub>2</sub> dalam keadaan jenuh serta diisi gas H<sub>2</sub>S setiap dua hari sekali selama 10 menit menunjukkan bahwa peristiwa fenomena korosi terjadi. Korosi yang terjadi adalah korosi retak tegangan *transgranular* dan korosi retak tegangan *intergranular* karena adanya *sweet gas* (gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S) dan larutan amoniak yang merupakan unsur kondensat *ammonia anhydrous* (amonia anhidrat).

#### UCAPAN TERIMA KASIH

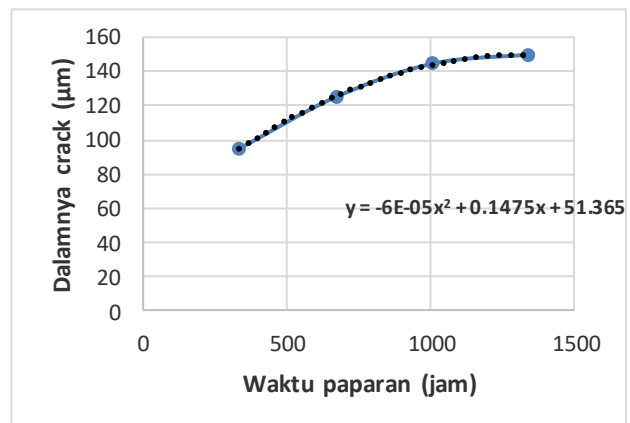
Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Padjajaran (UNPAD) atas dana Hibah Internal UNPAD (HIU) pada penelitian ini dengan nomor kontrak 872/UN6.3.1/LT/2017.



(a) Defleksi 0,5 cm



(b) Defleksi 1,0 cm



(a) Defleksi 1,5 cm

**Gambar 8. Grafik dalamnya crack ( $\mu\text{m}$ ) terhadap waktu paparan (jam) dengan defleksi yang sama**

#### REFERENSI

- [1] M. Monnota, et al, "Sulfide stress corrosion study of a super martensitic stainless steel in H<sub>2</sub>S sour environments: Metallic sulfides formation and hydrogen embrittlement", *Applied Surface Science*, vol. 394, pp. 132–141, 2017.

- [2] F. E. Putrandono and A. P. Bayuseno, "Analisis Stress Corrosion Cracking Aisi C20500 Dengan Variasi Pembebanan Pada Media Korosi Air", *Jurnal Teknik Mesin S-I*, vol. 2, no. 2, 2014.
- [3] N. S. Syafei, S. Suryaningsih, O. Nurhilal, "Kajian Korosi Retak Tegangan akibat sweet gas ( $H_2S$  dan  $CO_2$ ) pada Pipa Baja Karbon", FMIPA Universitas Padjadjaran, November 2014.
- [4] N. S. Syafei, et al, "Analisa Regangan (Stress) Pada Pipa Baja Karbon API 5L GradeB Terhadap Laju Korosi Dalam Larutan NaCl dan Asam Asetat". *Jurnal Fisika Indonesia*, vol. XIX, no. 56, ISSN 1410-2994, Nov. 2015.
- [5] N. S. Syafei, Zaida, L. K. Men, "Kajian Korosi Retak Tegangan akibat sweet gas ( $H_2S$  dan  $CO_2$ ) pada pipa baa karbon API 5L-X65 terhadap Laju Korosi dalam Larutan Asam Asetat dan Dianalisis dengan Metoda Ultrasonik", Program Studi Teknik Elektro FMIPA Universitas Padjadjaran, Desember 2016.
- [6] N. S. Syafei, et al, "Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon API 5L-X65 dengan Metoda Pembebanan Tiga Titik pada Lingkungan Gas  $H_2S$  Kondisi Jenuh  $CO_2$  dalam Larutan Asam Asetat," *Prosiding Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri*, ITN Malang, pp. D12.1-D12.5, ISSN 2085-4218, Feb. 2017.
- [7] N. S. Syafei, et al, "Karakteristik Pipa Baja Karbon API 5L-X65 dengan Metoda Pembebanan Tiga Titik pada Lingkungan Gas  $H_2S$  Kondisi Jenuh  $CO_2$  dalam Larutan Asam Asetat", *Prosiding Seminar Nasional Energi dan Teknologi (SINERGI) Unisma Bekasi*, pp. 33-39, ISSN: 2527-3108, Mei 2017.
- [8] N. S. Syafei, et al, "Pengujian Kekerasan dan Uji Tarik Untuk Menentukan Koefisien Pengerasan n Suatu Bahan API 5L-X65," *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXXI HFI Jateng dan DIY*, Yogyakarta, ISSN: 0853-0823, Maret 2017.
- [9] N. S. Syafei, et al, "Analisa fenomena korosi pelat pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 250 ml asam asetat dan 4750 aquades pada kondisi gas  $CO_2$  dan  $H_2S$  jenuh pada suhu ruang," *Eksakta*, vol. 18, no. .2, pp. 113-120, e-ISSN: 2549-7464, p-ISSN: 1411-3724, Oktober 2017.
- [10] N. S. Syafei and L. K. Men, "Perbandingan Kajian Korosi Retak Tegangan Akibat Sweet Gas ( $H_2S$  dan  $CO_2$ ) Pada Pipa Baja Karbon API 5L-X65 Terhadap Laju Korosi Dalam Larutan Asam Asetat-Amoniak dengan Air Laut dan Dianalisis dengan Menggunakan Metoda Ultrasonik, Penelitian Riset Hibah Unpad (RFU-HIU 2017, Universitas Padjadjaran), 2017.
- [11] N. S. Syafei, et al, "Laju korosi papa pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda tiga titik pembebanan pada larutan asam asetat dengan diisi gas  $CO_2$  dan  $H_2S$  dalam keadaan jenuh," *Simposium Nasional RAPI XVI*, FT UMS, ISSN: 1412-9612, Desember 2017.
- [12] N. S. Syafei, et al, "Analisa korosi retak tegangsn pada pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 7900 ml air laut dan 100 ml amoniak dengan diisi gas  $CO_2$  dan  $H_2S$  dalam keadaan jenuh," *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Indonesia*, ISSN: 2085-4218, ITN Malang, Februari 2018.
- [13] N. S. Syafei, et al, "Analisa korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan pembebanan tiga titik pada lingkungan gas  $H_2S$  dan  $CO_2$  jenuh di dalam larutan asam asetat," *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, vol. 02, no. 01, pp. 37-44, ISSN: 2549-0516, 2018.
- [14] O. I. Zvirko, et al, "Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength", *21st European Conference on Fracture (ECF21)*, Procedia Structural Integrity 2 509-516, Catania, Italy, 2016.
- [15] M. Monnota, et al, "Sulfide stress corrosion study of a super martensitic stainless steel in  $H_2S$  sour environments: Metallic sulfides formation and hydrogen embrittlement", *Applied Surface Science*, vol. 394, pp. 132-141, 2017.
- [16] D. N. Rochmah, et al, "Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Proteksi Korosi Bahan Poli (Tmspma) Pada Permukaan Baja Karbon", *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya*, November 2016.
- [17] D. W. Callister, *Materials Science an Engineering: an Intruduction 7<sup>th</sup> ed.* United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [18] ASTM G1-93. *Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion*.
- [19] A. Solehudin, Korosi Retak Tegang (SCC) Baja Karbon AISI 1010 dalam Lingkungan NaCl- $H_2O$ - $H_2S$ . [Online]. Available: <http://docplayer.info/42197006-Korosi-retak-tegang-scc-baja-karbon-aisi-1010-dalam-lingkungan-nacl-h-2-o-h-2-s.html>.

