

Perbandingan Laju Korosi Retak Tegangan Pada Pipa Baja Karbon Dalam Larutan Asam Asetat Dan Air Laut Dengan Adanya Sweet Gas

Syafei, N.S.¹⁾, Hidayat, D.,²⁾ Emlliano³⁾, Men, L.K.⁴⁾

^{1),2),3)} Prodi Teknik Elektro, ⁴⁾ Prodi Fisika, FMIPA Universitas Padjadjaran, Bandung.
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM. 21, Jatinangor 45363, Jawa Barat, Indonesia
Email : n.suhendi@unpad.ac.id

Abstrak. Eksplorasi di industri migas di lepas pantai atau di daratan bahwa pada umumnya akan diikuti dengan zat korosif termasuk sweet gas (misalnya H₂S dan CO₂), maka akan berdampak akibatnya terjadi peristiwa korosi retak tegangan sehingga pipa baja karbon akan pecah dan proses produksi akan terganggu. Proses penelitian sampel uji API 5L-X65 seperti pada gambar 2, dan sampel uji berada pada holder menggunakan metoda tiga titik pembebanan seperti pada gambar 1 kemudian disimpan pada chamber uji korosi seperti pada gambar 3 yaitu metoda tiga titik pembebanan. Berdasarkan hasil data penelitian bahwa laju korosi (mmpy) terhadap variasi defleksi (cm) seperti pada tabel 2, tabel 3 dan berdasarkan gambar 4, gambar 5 baik sampel pada lingkungan kondisi asam atau kondisi basa bahwa laju korosi (mmpy) akan semakin besar bila defleksi (cm) yang diberikan semakin besar. Dan berdasarkan hasil uji mikrostruktur seperti pada gambar 6, gambar 7 baik pada lingkungan kondisi asam atau kondisi basa terjadi korosi retak tegangan transgranular dan korosi retak tegangan intergranular.

Kata kunci: Korosi retak tegangan, tiga titik pembebanan, API5L-X65, sweet gas.

1. Pendahuluan.

Bahwa sepanjang jalur pipa pada industri migas itu akan terjadi peristiwa fenomena korosi, karena adanya zat korosif ikut serta mengalir. Penelitian awalnya bahwa sampel uji berada dalam lingkungan garam, dan juga dalam lingkungan asam tanpa adanya amoniak. Dan penelitian ini dalam lingkungan asam tetapi adanya amoniak, karena kondensat ammonia anhydrous (amonia anhidrat) dapat menyebabkan korosi retak tegang pada baja bertegangan (stressed carbon steel). Tujuannya untuk menganalisis peristiwa korosi retak tegangan (SCC=Stress Corrosion Cracking) dalam berbagai kondisi lingkungan. 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, dan metoda penelitian uji korosi retak tegangan menggunakan holder tiga titik pembebanan seperti pada gambar 1.

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^[19]. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa kegagalan disebabkan karena pengaruh media korosif, hal ini ditunjukkan bahwa tegangan yang bekerja masih dibawah 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.^[6]

Penelitian laju korosi pada pipa baja karbon API 5L-Grade B pada di lingkungan gas H₂S kondisi CO₂ jenuh dalam larutan NaCl^[7], laju korosi pada pipa baja karbon API 5L-Grade B di lingkungan gas H₂S dan kondisi CO₂ jenuh dalam larutan NaCl dan larutan asam asetat^[8], kajian korosi retak tegangan akibat sweet gas (H₂S dan CO₂) pada pipa baja karbon API 5L-X65 terhadap laju korosi dalam larutan asam asetat^[9,10]. Karakteristik Pipa Baja Karbon API 5L-X65 dengan Metoda Pembebanan Tiga Titik pada Lingkungan Gas H₂S Kondisi Jenuh CO₂ dalam Larutan Asam Asetat^[12]. Pengujian Kekerasan dan Uji Tarik Untuk Menentukan Koefisien Pengerasan *n* Suatu Bahan API 5L-X65^[11]. Analisa fenomena korosi pelat pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 250 ml asam asetat dan 4750 aquades pada kondisi gas CO₂ dan H₂S jenuh pada suhu ruang^[13].

Laju korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda tiga titik pembebanan pada larutan asam asetat dengan diisi gas CO₂ dan H₂S dalam keadaan jenuh^[14]. Analisa Korosi retak regangan pada pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan air laut dan amoniak dengan diisi gas CO₂ dan H₂S dalam keadaan jenuh^[16]. Analisa korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda pembebanan tiga titik pada lingkungan gas H₂S dan CO₂ jenuh di dalam larutan asam asetat^[15].

Dari hasil penelitian pada pipa baja karbon API 5L-X60 yaitu 17H₁S 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 kedalam pipa baja karbon^[17]. Ketahanan korosi yang tinggi pada pipa baja karbon tahan karat (super martensit) pada umumnya digunakan dalam industri minyak dan gas, yaitu terutama di lingkungan asam. Namun ada beberapa yang rentan dengan adanya hidrogen dan mekanisme proses korosi akan terjadi dengan adanya H₂S serta tergantung pada pH. H₂S akan berdifusi merembes di sepanjang struktur logam maka akan terbentuk pori logam sulfida karena bereaksi pada permukaan logam, sehingga akan membebaskan hidrogen terikat dengan sulfur yang dapat diserapnya dan hidrogen yang ada dalam larutan H₂S secara tidak langsung menyebabkan kegagalan^[20].

Hal ini menyebabkan hilangnya sifat mekanik awal terutama ketahanan terhadap patah getas, yaitu berdasarkan perhitungan teknik pada tahap desain pipa. 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^[17]. Baja komersial SS-430 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.^[4] Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terlihat adanya pengaruh suhu terhadap sifat proteksi bahan poli(TMSPPMA) 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 seiring kenaikan suhu yang memperlihatkan bahwa resistansi material proteksi korosi dalam kondisi kritis untuk melindungi baja karbon menurun.^[21]

Berdasarkan hasil percobaan ditunjukkan bahwa produk korosi yang dominan terbentuk adalah FeS dan kerawanan korosi retak tegang meningkat seiring dengan meningkatnya beban kerja, konsentrasi H₂S terlarut, dan waktu pengkorosian. Pada 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 CO₂ dalam keadaan jenuh dalam lingkungan basa serta diisi gas H₂S setiap dua hari sekali selama 10 menit bahwa peristiwa fenomena korosi terjadi. Korosi yang terjadi adalah **korosi retak tegangan transgranular** dan **korosi retak tegangan intergranular**, karena adanya sweet gas (gas CO₂, H₂S) dan larutan amoniak merupakan unsur kondensat ammonia anhydrous (amonia anhidrat)^[18].

2. Pembahasan

Berdasarkan tabel 2, gambar 5 bahwa sampel uji di lingkungan basa (Larutan air laut, amoniak) yaitu laju korosinya untuk waktu paparan yang sama akan semakin besar dengan deflesi yang diberikan semakin besar.

Berdasarkan tabel 3 dan gambar 4 bahwa sampel uji di lingkungan asam (Larutan aquades, asam asetat, amoniak) yaitu laju korosinya untuk waktu paparan yang sama akan semakin besar dengan deflesi yang diberikan semakin besar.

Berdasarkan hasil uji mikrostruktur bahwa sampel uji di lingkungan basa (Larutan air laut, amoniak) seperti pada gambar 6 dan di lingkungan asam (Larutan aquades, asam asetat, amoniak) seperti pada gambar 7 terjadi korosi retak tegangan transgranular dan korosi retak tegangan intergranular.

2.1. Tabel

Tabel 1. Perhitungan Regangan σ untuk sampel uji.

No	E (N/m ²)	t (m)	y (m)	H (m)	H ² (m ²)	σ (N/m ²)
1	2.05E+11	0.0022	0.005	0.0946	0.008949	1.51E+09
2	2.05E+11	0.0022	0.01	0.0946	0.008949	3.02E+09
3	2.05E+11	0.0022	0.015	0.0946	0.008949	4.54E+09

Tabel 2. Laju Korosi (mmpy) untuk sampel uji di kondisi larutan air laut dan amoniak (kondisi basa).

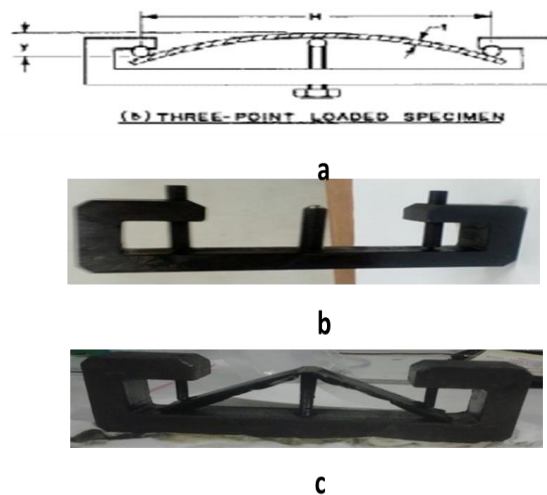
No.	Defleksi (cm)	Waktu Paparan (jam)	Ph awal	Ph Akhir	Laju Korosi (mmpy)
A1	0.5	336	14	10	0.031388956
A2	1	336	14	10	0.209259709
A3	1.5	336	14	10	0.512686287
B1	0.5	672	14	9	0.235417172
B2	1	672	14	9	0.334815534
B3	1.5	672	14	9	0.627779127
C1	0.5	1008	14	9	0.132531149
C2	1	1008	14	9	0.149969458
C3	1.5	1008	14	9	0.219722694
D1	0.5	1344	14	9	0.036620449
D2	1	1344	14	9	0.149097543
D3	1.5	1344	14	9	0.308658071

Tabel 3. Laju Korosi (mmpy) untuk sampel uji di kondisi larutan aquades, asam asetat dan amoniak (kondisi asam).

No.	Defleksi (cm)	Waktu Paparan (jam)	Ph awal	Ph Akhir	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

2.2. Gambar Dan Keterangan Gambar

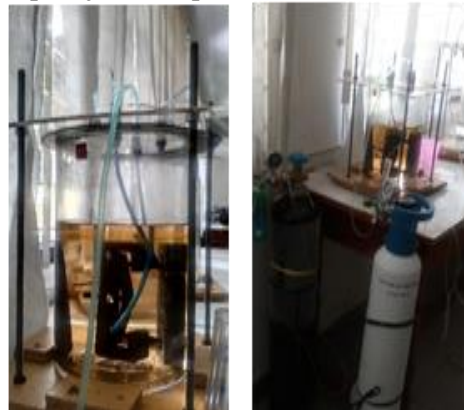
Bentuk holder dan cara pemasangan sampel uji ditunjukkan seperti pada Gambar 1, bentuk sampel uji seperti ditunjukkan pada gambar 2 dan sampel uji API 5L-X65 yang berada pada holder disimpan seperti pada gambar 3.



Gambar 1. Bentuk holder dan pemasangan spesimen uji.



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

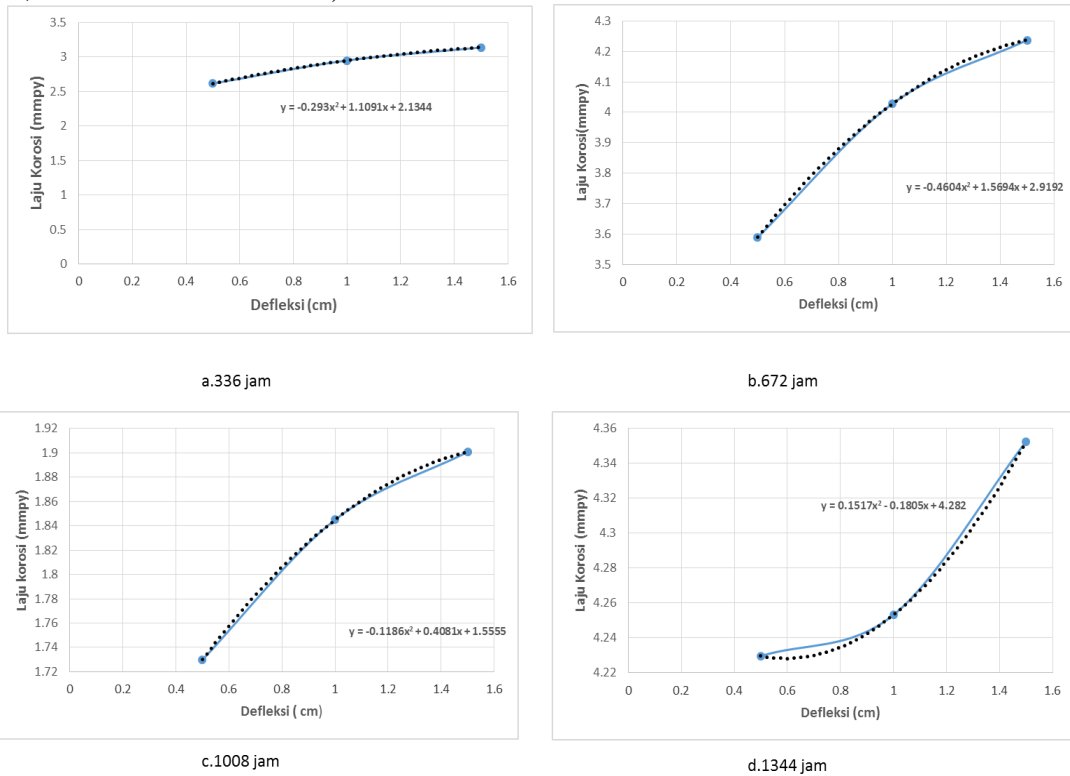


Gambar 3. Chamber uji korosi. (tabung berwarna putih berisi gas H₂S dan tabung berwarna hitam berisi CO₂) pada suhu ruang.

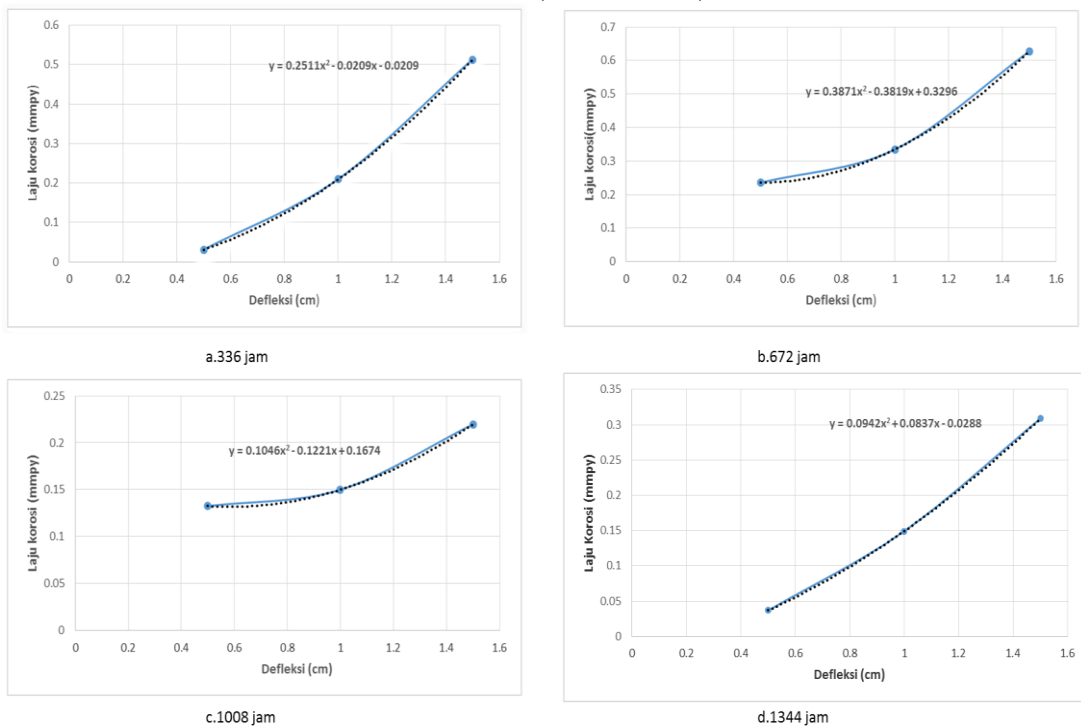
Bahwa gambar 4 menunjukkan laju korosi (mmpy) terhadap defleksi (cm) pada waktu paparan yang sama untuk sampel uji berada pada lingkungan kondisi asam (larutan aquades, asam asetat dan amoniak), dan gambar 5 menunjukkan laju korosi (mmpy) terhadap defleksi (cm) pada waktu paparan yang sama untuk sampel uji berada pada lingkungan kondisi basa (larutan air laut dan amoniak).

Gambar 6 menunjukkan laju korosi (mmpy) terhadap waktu paparan (jam) di lingkungan kondisi basa (larutan air laut, amoniak), dan gambar 7 menunjukkan laju korosi (mmpy) terhadap waktu paparan (jam) di lingkungan kondisi asam (larutan aquades, asam asetat, dan amoniak). Gambar 8

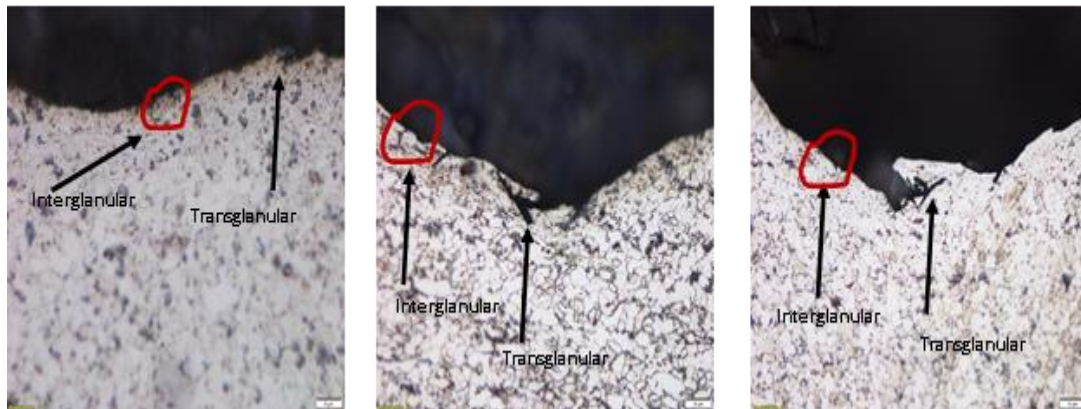
menunjukkan hasil uji mikrostruktur sampel uji berada pada lingkungan kondisi basa (larutan air laut dan amoniak), dan gambar 8 menunjukkan hasil uji mikrostruktur lingkungan kondisi asam (larutan aquades, asam asetat dan amoniak).



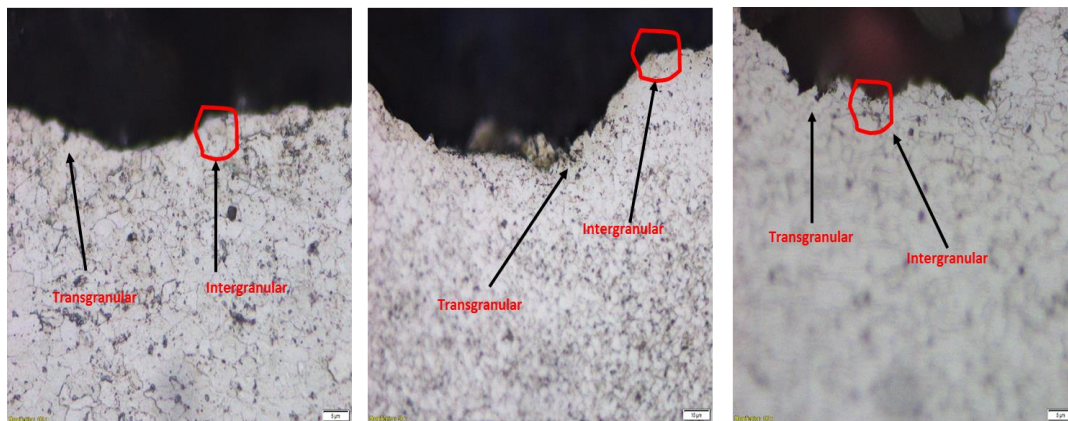
Gambar 4. Laju Korosi (mmpy) terhadap defleksi (cm) di lingkungan larutan aquades, asam asetat, dan amoniak (kondisi asam).



Gambar 5. Laju Korosi (mmpy) terhadap defleksi (cm) di lingkungan larutan air laut dan amoniak (kondisi basa).



Gambar 6. Hasil uji mikrostruktur untuk sampel uji kondisi basa (laruran air laut dan amoniak) terjadi korosi retak tegangan transgranular dan intergranular.



Gambar 7. Hasil uji mikrostruktur untuk sampel uji kondisi asam (laruran aquades, asam asetat dan amoniak) terjadi korosi retak tegangan transgranular dan intergranular.

2.3. Persamaan

Untuk membuat rumah sampel (holder) uji koros diperlukan lembaran baja berupa pelat atau flat extruded section yang berpenampang lintang persegi panjang, dan 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, dan besarnya regangan dapat diatur dengan memberikan lendutan melalui skrup yang digerakkan dengan ulir seperti pada gambar (1.b) untuk menentukan defleksi y . Dan penelitian ini menggunakan sampel uji korosi berukuran panjang 12,5 cm, lebar 2 cm dan tebalnya 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 (gambar 2) ditekuk seperti pada gambar (1.c) dimasukkan kedalam ruang chamber uji korosi (gambar 3) dengan 2 variasi defleksi seperti pada gambar (1.c) (Nendi Suhendi Syafei, 2016). Sampel uji pelat baja karbon API 5L-X65 yang berada pada ruang chamber seperti gambar 3 diisi gas CO_2 hingga jenuh, kemudian diisi gas H_2S sampai jenuh selama 10 menit (dalam selang 2 hari sekali)^[18].

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, dan kemampuan/kekuatan tarik maksimum ini umumnya disebut "Ultimate Tensile Strength (UTS)". Perubahan panjang dalam kurva disebut sebagai regangan teknik (ϵ), yang didefinisikan sebagai perubahan panjang yang terjadi akibat perubahan statik (ΔL) terhadap panjang batang mula-mula (L_0). Tegangan yang dihasilkan pada proses ini disebut dengan tegangan teknik (σ), dimana

didefinisikan sebagai nilai pembebanan yang terjadi (F) pada suatu luas penampang awal (A0) seperti gambar 4. Tegangan normal tersebut akibat beban tekan statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$\sigma = F/A_0 \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

σ = Tegangan normal akibat beban tarik statik (N/mm²) F = Beban tarik (N).

A₀ = Luas penampang spesimen mula-mula (mm²).

Regangan akibat beban tarik statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$\varepsilon = \Delta L/L \dots\dots\dots(2)$$

dengan:

$\Delta L = L - L_0$, ε = Regangan akibat beban tarik statik.

L = Perubahan panjang spesimen akibat beban tarik (mm).

L₀ = Panjang spesimen mula-mula (mm).

Dimensi spesimen sampel yang digunakan dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan, tetapi diperkirakan dimensinya secara proposional. Perhitungan regangan elastik seperti pada persamaan berikut :

$$\sigma = 6 E t y/H^2 \dots\dots\dots(3)^{[2]}$$

dengan:

σ = Tegangan tarik maksimum (N/m²).

E = modulus elastisitas (N/m²).

t = ketebalan spesimen (mm)

y = defleksi maksimum (mm).

H= 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 inci), panjang 127-254 mm (5 - 10 inci) dan ketebalan spesimen uji bahan yang digunakan seperti pada gambar 2.

3. Kesimpulan

1. Berdasarkan data tabel 2, tabel 3, gambar 4, dan gambar 5 bahwa sampel uji di lingkungan asam (larutan aquades, asam asetat, amoniak) maupun di lingkungan basa (larutan air laut, amoniak) bahwa laju korosinya untuk waktu paparan yang sama akan semakin besar akibat defleksi yang diberikan semakin besar.
2. Berdasarkan hasil uji mikrostruktur bahwa sampel uji berada di lingkungan asam (Larutan aquades, asam asetat, amoniak) maupun di lingkungan basa (larutan air laut, amoniak) terjadi korosi retak regangan transgranular dan korosi retak tegangan intergranular seperti pada gambar 6 dan gambar 7.

Ucapan Terima Kasih

1. Saya ucapkan terima kasih atas bantuannya serta masukkan kepada rekan-rekan dosen dan tendik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran.
2. Ucapan terima kasih bahwa penelitian ini didanai dari hibah internal Unpad ((HIU) dengan no kontrak **872/UN6.3.1/LT/2017** dan no kontrak **2385/UN6.D/KS/2018** .

Daftar Pustaka

[1]. ASTM G1– 93. *Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion*.
[2]. Agus Solehudin, Korosi Retak Tegang (SCC) Baja Karbon AISI 1010 dalam Lingkungan NaCl-H₂O-H₂S.(<http://docplayer.info/42197006-Korosi-retak-tegang-scc-baja-karbon-aisi-1010-dalam-lingkungan-nacl-h-2-o-h-2-s.html>).

- [3]. Callister, D. William. 2007. *Materials Science an Engineering: an Intruduction 7th ed.* United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [4]. DESY NUR ROCHMAH - FARIED LATIEF - TUTI SUSILAWATI - NORMAN SYAKIR - FITRILAWATI, “ PENGARUH SUHU TERHADAP KARAKTERISTIK PROTEKSI KOROSI BAHAN POLI (TMSPMA) PADA PERMUKAAN BAJA KARBON”, Proseding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya, 19 November 2016.
- [5]. Heri Jodi, Karakterisasi Korosi Baja SS-430 pada lingkungan NaCl, Pusat Teknonologi Bahan Industri Nuklir – BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong-Tangerang Selatan,(<http://widyariset.pusbindiklat.lipi.go.id/index.php/widyariset/article/...>, 28 februari 2018).
- [6]. Fajar Eka Putrandono - Athanasius Priharyoto Bayuseno, “ANALISIS STRESS CORROSION CRACKING AISI C20500 DENGAN VARIASI PEMBEBANAN PADA MEDIA KOROSI AIR”, Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 2, No. 2, Tahun 2014.
- [7]. Nendi Suhendi-Sri Suryaningsih-Otong Nurhilal. (Nopember 2014), “Kajian Korosi Retak Tegangan akibat sweet gas (H₂S dan CO₂) pada Pipa Baja Karbon”, FMIPA Universitas Padjadjaran.
- [8]. Nendi Suhendi Syafei, Sri Suyaningsih, Otong Nurhilal, Febi Luthfiani.(Ed. Nov 2015), “Analisa Regangan (Stress) Pada Pipa Baja Karbon API 5L GradeB Terhadap Laju Korosi Dalam Larutan NaCl dan Asam Asetat”. Jurnal Fisika Indonesia No. 56 Vol. XIX ISSN 1410-2994.
- [9]. Nendi Suhendi Syafei-Zaida-Liu Kin Men.(Desember 2016). “Kajian Korosi Retak Tegangan akibat sweet gas (H₂S dan CO₂) 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.
- [10]. Nendi Suhendi Syafei - Darmawan Hidayat - Bernard Y Tumbelaka – Zaida - Liu Kin Men. (4 Februari 2017), “Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon API 5L-X65 dengan Metoda Pembebanan Tiga Titik pada Lingkungan Gas H₂S Kondisi Jenuh CO₂ dalam Larutan Asam Asetat”, Prosiding Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri, ITN Malang, hal. D12.1-D12.5, ISSN 2085-4218.
- [11]. Nendi Suhendi Syafei, Darmawan Hidayat, Dessy Novita, Bernard Y Tumbelaka, Pengujian Kekerasan dan Uji Tarik Untuk Menentukan Koefisien Pengerasan *n* Suatu Bahan API 5L-X65, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXXI HFI Jateng & DIY, Yogyakarta 18 Maret 2017 ISSN : 0853-0823.
- [12]. Nendi Suhendi Syafei-Darmawan Hidayat-Bernard Y Tumbelaka-Muhammad taufik. (9 mei 2017), “Karakteristik Pipa Baja Karbon API 5L-X65 dengan Metoda Pembebanan Tiga Titik pada Lingkungan Gas H₂S Kondisi Jenuh CO₂ dalam Larutan Asam Asetat”, Prosiding Seminar Nasional Energi dan Teknologi (Seinergi) Unisma Bekasi, hal.33-39, ISSN:2527-3108.
- [13]. Nendi Suhendi Syafei-Darmawan Hidayat-Bernard Y Tumbelaka-Liu Kin Men, Analisa fenomena korosi pelat pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 250 ml asam asetat dan 4750 aquades pada kondisi gas CO₂ dan H₂S jenuh pada suhu ruang, Eksakta Vol. 18 N0.2,Oktober 2017, halaman 113-120,E-ISSN:2549-7464, P-ISSN : 1411-3724.
- [14]. Nendi Suhendi Syafei, Darmawan Hidayat, Bernard Y Tumbelaka, Liu Kin Men, Laju Korosi papa pipa baja karbon API 5L-X65 dengan metoda tiga titik pembebanan pada larutan asam asetat dengan diisi gas CO₂ dan H₂S dalam keadaan jenuh, Simposium Nasional RAPI XVI – 2017 FT UMS, ISSN 1412-9612, Surakarta 13 desember 2017.
- [15]. Nendi Suhendi Syafei, Darmawan Hidayat, Liu Kin Men, Setianto, Analisa korosi pada pipa baja karbon API 5L-X65 dengan pembebanan tiga titik pada lingkungan gas H₂S dan CO₂ jenuh di dalam larutan asam asetat, Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika Vol. 02, No. 01 (2018) 37–44 Departemen Fisika FMIPA Universitas Padjadjaran, ISSN: 2549-0516.
- [16]. Nendi Suhendi Syafei, Darmawan Hidayat, Bernard Y Tumbelaka, Liu Kin Men, Analisa korosi retak tegangsn pada pipa baja karbon API 5L-X65 dalam larutan 7900 ml air laut dan 100 ml amoniak dengan diisi gas CO₂ dan H₂S dalam keadaan jenuh, Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Indonesia , ISSN: 2085-4218, ITN Malang 3 Februari 2018.
- [17]. Nendi Suhendi Syafei, Darmawan Hidayat, Bernard Y. Tumbelaka, Liu Kin Men,Analisis Korosi Retak Tegangan pada Pipa Baja Karbon dalam Larutan Asam dan Sweet Gas”, JTERA -

- Jurnal Teknologi Rekayasa, Vol. 3, No. 1, Juni 2018, Hal. 137-144, p-ISSN 2548-737X, e-ISSN 2548-8678, DOI: 10.31544/jtera.v3.i1.2018.137-144.
- [18]. Nendi Suhendi Syafei , Darmawan Hidayat , Emilliano, Liu Kin Men, “Analysis Cracking Corrosion on Carbon Steel Pipes API 5LX65 in Solution 7700 ml Aquades, 250 ml Acetic Acid and 50 ml Ammonia with Gas CO₂ and H₂S in Saturation Condition, EKSAKTA Vol. 19 Issue 2/30 October 2018, E-ISSN : 2549-7464, P-ISSN : 1411-3724.
- [19]. O. I. Zvirko , S. F. Savula , V. M. Tsependa , G. Gabetta , H. M. Nykyforchyn. (2016), “Stress corrosion cracking of gas pipeline steels of different strength”, 21st European Conference on Fracture, ECF21, 20-24 June 2016, Catania, Italy. Procedia Structural Integrity 2 509–516.
- [20]. Martin Monnota, Ricardo P. Nogueira, Virginie Roche, Grégory Berthomé, Eric Chauveau, Rafael Estevez, Marc Mantel.(2017). “Sulfide stress corrosion study of a super martensitic stainless steel in H₂S sour environments: Metallic sulfides formation and hydrogen embrittlement”, Applied Surface Science 394 132–141.
- [21]. Toto Rusianto, “ PERUBAHAN LAJU KOROSI AKIBAT TEGANGAN DALAM DENGAN METODE C-RING”, JURNAL TEKNOLOGI TECHNOSCIENTIA Vol. 2 No. 1 Agustus 2009, hal. 134-142, ISSN: 1979-8415.