

Analisis Kegagalan Daerah Lasan Pipa Stainless Steel Sebagai Media Reboiler Pabrik Pupuk

Husaini^{1,a*}, Mirza^{1,b}, Masri Ali^{1,c} dan M. Nizar Mahmud^{1,d}

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Darussalam,
Banda Aceh, Indonesia

Email: ^ahusainiftm@yahoo.com, ^bmirza-m@yahoo.com, ^cmasriali@yahoo.com, ^dnizarmachmud@gmail.com

Abstrak

Pipa *stainless steel* sebagai pipa sambungan untuk media *reboiler* pada pabrik pupuk mempunyai peranan penting dalam proses pembentukan *urea slurry*, dimana pipanya bertekanan sekitar 1,7 MPa dan temperatur 120-130 °C. *Reboiler* berfungsi merubah *fase liquid* menjadi *fase gas* yang mengalirkan larutan *urea slurry* (NH₃ dan CO₂). Pipa *reboiler* mengalami kebocoran pada daerah lasan (HAZ), menyebabkan proses pabrik terhenti. Faktor penyebab terjadinya kebocoran pada pipa *reboiler* karena adanya perambatan retak yang menembus dinding pipa. Setelah dilakukan pemeriksaan visual terdapat retak halus sudah menjalar pada daerah HAZ disebabkan oleh adanya porositas dari hasil lasan. Pengelasan yang dilakukan pada penyambungan pipa ini adalah pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). Material pipa *stainless steel* yang mengalami kebocoran ini merupakan material SUS 410 (ASTM A276) yang berbentuk batang berongga. Dari perhitungan eksak pendekatan mekanika retakan diperoleh bahwa besar *Faktor Intensitas Tegangan*, $K_I = 1774,3$ MPa yang terjadi sekitar retakan jauh lebih besar dari nilai *ketangguhan retakan materialnya*, $K_{IC} = 499,4$ MPa ($K_I >> K_{IC}$), sehingga terjadinya perambatan retak yang menyebabkan kebocoran pada pipanya. Dari hasil analisa kegagalan yang dilakukan dapat direkomendasikan bahwa; pertama, pipa *reboiler* memiliki ketebalan, $t = 2.5$ mm, sebaiknya digantikan pipa dengan ketebalan, $t = 3$ mm, dan yang ke dua, material pipa *reboiler* SUS 410 sebaiknya diganti dengan material SUS 316 (ASTM A 312) yang lebih baik sifat ketahanan korosi dan mekaniknya.

Kata kunci : Analisa Kegagalan, *Stainless Steel*, Perambatan Retak, *Reboiler*, Daerah Lasan

Pendahuluan

Dalam suatu pabrik pupuk banyak komponen mesin yang digunakan dalam pengopera-siannya untuk memperoleh hasil yg diinginkan. Salah satu komponen mesin yang digunakan pada pabrik pupuk PT. PIM Lhok Seumawe Aceh yaitu *Reboiler* yang merupakan suatu peralatan penukar kalor yang berfungsi untuk merubah fase liquid menjadi fase gas. Perlatan yang digunakan dalam proses ini adalah *High Pressure Decomposer* (*HPD*) yang berguna untuk melancarkan proses penguraian untuk memurnikan urea pada tekanan tinggi. *HPD* merupakan suatu *equipment* yang terletak pada unit Urea-1 yang berfungsi sebagai proses pemurnian *urea slurry* (bubur urea) dari hasil campuran fluida NH₃ dan CO₂ yang dikirim dari reaktor yang beoperasi pada tekanan 1,7 MPa dengan temperatur 120 s/d 130 °C. Fungsi dan cara kerja *HPD* adalah untuk menurunkan tekanan dan temperatur tinggi untuk memperoleh larutan urea yang lebih sempurna, sehingga *HPD* membantu-hukan panas yang diambil dari *reboiler* yang memiliki tekanan 12 kg/cm².

Pipa *stainless steel* adalah item instrumentasi yang melekat dengan line sirkulasi *urea slurry* (bubur urea) pada *High Pressure Decomposer*.

Fungsi pipa *stainless steel* ini sangat erat hubungannya dalam menjaga larutan urea dari hasil campuran NH₃ dan CO₂ pada *level transmitter* yang ada di *HPD*. Dimana pada saat level *HPD* sudah mencapai pada tekanan 17 kg/cm²G maka pipa *stainless steel* akan memberikan sensor secara otomatis untuk dapat membuka *LCV* (*level control valve*) agar larutan di *HPD* dapat mengalir ke *LPD* (*Low Pressure Decomposer*) [1,2].

Tanggal 23 Desember 2011 terjadi kasus pada pipa *stainless steel* tersebut yang mengalami kegagalan yaitu berupa kebocoran (retak tembus). Dari hasil pengamatan, diduga bahwa awal terjadinya kebocoran pada pipa *stainless steel* di daerah lasan ini adalah akibat terbentuknya retak halus pada daerah lasan akibat dari pengelasan itu sendiri. Penjalaran retak pada pipa *stainless steel* ini dapat diinisiasi oleh adanya tegangan, lingkungan yang korosif, dan memiliki tekanan/temperatur yang tinggi pada pipa. Dari akumulasi ini semua, maka dapat menyebabkan beban mekanik menjadi lebih besar pada suatu material, dan akibatnya akan terbentuk cacat awal berupa retak halus (*fine crack*) pada suatu material [3].

Dalam penelitian ini, analisa kegagalan dilakukan untuk menemukan dan menjelaskan penyebab kegagalan pada pipa stainless steel pada daerah lasan yang mempunyai tekanan 1,7 MPa dan temperatur 130 °C. Sehingga hasil yang diperoleh dapat diberikan rekomendasi agar tidak terjadi kasus kegagalan yang sama dikemudian hari.

Tinjauan Pustaka

Stress Corrosion Cracking (SCC) adalah retakan korosi tegangan yaitu keretakan pada suatu logam yang mengalami tegangan dan media korosif secara bersamaan. SCC pada dasarnya terjadi karena adanya tiga kondisi yang saling berkaitan, yakni adanya tegangan, lingkungan yang korosif, dan memiliki tekanan/temperatur yang tinggi. Sehingga dari interaksi ini dapat menyebabkan sifat mekanik akan menurun pada permukaan suatu material, dan akibatnya akan terbentuk retak halus berupa korosi sumuran (*pitting corrosion*) yang merupakan awal dari terbentuknya *crack* (retak) pada material. Sering dijumpai dilapangan bahwa kejadian retak korosi tegangan sering terjadi pada peralatan perpipaan pada industri minyak dan gas [2]. Gambar 1 menunjukkan pipa *line transmitter* yang merupakan pipa *stainless steel* yang telah bocor. Pipa tersebut mengalami kebocoran (retak tembus) akibat penjalaran retak yang disebabkan oleh adanya tegangan, media korosif, temperatur dan tekanan tinggi sehingga menembus dinding pipa.



Gambar 1. Pipa stainless steel yang bocor.
[Sumber: PT. PIM- Aceh Lhokseumawe]

Jadi SCC merupakan paduan antara fenomena reaksi elektrokimia dan mekanika retakan pada logam. Retakan bisa terjadi karena tegangan yang berlebih pada material, dan juga karena memang sudah ada retak karena cacat produksi, atau yang paling umum terjadi pada SCC adalah penggetasan material karena reaksi korosi pada logam.

Menurut riset, laju retakan pada SCC berkisar antara **10⁻³** hingga **10 mm/h**, bergantung pada jenis paduan logam, kondisi kerja dan lingkungan. Yang paling merugikan dari SCC adalah daya dukung material yang menurun drastis dan juga keberadaan retakan yang sulit dideteksi, sehingga kegagalan sering tiba-tiba terjadi pada tegangan operasi yang seharusnya aman bagi material.

Ada bentuk yang khas dari retakan yang disebabkan oleh SCC, selain penampilannya merupakan bentuk retakan getas, seringkali bentuknya bercabang menyerupai anak sungai walaupun tidak semua SCC menghasilkan bentuk retakan seperti itu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

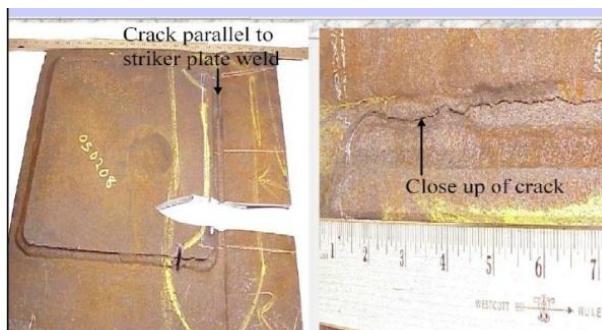
Jadi jika ditemui bentuk retakan khas seperti di atas, maka dapat disimpulkan langsung bahwa ada SCC yang terjadi pada material tersebut dan bukan hanya retakan yang biasa.



Gambar 2. Bentuk retakan pada SCC. [Sumber : PT. PIM- Aceh Lhok Seumawe].

Retakan pada SCC bisa bersifat *intergranular* (tumbuh mengikuti batas butir), biasa terjadi pada lingkungan dengan pH tinggi atau *transgranular* (tumbuh melintasi batas butir), biasa terjadi pada lingkungan dengan pH netral. SCC bisa menyerang logam-logam yang didisain untuk tahan karat seperti *stainless steel*, atau bahkan aluminium yang bekerja pada temperatur tinggi atau lingkungan korosif (air laut) [1,4, 5, 6, 7, 11].

Gambar 3 menunjukkan proses perambatan retak sekitar daerah lasan [8].



Gambar 3. Penjalaran retak yang terjadi di sekitar lasan [8].

Sifat mekanik dan ketangguhan retak dari material pipa stainless steel ASTM A 276 seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat mekanik dan ketangguhan retak material ASTM A 276 [4].

Ultimate tensile strength, σ_{TS}	95 (Ksi)
Yield strength, σ_{ys}	50 (Ksi)
Elongation, E	35 (%)
Hardness, Hv	241 (Hv)
Ketangguhan retak, K_{IC} **)	499,4 (Mpa)

Metodologi

Metode penyelidikan yang dilakukan disini antara lain meliputi; bukti dokumentasi, kondisi operasi/observasi lapangan, material handling, wawancara dengan operator, dan analisa retakan dengan pendekatan eksak.

Beberapa langkah observasi lapangan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Pengamatan dilakukan pada daerah kebocoran seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Tanda anak panah menunjukkan area kegagalan pipa stainless steel.

- 2) Pengamatan dilakukan secara kasat mata, kemudian diambil beberapa foto dari beberapa sudut pandang. Hal ini biasanya sangat membantu untuk identifikasi setiap sampel pada lokasi dan orientasi pengambilan foto. Spesifikasi material pipa stainless steel diperoleh dari bukti dokumentasi. [8].

Gambar 5 menunjukkan bagian pipa stainless steel sebagai pipa sambungan untuk media reboiler yang mengalami kegagalan.

Potongan pipa stainless steel yang terdapat kebocoran akibat penjalaran ratak sehingga menembus dinding pipa seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Bagian potongan inilah yang

selanjutnya akan dianalisa penyebab terjadinya kegagalan.



Gambar 5. Bagian pipa stainless steel yang akan dianalisa setelah dilakukan pemotongan.

- 3) Untuk mengetahui komposisi kimia material pipa stainless steel yang mengalami kebocoran dilakukan dengan menggunakan alat *alloy analyzer test X-Met* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Alat uji komposisi kimia X-Met.
[Sumber: PT. PIM- Aceh Lhokseumawe].

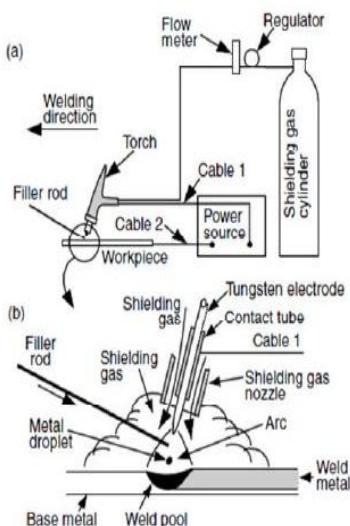
Hasil pemeriksaan komposisi kimia untuk material stainless steel SUS 410 (ASTM 276) dan SUS 316 (ASTM312) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Kimia Material Stainless steel SUS 410 dan SUS 316 [8].

Komposisi kimia (%)	SUS 410 (ASTM A276)	SUS 316 (ASTM A312)
<i>C</i>	0.9	0.08
<i>Mn</i>	1.0	2.0
<i>P</i>	0.04	0.04
<i>S</i>	0.03	0.03
<i>Cr</i>	18	18
<i>Ni</i>	0.0	14
<i>Mo</i>	0.7	3.0
<i>Si</i>	1.0	1.0
<i>N</i>	0.0	0.0
<i>Lainnya</i>	0.0	0.0

[Sumber: PT. PIM- Aceh Lhok Seumawe]

4) Cacat lasan pada bagian sambungan pipa akan diamati dan akan dibahas lebih lanjut pada bagian hasil dan pembahasan. Dari observasi dan wawancara dengan operator dan bukti dokumentasi diperoleh infomasi bahwa jenis pengelasan yang digunakan pada pipa stainless steel ini adalah type GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) yang merupakan proses pengelasan busur api listrik elektroda tidak terumpan, dengan menggunakan gas mulia sebagai pelindung proses (Gambar 7) [10].



Gambar 7. (a) Gas Tungsten Arc Welding,
(b) Proses Lasan GTAW [10].

Hasil dan Pembahasan

Pipa stainless steel SUS 410 (ASTM A276) yang mengalami kegagalan adalah suatu item instrumentasi yang bekerja pada tekanan (17 kg/cm^2) dan temperatur 130°C . Dimana kegagalan yang dialami berupa kebocoran (*leak*) yang sudah parah pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang terjadi pada tanggal 23 Desember 2011. Kebocoran ini diinisiasi oleh adanya retak halus yang sudah menjalar pada daerah HAZ dan menembus dinding pipa yang disebabkan karena adanya tekanan fluida di dalam pipa dan fluida ini memiliki sifat korosif sehingga retak menembus dinding pipa. Disini terlihat bahwa ketebalan pipa belum begitu sesuai dengan lingkungan operasi yang ada, sehingga perlu ditinjau ulang.

A. Inspeksi Visual

Dari pemeriksaan visual kita dapatkan material pipa stainless steel SUS 410 mengalami kebocoran pada daerah HAZ dan juga telah mengalami penipisan (*thinning*) yang cukup parah disebabkan

oleh adanya retak halus seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Lokasi yang mengalami kebocoran sekitar lasan (ditunjukkan oleh anak panah).

B. Pemeriksaan Pipa Setelah di Potong

Pengamatan struktur dalam pipa setelah dipotong seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Dalam pemeriksaan yang dilakukan terlihat bahwa pada material *spool* bagian dalam mengalami perambatan retak halus pada daerah HAZ.

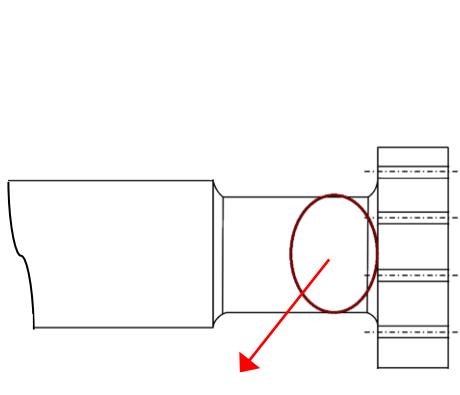


Gambar 9. Anak panah menunjukkan retak tembus dan retak halus pada daerah HAZ pada bagian dalam dari pipa.

Hal ini terjadi akibat proses pengelasan yang dilakukan pada saat *repair* (perbaikan) sebelumnya yang tidak baik, karena kawat las (elektroda) yang digunakan tidak sama dengan logam dasar (*base metal*). Hal ini didukung oleh bukti dari wawancara dengan operator lapangan dan bukti dokumentasi. Oleh karena itu, maka logam las terlihat tidak menyatu secara sempurna dengan logam induknya, sehingga menimbulkan cacat halus berupa retakan halus (*fine crack*).

C. Mekanisme perambatan retak

Gambar 10 merupakan gambar sketsa dari bagian pipa yang mengalami kebocoran pada daerah yang ditandai dengan lingkaran. Pipa berbentuk batang berongga yang didalamnya dialiri fluida *urea slurry* (NH_3 dan CO_2) yang bersifat korosif.



Gambar 10. Daerah kegagalan (kebocoran) pipa (ditandai dengan lingkaran).

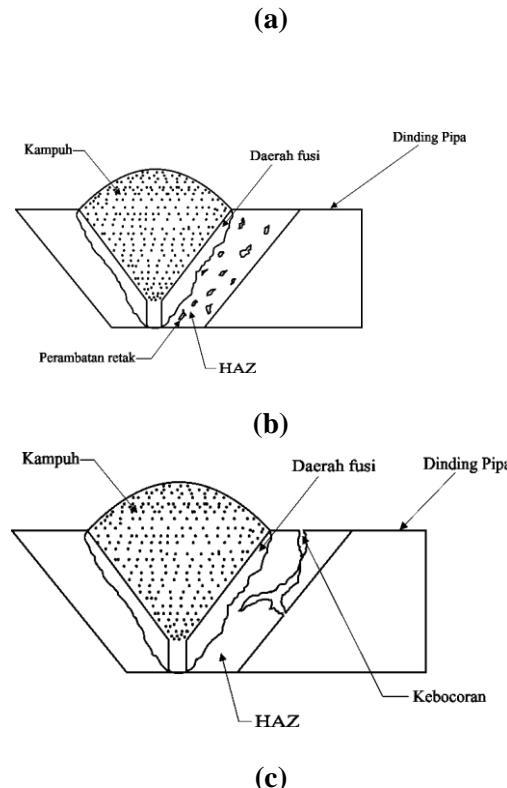
Mekanisme perambatan retak yang terjadi digambarkan secara sketsa seperti ditunjukkan pada Gambar 13.

Pada Gambar 13 (a) diperlihatkan kondisi awal setelah pengelasan, dimana disini terlihat adanya porositas (cacat/retak halus) dan keadaan ini sangat umum terjadi pada suatu pengelasan. Tidak ada pengelasan yang sempurna yang tidak menimbulkan cacat. Cacat las ini harus dieleminir seminimal mungkin, sehingga cacatnya masih dalam batas-batas yang dapat ditolerir. Maka pengelasan harus dilakukan oleh *welder* yang bersertifikasi baik.

Kemudian, terjadi inisiasi retakan akibat bertambahnya beban tegangan, setelah komponenya beroperasi dalam jangka waktu tertentu yang relatif lama. Sehingga retakan halus tadi makin lama makin merambat seperti ditunjukkan pada Gambar 13 (b).

Selanjutnya, dengan bertambahnya waktu oprasi, maka penjalaran retak terus berlangsung sehingga beberapa retakan sudah menyatu hingga menjadi retakan yang lebih besar dan akhirnya merambat hingga tembus dinding pipa.

Kondisi terakhir inilah dikatakan pipa sudah bocor atau sudah terjadi kegagalan. Secara umum proses perambatan retak terjadi pada kasus ini menjadi lebih cepat lagi, karena adanya pengaruh dari *stress corrosion cracking* (retak korosi tegangan).

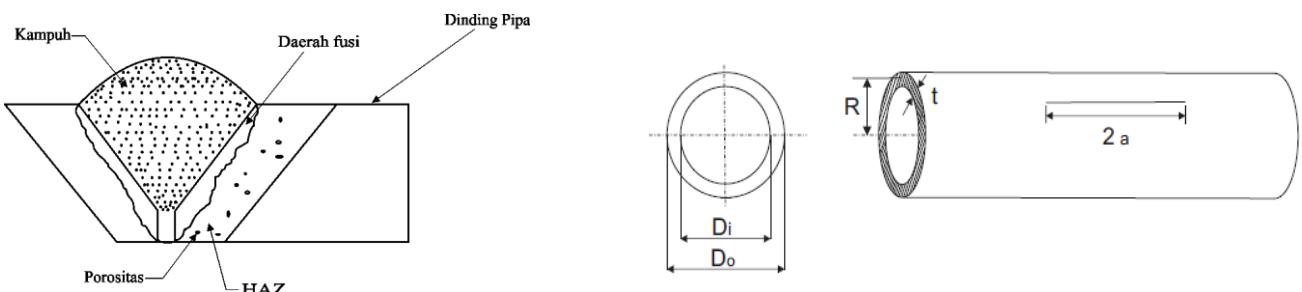


Gambar 13. Sketsa dari proses perambatan retak pada cacat las. (a) setelah pengelasan ada porositas, (b) terjadi inisiasi retakan, (c) beberapa retak halus sudah menyatu hingga retak merambat tembus dinding pipa.

D. Analisa Mekanika Retakan

Sebagaimana diketahui bahwa retak halus yang terdapat pada material akan merambat bila material tersebut menerima beban tegangan, sehingga timbul faktor intensitas tegangan, K_I di sekitar ujung retaknya. Apabila K_I ini lebih besar dari ketangguhan retak dari materialnya sendiri (*fracture toughness*), K_{IC} , maka perambatan retak (*crack propagation*) akan terjadi [1].

Berdasarkan dari pemahaman inilah, maka pada kasus ini akan dihitung besar faktor intensitas tegangan yang terjadi pada dinding pipa. Diasumsikan bahwa pipa stainless steel yang akan kita cari besaran K_I adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 14. Dengan menggunakan pers. (1), maka K_I dapat dicari sebagai berikut.



Gambar 14. Asumsi pipa stainless steel
[Sumber: Anderson T.L, 2006].

$$K_1 = \sigma_h \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

dimana,

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \text{Hoop stress (MPa)} \\ a &= \text{Panjang retak (m)} \end{aligned}$$

$$K_1 = \sigma_h \sqrt{\pi \cdot a} = 1774,3 \text{ MPa}$$

Setelah dilakukan perhitungan seperti diatas, maka diperoleh harga $K_1 = 1774,3$ MPa.

Terlihat bahwa, harga K_1 ini lebih besar dari pada harga $K_{IC} = 499,4$ MPa (lihat Tabel 1).

Oleh karena itu, maka dapat diambil kesimpulan bahwa akan terjadi perambatan retak karena harga $(K_1) \gg (K_{IC})$. Hal ini sesuai dengan uraian diatas [1].

Kesimpulan

Dari analisa dan perhitungan yang dilakukan seperti yang diuraikan diatas, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Karena proses pengelasan yang tidak baik pada pipa *stainless steel* SUS 410 (ASTM A 276), maka timbul porositas (retak halus) pada daerah lasan.
2. Retak halus yang terdapat pada daerah lasan makin lama makin merambat sesuai dengan lamanya waktu operasi, sehingga retak membesar dan menembus dinding pipa (pipa bocor).
3. Dari hasil perhitungan dengan pendekatan Mekanika Retakan diperoleh bahwa faktor intensitas tegangan yang terjadi (K_I) lebih besar dari pada (K_{IC}) . Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses perambatan retak memang terjadi.
4. Proses perambatan retak makin cepat terjadi, karena dipengaruhi juga oleh kondisi *stress corrosion cracking*.

Rekomendasi

Berdasarkan kesimpulan diatas, maka rekomendasi yang dapat diberikan adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan data yang diperoleh dari pemeriksaan, pipa hanya memiliki ketebalan (t) = 2,5 mm. Maka untuk mengantisipasi tidak mudah terjadi kebocoran maka

direkomendasikan agar menggunakan pipa dengan ketebalan (t) lebih besar dari 3 mm.

2. Material pipa *stainless steel* SUS 410 (ASTM 276), sebaiknya diganti dengan material SUS 316 (ASTM 312), karena material ini lebih tahan terhadap korosi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. PIM Lhokseumawe yang telah memberi fasilitas kepada para peniliti untuk mengambil beberapa data, diskusi dan observasi lapangan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Referensi

- [1]. Anderson, T.L., Fracture Mechanic: Fundamental and Applications. Third Edition, CRC Press-Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [2]. Mirza, Laporan-Analisa Kegagalan Heat Exchanger, PT. Pupuk Iskandar Muda - Lhokseumawe, Prov. Aceh, 2010.
- [3]. Zaki, Laporan Proses Kerja High Pressure Decomposer (HPD), PT. Pupuk Iskandar Muda, 2011.
- [4]. Soepomo, Analisa perambatan retak pada pipa bawah laut, T. Mesin, Institut Teknologi Surabaya, 2003.
- [5]. Jones R.H. (ed.), Stress Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation, ASM International, Metals Park, OH, 1992.
- [6]. Nelson, H. G, and Williams, D.P., Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, NACE International, Houston, TX, (1977) 390-404
- [7]. Hudak, S.J., and Page, R.A., Analysis of Oxide Wedging during Environment Assisted Crack Growth, Corrosion, 39 (1983) 285-290.
- [8]. Agustinus, "Analisa penyebab kegagalan retak pada sintesa reaktor urea" PT. PIM , 2011.
- [9]. Swati Ghosh, 2009 " fracture toughness of ASTM A 276 Austenitic stainless steel".
- [10]. Alghazali S. "Metalurgi Pengelasan" Institut Teknologi Bandung (ITB), Desember 2009.
- [11]. Nofrizal, *Stress cracking corrosion*, PT. PIM, 2010.