

ANALISIS KEGAGALAN PIPA PECAH 2 INCH ANTARA KO DRUM DAN BURN PIT

Akhyar Ibrahim
E-mail: akhyaris@yahoo.com
Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe

No. INDIK	: 01-000691/09
DIDAFTAR TGL	: 06-09-09/621-05
BERASAL DARI	: Sumbangan '08

Analisa kegagalan dilakukan pada pipa penyalur amonia 2 inchi yang pecah, yang digunakan untuk memindahkan cairan amonia dari tangki KO tahap pertama ke tangki SMS (Steamer Tank) dan *Burn pit* di sebuah industri pupuk. Berdasarkan informasi yang dikumpulkan dari lapangan, Inspeksi dan pengujian laboratorium, studi literatur maka dapat disimpulkan bahwa pipa ini pecah karena adanya tekanan dalam pipa yang tinggi dan amonia turut mempercepat penjalaran retak pada cacat lasan berbentuk undercut pada permukaan dalam pipa yang mengakibatkan sepanjang permukaan pipa pecah. Pipa 2 inchi API 5L Sch 40 ini dibuat dengan proses *seamless* yang memiliki kelemahan struktur kristalografis dalam arah horizontal yang mengakibatkan pipa pecah dalam arah tersebut. Kombinasi cacat mikro, akibat mekanis dan metalurgis ini besar kemungkinan menjadi inisiasi retak. Pipa yang bertakik (ada inisiasi retak) tidak aman terhadap tekanan tinggi; dan demikian sebaliknya. Karena itu, direkomendasikan untuk memantau pengelasan secara sempurna atau mengganti material yang dengan grade yang lebih tinggi serta program perawatan harus diterapkan dengan baik.

Kata kunci: Pipa, inspeksi, kegagalan, undercut

PENDAHULUAN

Sistem perpipaan pada instalasi atau konstruksi pipa pada suatu pabrik atau kilang selalu memainkan peranan penting sebagai alat transmisi atau transportasi aliran fluida baik berupa gas atau cairan. Karena itu, desain sistem struktur perpipaan gas cair harus diperhatikan tiga faktor penting: seleksi terhadap material, analisis kekuatan struktur dan pelaksanaan instalasi. Dengan melaksanakan ketiga faktor itu diharapkan kegagalan komponen selama operasi dapat dicegah sejak dini.

Namun demikian, sebuah perusahaan petro kimia di Indonesia harus dilakukan shutdown secara tiba-tiba akibat kegagalan suatu instalasi pipanya. Sebuah pipa penyalur amonia dari *KO drum* (Knock Out Drum) ke *SMS Tank* (Steamer Tank) dan ke *Burn Pit* telah dilakukan pergantian, tetapi tidak berapa lama kemudian pipa tersebut pecah dan menyemburkan api. Selama beroperasi, pipa 2 inchi yang dibuat secara *seamless* oleh **Sumitomo Pipe Cooperation (Jepang)** ini dipakai melayani beban (tekanan) yang sesuai dengan kriteria operasi, yaitu 8 kg/cm^2 dengan kapasitas alir $345 \text{ m}^3/\text{detik}$. Pada saat beroperasi dengan kondisi beban yang sesuai dengan ketentuan, instalasi pipa 2 inchi ini mengalami perpecahan pada daerah sambungan las. Pada posisi patah itu terutama

di bagian dalam pipa tampak ketidaksempurnaan lasan yaitu *excessive*, *root opening* dan *undercut*. Mekanisme perpatahan berlangsung sangat cepat sehingga mengakibatkan instalasi pipa ini, seperti pecah bambu, yang melahirkan ledakan dan kebakaran di sekitar lokasi kejadian. Kuat dugaan, pipa tersebut pecah dikarenakan tekanan yang tinggi pada saat amonia dialirkan ke *SMS tank* dan ke *Burn pit*, sementara katup yang ada di bagian penyaluran ke *burn pit* dalam kondisi tertutup, sehingga terjadilah pipa pecah. Akibat pecahnya pipa amoniak tersebut, maka proses produksi pupuk harus dihentikan untuk sementara waktu.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah (1) untuk menemukan mekanisme kegagalan pada pipa pecah, penarikan kesimpulan dan pemberian rekomendasi; dan (2) untuk memudahkan perbaikan dan perawatan instalasi pipa sehingga kegagalan pipa pecah itu dapat diprediksi dan diantisipasi sebelum operasi.

Untuk mengetahui akar penyebab kegagalan material atau pecahnya pipa, maka perlu dilakukan suatu penelitian dan analisis secara

seksama. Meskipun analisis kegagalan, merupakan suatu proses rumit yang melibatkan beberapa partisipan. Mereka sering bekerja seperti detektif yang mencoba menyelesaikan misteri. Untuk suatu sistem instalasi pemipaan bertekanan tinggi, dalam proses konstruksinya, digunakan proses pengelasan [8].

Efek pengelasan terhadap bahan dasar dan atau lasan biasanya akan timbul, antara lain tegangan sisa, perubahan sifat mekanik dan efek lokal lain seperti porositas, inklusi, retak, root opening, undercut dan lain-lain yang dapat dikategorikan sebagai cacat. Cacat-cacat lasan itu akan mudah diserang korosi lokal atau interkristalin apabila terekspose dalam fluida elektrolitik. Karena itu, cacat lasan pada pipa dengan atau tanpa serangan korosi dapat berakibat fatal dalam melayani fluida bertekanan tinggi di dalamnya. Tegangan yang bekerja pada pipa yang mengalami tekanan dalam (internal pressure) meliputi tegangan melingkar (circumferential or hoop stress), tegangan radial (radial stress) dan tegangan memanjang (longitudinal stress). Tekanan yang tinggi pada saat pemakaian juga berpengaruh pada pada material, apabila material yang di gunakan tidak sesuai dengan pemakaian maka pipa tersebut juga akan pecah. Untuk mengetahui tekanan Horizontal dan Vertikal dapat digunakan persamaan rumus berikut :

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad (1)$$

dan

$$\sigma_L = \frac{PD}{4t} \quad (2)$$

σ_H adalah tegangan melingkar (circumferential or hoop stress), σ_L adalah tegangan memanjang (longitudinal or axial stress), P adalah tekanan Mula-mula, D adalah diameter luar, dan adalah tebal dinding pipa

Distribusi tegangan pada ujung retak dalam pelat tipis untuk bahan elastik padat seperti dinding pipa, menurut Irwin dapat ditunjukkan bahwa tegangan setempat dekat retak tergantung pada hasil kali tegangan nominal σ dan akar setengah panjang retak. Untuk keadaan umum harus diperhitungkan harga parameter yang tergantung pada geometri benda uji dan retak (α) maka, faktor intensitas tegangan (K) dapat dihitung dari

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

Selanjutnya, nilai K_{IC} menggambarkan ketangguhan perpatahan dari suatu bahan tanpa mengiraukan panjang retak, geometri atau sistem pembebanan. K ini merupakan sifat bahan, sama halnya dengan kekuatan luluh. Persamaan dasar ketangguhan perpatahan dapat dimanfaatkan dalam desain struktur pipa, yaitu:

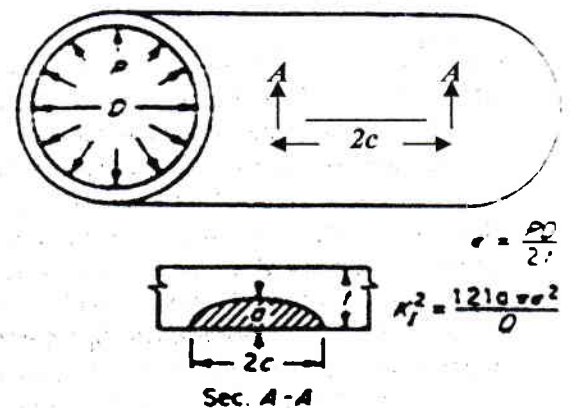
$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad (4)$$

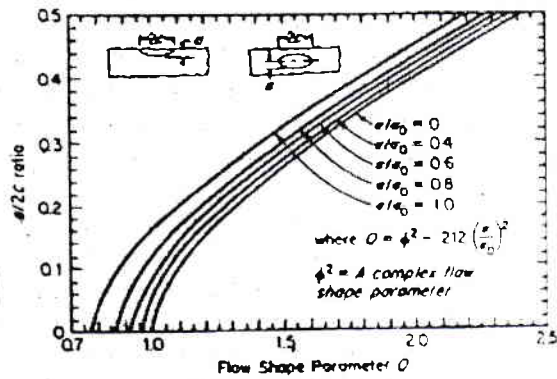
Apabila nilai K_{IC} diketahui untuk bahan tertentu, sehingga dapat ditetapkan panjang retak stabil, maka tegangan desain dapat dihitung dengan rumus di atas dan nilainya harus lebih kecil dari K_{IC} . Sebaliknya, apabila sistem memerlukan bahan berkekuatan tinggi serta ringan, K_{IC} tetap, karena bahan yang memiliki ketangguhan perpatahan tinggi serta ringan sangat langka. Tingkat tegangan harus tinggi karena diperlukan beban maksimum, oleh karena itu ukuran retak atau cacat harus sekecil mungkin. Hal ini sulit untuk dideteksi dengan teknik inspeksi yang lazim. Untuk bahan pipa pecah ini diketahui $K_{IC} = 46 \text{ Mpa m}^{1/2}$.

Berdasarkan persamaan (4) dapat dikembangkan intensitas tegangan untuk cacat yang tidak tembus adalah

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \pi a / 2t} \quad (5)$$

Pada Gambar 1 tampak hubungan antara Q (parameter bentuk retak) dengan rasio bentuk retak $a/2c$.





Gambar 1. Geometri Retak dan desain Bejana Tekan Silindris

Kurva tersebut digunakan baik untuk retak permukaan maupun untuk retak bagian dalam. Karena retak bagian dalam kurang berbahaya dibandingkan retak permukaan, maka besar intensitas tegangan untuk retak permukaan perlu digunakan faktor koreksi.

$$K_I^2 = \frac{1.21\sigma\pi a^2}{Q} \quad (6)$$

$$Q = \phi^2 + 2.12 \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^2 \quad (7)$$

Secara umum, penyebab kegagalan fungsi suatu bahan dapat dibagi atas 3 kategori yaitu [3]:

1. Desain yang tidak tepat, antara lain bentuk tepi yang tajam, pemilihan bahan dan metode pengerjaan panas yang tidak tepat, serta tidak dilakukannya analisis tegangan.
2. Kondisi operasi dan lingkungan, antara lain pengoperasian dengan beban berlebih, korosi atau akibat cara perawatan yang tidak benar.
3. Proses fabrikasi dan instalasinya tidak sempurna, seperti retak saat penggrindaan, cacat proses, cacat fabrikasi, cacat las, adanya inklusi bukan logam dan lain-lain yang sejenis.

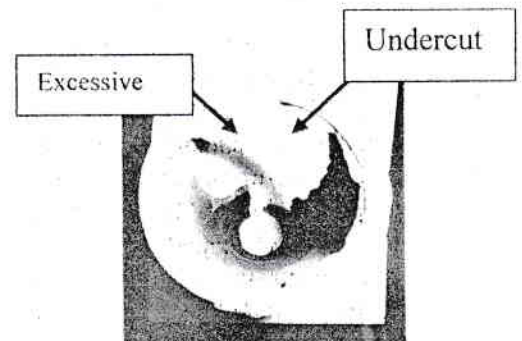
METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

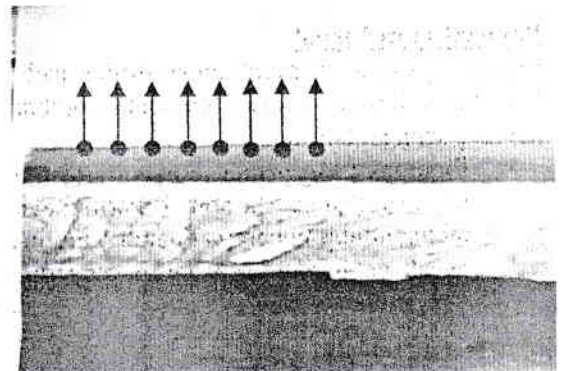
Bahan penelitian adalah sebuah pipa penyalur Amoniak pada perusahaan Pupuk yang pecah pada saat pemakaian dan dapat dilihat pada Gambar (2).



Gambar 2. Pipa Pecah



Gambar 3. Penampang Excessive dan undercut



Gambar 4. Fraktografi dan posisi sampling

Peralatan Pengujian

Peralatan penelitian yang dipakai meliputi Alat PMI (Post Material Identification) merek NITON Analyzer type Xli (USA), Brinell Tester merek Krautkramer, type Aquatip (GERMANY), Couplant, Mesin potong, Mesin Gerinda, Mesin Gergaji, Metalografi, Kamera Optik, Mesin Uji Tarik, dan Mesin Impak Charphy.

Cara penelitian

1. Informasi yang dapat diperoleh dari lapangan
2. Observasi visual pada spesimen (pipa pecah)
3. Pemeriksaan struktur makro dan struktur mikro



4. Pengujian mekanik (uji tarik, kekerasan dan pukul-takik)
5. Analisis komposisi kimia material.

Cara analisis data

Untuk melakukan observasi visual pada permukaan patahan dan struktur mikro material digunakan kamera optik. Untuk mengetahui sifat-sifat mekanik pipa digunakan Hardness tester, tensile testing machine and charphy impact testing machine. Benda uji dibersihkan dari kotoran dan debu, kemudian hidupkan alat PMI merk NITON Analyzer dan tempelkan benda uji padanya, pada monitor PMI akan muncul unsur-unsur kimia yang terkandung dalam material tersebut. NITON PMI Analyzer dan Hardness Test dilakukan pada spesimen pipa pecah yang diuji masing-masing sebanyak 3 titik dan 8 titik. Data setelah dilakukan pengujian dengan menggunakan alat NITON Analyzer adalah data yang diambil berdasarkan pembacaan pada alat tersebut.

PEMBAHASAN

Pemeriksaan Visual

Pipa gas yang telah pecah dapat dilihat pada Gambar (1). Pemeriksaan visual terhadap gambaran fisik penting sebagai berikut:

1. Pipa gas yang pecah ternyata asal mula pecah pada sambungan lasannya. Permukaan patahan mengandung beberapa daerah yang mengalami pecah getas dan cacat lasan yang ditunjukkan oleh undercut dan excessive. Beberapa daerah juga tampak berwarna coklat yang menunjukkan adanya aktivitas korosi, akibat terkena electrolytic.
2. Permukaan pecah terdiri dari dua bagian. Bagian pertama, tampak daerah awal retak pada undercut Gambar (3). Kemudian, bagian kedua, akibat pengaruh beban internal, retak menjalar membentuk pecah/patah getas sepanjang sebatang pipa, seperti belah bambu. Arah penjalaran retak dan setrip menunjukkan asal retak.
3. Permukaan pecah/patah secara keseluruhan juga menyatakan bahwa pipa itu didahului cacat permukaan dalam (takikan atau undercut) dan kemudian akibat dikenai beban internal maka arah pecah keluar karena itu pecahannya bersifat eksplosif.

Pemeriksaan Fraktografi

Dari hasil observasi, dua zona kegagalaan dapat secara langsung diidentifikasi, yaitu (i) daerah awal retak, dan (ii) daerah patah getas sepanjang pipa.

Berdasarkan kriteria energi patah, ternyata hanya ada daerah jenis patah getas (energi tinggi). Berdasarkan daerah sambungan lasan ditunjukkan hanya satu sumber retak yaitu undercut yang membuat ketebalan dinding pipa menjadi berkurang atau menipis, sedangkan excessive paling tidak ada enam bagian yang memperkecilkan diameter sehingga membuat overload atau overpressure di sekitar sambungan sangat tinggi. Bagian patah getas ini terjadi akibat deformasi plastik yang relatif tinggi. Apabila dilakukan pemeriksaan SEM dengan pembesaran sekitar 5000X, permukaan patah akan kemungkinan besar memperlihatkan suatu patah lintar-butir. Pada sambungan lasan yang mempunyai undercut dan excessive dapat ditetapkan sebagai sumber retak awal, sedangkan di ujung pipa yang lain penjalaran patah/pecah berakhir sebelum memasuki daerah sambungan lasan dan bahkan sebelum mencapai Heat Affected Zone.

Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan dan analisis baku metalografis dilakukan berdasarkan prosedur Vander Voorf (1992), mulai dari pemotongan spesimen, pengerindaan dan pemolesan, dan pengetsaan pada permukaannya dengan menggunakan Vitella's regent etchant untuk menampang microstructure di bawah optic microscope. Pemeriksaan micrograph yang diperoleh pada pembesaran 400X Gambar (7 - 10) menghasilkan fakta bahwa:

1. Bagian permukaan luar pipa mempunyai struktur mikro martensit.
2. Bagian tengah material mempunyai struktur mikro khas baja tahan karat martensitic coran. Di samping itu, tampak juga fasa dendrit dengan tangan dendrit mengarah ke pusat (tengah) material pipa. Dendrit ditunjukkan oleh feature daun cemara, sedangkan martensit diperlihatkan oleh fasa-fasa flake yang runcing dan panjang. Ukuran butir sekitar 3-4 μm menyatakan bahwa proses pembekuan dengan laju pendinginan cepat dari temperatur austenitenya.
3. Bagian permukaan dalam pipa mempunyai struktur mikro martensit, ferit dan grafit.

Pemeriksaan Komposisi Kimia

Analisis komposisi kimia aktual dari bahan pipa pecah ini, yang diambil pada permukaan luarnya saja, dengan menggunakan alat PMI diperoleh data seperti diberikan dalam Tabel (1).

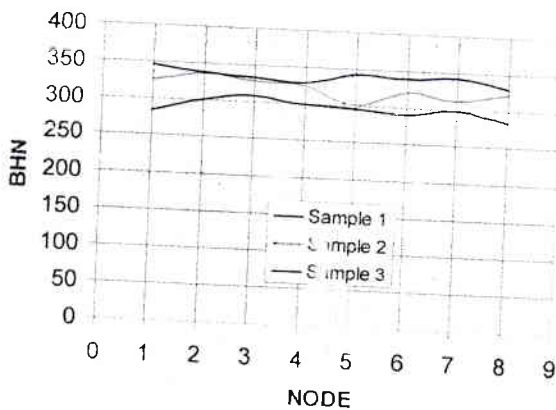
Tabel 1. Komposisi Kimia actual dan standar

Unsur Kimia	Komposisi kimia actual	Spesifikasi Standard AISI 210 untuk
C	1.14%	≤ 0.150%
Cr	13.65%	11.5 – 13,5%
Mn	0.89%	≤ 1.000%
P	0.04%	≤ 0.004%
Si	1.46%	≤ 1.000%
S	0.03%	≤ 0.030%
Fe	Sisa%	Sisa %

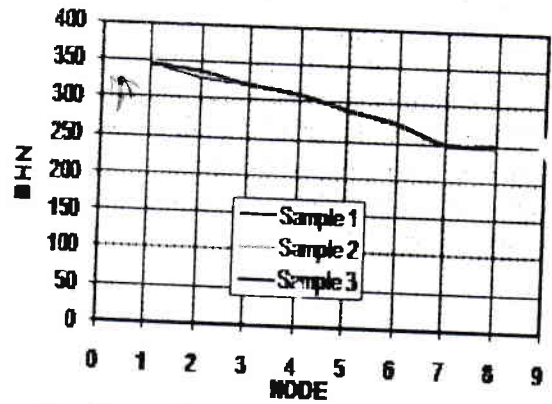
Berdasarkan komposisi kimia actual menunjukkan bahwa pipa pecah itu adalah TP 410 atau AISI 410, atau SUS 41000 martensitic stainless steel.

Pengujian Sifat-sifat Mekanik

Pengujian mekanik terdiri dari hardeness testing, universal tensile testing and charphy impact testing. Nilai kekerasan diperoleh antara 283 BHN dan 345 BHN dengan titik sampling pada arah horizontal dari pipa pecah tersebut. Kemudian, hasil uji tarik didapat tegangan ultimate, tegangan luluh dan perpanjangan masing-masing sebesar 517 MPa, 310 MPa dan 14% dengan modulus elastisitas (E) sebesar 200 GPa. Pengujian mekanik terakhir yang dilakukan terhadap pipa pecah itu adalah uji impak charphy yang diperoleh harga 11 Joules. Harga Energi Charphy ini dapat dikonversikan menjadi ketangguhan patah, menurut David Broek (1988: 216) berlaku hubungan empiris sebagai $K_{IC} = 11.4 \sqrt{Cv}$, sehingga ketangguhan patah diperoleh sebesar $K_{IC} = 11.4 \sqrt{11} = 37 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.



Gambar 5. Harga kekerasan vs titik arah horizontal



Gambar 6. Harga kekerasan vs titik arah horizontal

Moda Patahan

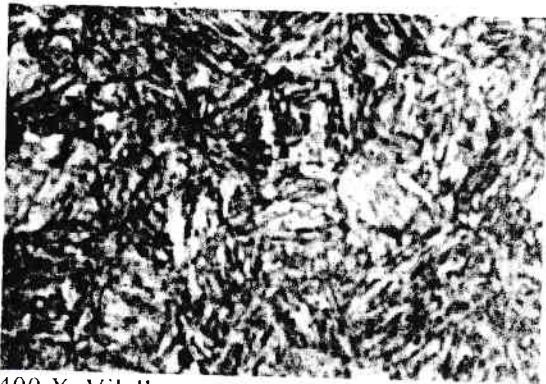
Moda patahan adalah patah getas. Patah getas itu dicirikan dengan bentuk fraktografi permukaan yang fibrous dan di beberapa tempat terdapat ciri-ciri cup and cone. Dengan demikian, moda patah ini adalah akibat kelebihan beban atau tekanan kerja dari fluida gas yang ada di dalamnya.

Pemeriksaan kekuatan

Sebagaimana telah disebutkan terdahulu bahwa pipa API 2" Sch 40 dengan ukuran nominal 2 inch mempunyai ukuran diameter luar, dan ketebalan dinding pipa berturut-turut adalah 2,375 in (60,325 mm), 2,067 in (52,502 mm) dan 0,154 in (3,912 mm) [5]. Hasil pengukuran cacat lasan berbentuk undercut dengan kedalaman 0,15 inch (= ?? mm) dan panjang retak (2c) = 0,75 inch (= ?? mm) sama sehingga geometri retak semi-eliptik (a/2c) = 0.3.

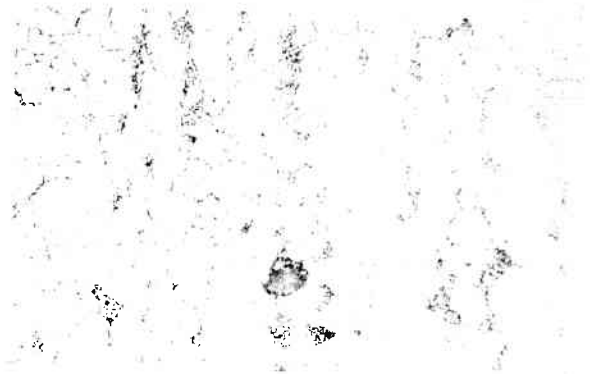
Kondisi pipa pecah ini merupakan bejana tekan yang berisi fluida gas dengan tekanan 12 kg/mm² dapat diterapkan konsep fracture mechanics. Pipa dengan retak permukaan (undercut) dalam bergeometri semieliptik. Arah bidang retak tegak lurus terhadap tegangan melingkar (lihat Gambar 1). Untuk jenis pembebanan dan geometri retak ini, faktor intensitas tegangan ditentukan dengan rumus (6) dan (7). Dengan demikian, besar kedalaman retak kritis yang menimbulkan perpatahan/kerusakan pada pipa bertekanan itu sebesar $a_c = 0,0616 \text{ m}$ atau 61,6 mm. Retak kritis melebihi tebal pipa 3,912 mm. Retak akan menembus dinding bejana dan terjadilah

kebocoran. Kondisi ini disebut "bocor sebelum patah/pecah". Bahkan, apabila retak berbentuk semieliptik, $a/2c = 0.05$, maka $Q = 1.0$ sehingga retak kritis sebesar $a_c = 0,026 \text{ m} = 26 \text{ mm}$. Dengan demikian, retak kritis juga melebihi tebal pipa 3,912 mm, seperti hasil perhitungan di atas, kondisi ini pun "bocor sebelum patah/pecah". Sekarang, apabila dipakai ukuran retak yang sebenarnya, hasil investigasi di lapangan, $a/2c = 0$, diperoleh hasil seperti di atas juga.



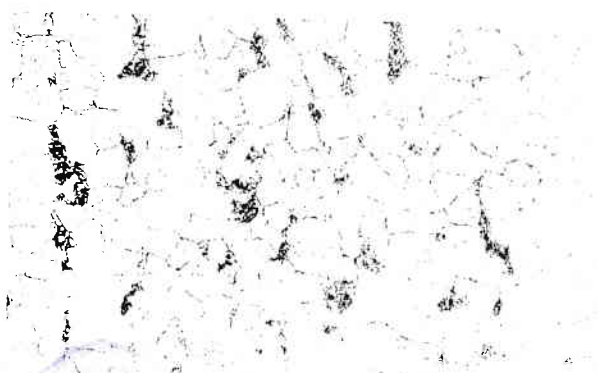
400 X, Vilella

Gambar 7. Foto mikro pada permukaan pipa logam induk



400 X, Vilella

Gambar 8. Foto mikro dari bagian permulaan yang pecah



400 X, Vilella

Gambar 9. Foto mikro dari bagian permulaan yang pecah

Setelah dilakukan penelitian dan hasil pengamatan pada benda uji maka pada bagian lasan terdapat *Undercut* dan *Excessive penetration* yang berada di dalam lasan tepatnya di dalam root lasan. *Undercut* ini terjadi karena material dasar yang ikut meleleh dan masuk ke daerah lasan, undercut inilah yang memperlemah kekuatan sambungan apalagi di sekitar *undercut* terdapat *Excessive* yang merupakan jalur lasan yang menonjol pada alur di bagian dalam dari lasan, sehingga pada saat diberikan tekanan dan aliran yang terjadi maka sedikit demi sedikit *undercut* yang berada antara lasan dan material dasar akan memakan bagian dasar material yang akhirnya akan menyebabkan crack (retak). Dari data hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap pipa yang pecah pada saat operasi yang digunakan untuk menyalurkan Amoniak maka diperoleh suatu indikasi bahwa unsur *Crom* Pada 3 bagian pipa yang berbeda dan tingkat kekerasan pada pipa tersebut melebihi batas yang diizinkan. Sehingga ini menjadi pemicu terjadinya penjaralan retakan.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Setelah dilakukan pengujian dengan menggunakan PMI maka didapatkan komposisi kimia sebagai berikut : Fe, 83,88 Cr, 13,89 V, 0,19 Co, 0,44 , maka pipa tersebut dapat disimpulkan adalah TP 410 atau UNS 41000, atau AISI 410
2. Tingkat kekerasan pipa yang didapat berdasarkan hasil penelitian setelah di konversi ke Hardnessbrinell nilai terendahnya adalah 283 dan tertinggi adalah 336
3. Berdasarkan pengamatan dan penelitian pada benda uji pipa pecah dikarenakan sifat fisik yang terlalu keras, benda uji pecah didahului adanya *undercut* dan *excessive* sehingga pada saat terjadi tekanan yang tinggi maka terjadilah crack di antara lasan dan material.
4. Benda uji yang sifat kekerasannya melebihi yang telah ditentukan pada ASME II tidak bisa digunakan karena sifatnya yang getas sehingga mudah pecah.

Saran

1. Pemilihan pipa pada saat pemakaian harus hati-hati
2. Sebelum pipa digunakan sebaiknya dilakukan uji kekerasan terlebih dahulu
3. Pemakaian pipa sebaiknya mengacu kepada standar

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Akhyar Ibrahim & Iskandar Azis, "Analisis Kegagalan Poros Pompa Sentrifugal yang Beroperasi dalam Lingkungan Korosif," *Jurnal SAINTEK*, (ITM), **20**, 92-99, 2003.
- [2] American Petroleum Institute, "Specification for Line Pipe," Exploration and Production Department, API Specification 5L, forty-first ed., API, 1995.
- [3] George E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd Edition, McGraw Hill Book Company, London and New York, 1986.
- [4] Mohitpour, M., Golsham, H., and A. Murray, "Pipeline Design and Construction: A Practical Approach," Second Edition, (New York: ASME Press), 2003.
- [5] Rothwell, A.B., "The International State of the Pipeline Fracture Control and Fracture Risk Management," Paper 12, Proc. Int. 1997.
- [6] T. Hafli & Akhyar Ibrahim, "Analisis Keandalan Pipa Penyalur Air Minum dengan Cacat Semi Elips," *Jurnal Sistem Teknik*, **13** (2), 23-33, 2006.
- [7] Vander Voort, G.F. (ed.), *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, (Ohio: ASM International), 2004.
- [8] William T. Becker and Roch J. Shipley, *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention*, (Ohio: ASM International), 2004.
- [9] Wulpi, Donald J., "Understanding How Components Fail," American Society for Metals, Ohio, 1985.