

Analisa Kegagalan pada Patahnya Sambungan Las dalam Sistem Instrumentasi Katup Pengaman Tekanan Kerja

Gilang Cempaka Kusuma^{1*}, Laili Novita Sari², Hadi Sunandrio³ 

¹ Pusat Riset Teknologi Kekuatan Struktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, Indonesia

^{2,3} Direktorat Pengelolaan Laboratorium Fasilitas Riset dan Kawasan Sains Teknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received March 08, 2023

Accepted October 13, 2023

Available online October 25, 2023

Kata Kunci:

Analisa kerusakan, sambungan las, retak fatiq, vibrasi.

Keywords:

Failure analysis, welding joint, fatigue crack, vibration.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Analisa kerusakan dilakukan dengan menerapkan serangkaian inspeksi dan pengujian terhadap sambungan las dari tube yang digunakan dalam instalasi peralatan industri minyak dan gas bumi. Kerusakan berupa patahan ditemukan pada tube yang merupakan bagian dari sistem instrumentasi katup pengaman tekanan kerja. Observasi dengan mikroskop pada perbesaran rendah memperlihatkan retakan berawal dari sisi dinding luar tube dengan morfologi patahan merupakan pola penjalaran retak fatigue. Pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa material tube merupakan baja tahan karat tipe 316L. Analisa menggunakan scanning electron microscope pada permukaan patahan membuktikan bahwa mekanisme patahan merupakan patah getas yang merambat pada batas butir. Berdasarkan hasil observasi, retak yang terjadi pada sambungan tube terjadi akibat beban dinamis yang timbul pada saat operasional. Penyebab utama timbulnya beban dinamis adalah fenomena getaran yang timbul dari mekanisme membuka dan menutupnya katup pengaman tekanan kerja. Fenomena getaran yang terjadi pada material tube menimbulkan retak fatiq pada daerah sambungan las yang terus merambat kemudian menyisakan luas penampang yang tidak lagi mampu menahan pembebanan sehingga menyebabkan tube patah. Beberapa rekomendasi diberikan sebagai metode pencegahan agar tidak terjadi kejadian berulang terutama pada sambungan las dari tube yang memiliki diameter kecil.

ABSTRACT

Failure analysis is carried out by applying a series of inspections and tests on the welding joints of tubes that used in the oil and gas industrial equipment. Failure in the form of a fracture was found in the tube which is part of working pressure safety valve instrumentation system. Observation with a microscope at low magnification shows that the crack initiated from the outer side of the tube wall with morphology of fatigue cracks pattern. Chemical composition test shows that the tube material is stainless steel type 316L. Analysis using a scanning electron microscope on the fracture surface proves that the fracture mechanism is a brittle fracture that propagates at the grain boundaries. Based on observation, cracks in the tube connection occur due to dynamic loads under operational condition. The main cause of dynamic loads is the vibration phenomenon arising from the opening and closing mechanisms of the working pressure safety valve. The phenomenon of vibration that occurs in the tube material causes fatigue cracks in the welding joint area which continues to propagate and then leaves a cross sectional area that is no longer able to withstand the load and eventually leads to system failure. Several recommendation are given as a method of prevention, especially failure in welded joints of tubes that have small diameters.

1. PENDAHULUAN

Pada fasilitas pengolahan minyak dan gas bumi terdapat tingkat resiko bahaya yang tinggi. Sektor industri minyak dan gas bumi pada dasarnya beroperasi dengan potensi bahaya dari bahan yang mudah terbakar, beracun dan mudah meledak yang menjadi resiko terhadap pekerja, lingkungan, aset peralatan serta terhadap reputasi perusahaan. Otomatisasi proses yang kompleks dan sistem instrumentasi dirancang untuk menjamin kesesuaian dan keamanan pada kondisi operasional. Sistem tersebut berperan sebagai pembatas untuk mencegah suatu kondisi yang tidak diinginkan atau untuk meminimalkan konsekuensi dari resiko bahaya yang dapat terjadi (Redutskiy et al., 2021). Sistem instrumentasi dalam peralatan industri dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian subsistem utama. Subsistem pertama yaitu sebagai transmitter dengan teknologi sensor pengukuran terhadap parameter dan mengirim data kemudian subsistem berikutnya yaitu logic solver yang mengimplementasikan algoritma tertentu terhadap data dari sensor dan mengirim sinyal ke subsistem selanjutnya yaitu elemen kontrol akhir yang dapat berupa aktuator, katup, saklar dan sebagainya yang berfungsi untuk menetapkan keadaan tertentu

*Corresponding author.

E-mail addresses: Gilang789@gmail.com (Gilang Cempaka Kusuma)

pada fasilitas atau unit produksi. Sistem tersebut dapat ditingkatkan menjadi sistem keamanan yang dirancang untuk mengisolasi secara sebagian atau terhadap keseluruhan proses dalam kondisi darurat yang berpotensi meningkat menjadi situasi kritis dalam waktu yang singkat. Salah satu sistem instrumentasi dalam fasilitas industri pengolahan minyak dan gas bumi yaitu sistem proteksi pada peralatan bertekanan berupa katup yang digunakan untuk melepas tekanan yang berlebih dan menutup ketika aliran fluida telah kembali normal (X. Song et al., 2014; X. G. Song et al., 2015). Tube digunakan dalam sistem instrumentasi sebagai saluran penghantar fluida yang akan memberikan parameter data kepada bagian sensor. Penggunaan tube sebagai bagian sistem instrumentasi pada umumnya dihubungkan terhadap peralatan industri melalui metode penyambungan menggunakan *fitting* yang memiliki ulir atau dengan proses pengelasan.

Penelitian terkait kegagalan pada tube yang telah dilakukan sebelumnya diantaranya yaitu oleh (Ling et al., 2019) terhadap tube stainless steel tipe 304H dengan diameter 25.4 mm yang digunakan dalam instalasi tungku pengolahan bahan baku polimer yang diakibatkan temperatur tinggi secara setempat, kemudian oleh (M. Liu et al., 2021) pada tube stainless steel austenitik dengan diameter 15 mm dari alat penukar panas pada instalasi geotermal dengan mekanisme kegagalan berupa kombinasi dari tekanan fluida dan lingkungan korosif, oleh (Y. Liu et al., 2021) pada tube stainless steel tipe 321 dengan diameter 19 mm yang digunakan dalam instalasi pengolahan minyak bumi dengan mekanisme kegagalan akibat korosi, dan oleh (Zhai et al., 2021) pada tube stainless steel 304 dengan diameter 16 mm dalam instalasi pengolahan batu bara dengan mekanisme kegagalan dari kombinasi beban mekanis dan lingkungan korosif. Sementara pada penelitian ini kerusakan terjadi pada tube stainless steel austenitik tipe 316L yang memiliki ukuran diameter yang kecil dalam aplikasi sistem katup pengaman tekanan kerja (*pressure safety valve*). Objek pemeriksaan merupakan tube *seamless* dengan diameter 9,53 mm yang digunakan sebagai penyalur fluida bertekanan untuk menggerakkan mekanisme membuka dan menutup katup dalam menjaga tekanan kerja pada instalasi industri pengolahan minyak dan gas bumi. Kegagalan terjadi dalam bentuk patahan pada daerah sambungan las antara tube terhadap pipa yang memiliki ukuran diameter 101,6 mm sebagai ruang bertekanan (*pressure chamber*).

Penelitian yang dilakukan saat ini bertujuan untuk mengetahui penyebab utama dari kegagalan tube instrumentasi katup pengaman tekanan kerja sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan metode yang tepat dalam mencegah kejadian berulang terutama terhadap sambungan las pada tube yang memiliki ukuran diameter kecil. Investigasi awal dilakukan untuk mengetahui riwayat komponen dan informasi yang terkait dengan tube yang mengalami kegagalan. Pemeriksaan visual dengan perbesaran rendah (makroskopis) dilakukan untuk memeriksa indikasi penyebab kegagalan. Selanjutnya dilakukan pengkajian terhadap struktur mikro dan permukaan patahan untuk mengetahui proses perambatan retak. Pengujian komposisi kimia dan pengujian distribusi kekerasan dilakukan untuk mengetahui riwayat siklus termal saat proses pengelasan berlangsung serta kondisi operasional sebelum tube mengalami kerusakan (M. Liu et al., 2021). Kegagalan tube pada umumnya terjadi akibat beberapa sebab termasuk di antaranya adalah karena adanya lingkungan korosif, temperatur tinggi, abrasi dan getaran (Y. Liu et al., 2021; Zhai et al., 2021). Atas dasar tersebut proses terjadinya kegagalan diinvestigasi secara mendetail dan rekomendasi diupayakan untuk mencegah kejadian berulang.

2. METODE

Penelitian dilakukan dengan menerapkan serangkaian inspeksi dan pengujian untuk menganalisa akar permasalahan yang menyebabkan patahnya sambungan las tube instrumentasi. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan metode yang tepat dalam mencegah terjadinya kejadian serupa pada kerusakan tube yang memiliki ukuran diameter kecil. Analisa awal dilakukan terhadap karakteristik dari material tube dan sambungan las yang diterapkan (Kant et al., 2018). Untuk memperoleh data yang cukup sisa patahan tube dilepas dari katup pengaman tekanan kerja yang kemudian dibawa ke laboratorium untuk diperiksa lebih seksama. Inspeksi dan pengujian dilakukan di laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional kawasan sains dan teknologi Serpong Tangerang Selatan.

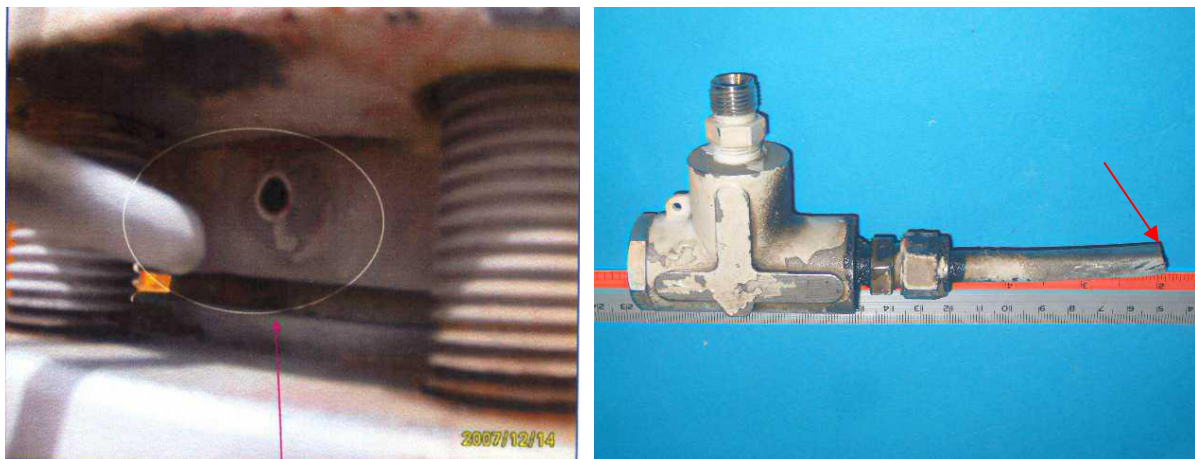
Pada tahap awal dilakukan pengukuran dimensi dan inspeksi visual. Observasi terhadap permukaan patahan selanjutnya dilakukan menggunakan mikroskop dengan tingkat perbesaran yang rendah (kurang dari 50 \times). Pemeriksaan struktur mikro dilakukan dengan cara membuat spesimen dari potongan pada arah memanjang. Bagian potongan tube dipasangkan *mounting* yang terbuat dari resin araldite untuk selanjutnya dilakukan etsa dengan larutan Kalling's reagent dengan waktu tahan selama 30 detik pada suhu ruang setelah dilakukan pengamplasan menggunakan grit 1200 dengan media pendingin air dan pemolesan dengan pasta intan (ASTM Standard, 2015). Observasi struktur mikro dilakukan dengan mikroskop metalurgi (Olympus DSX 510) hingga perbesaran 150 \times . Untuk mempertajam analisa dalam menetapkan mekanisme perpatahan dilakukan pemeriksaan menggunakan metode *scanning electron microscope* yang dilengkapi dengan sensor *energy dispersive X-ray spectroscopy* (Zeis, Supra 55)

yang bertujuan untuk mengetahui kemungkinan adanya senyawa lain yang terbentuk di sekitar daerah patahan pada daerah terjadinya awal retak. Agar dapat mengetahui kesesuaian material tube terhadap kondisi operasional dilakukan pengujian komposisi kimia (OBLF GS1000-II) menggunakan metode *optical emission spectroscopy* (OES) yang memiliki kemampuan memperlihatkan kadar karbon pada material meskipun dengan presentase yang rendah. Selain itu dilakukan pengujian kekerasan mikro (PTI3000D) menggunakan metode uji Vickers dengan prinsip indentasi menggunakan indenter intan yang memiliki bentuk piramid (Kant et al., 2018). Pembebanan yang diberikan dalam uji kekerasan sebesar 30 kgf dengan waktu tahan selama 15 detik (American Society for Testing and Materials E92, 2004). Pengujian kekerasan dilakukan pada daerah logam las, daerah material induk yang terpengaruh panas dari proses pengelasan (*heat affected zone*) dan material induk yang berada jauh dari daerah patahan.

Analisa kegagalan dilakukan dengan mencari korelasi dari hasil observasi diantaranya yaitu adalah karakteristik morfologi patahan, lokasi awal terjadinya retak, adanya deformasi pada material serta kemungkinan abnormali dari struktur mikro dan komposisi kimia pada daerah material induk maupun logam las. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya pada umumnya dilakukan terhadap tube pada mesin penukar panas yang memiliki ukuran diameter yang lebih besar sementara dalam karya tulis ini objek penelitian merupakan tube instrumentasi dengan ukuran diameter yang kecil (kurang dari 1/2 inch). Hipotesis awal dari penyebab terjadinya patahan pada tube dapat diakibatkan oleh mekanisme korosi, morfologi patahan akibat pembebanan yang terlalu tinggi atau morfologi patahan akibat pembebanan dinamis.

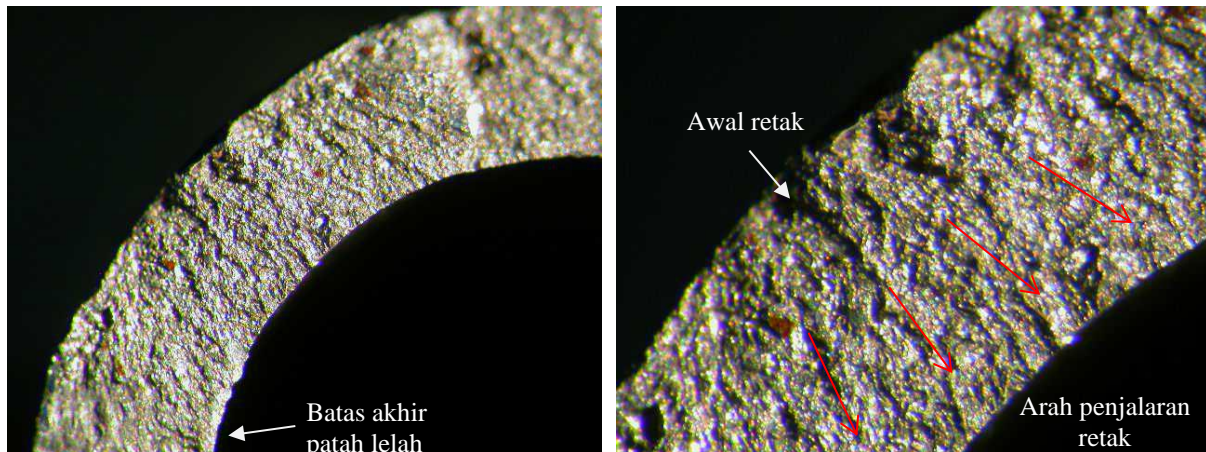
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil



Gambar 1. Kerusakan pada Sambungan Tube Terhadap Ruang Bertekanan

Pemeriksaan visual memperlihatkan bahwa pada bagian sambungan antara tube terhadap pipa sebagai ruang bertekanan telah terjadi patah secara keseluruhan sehingga kedua komponen tersebut terpisah. Penyambungan tube dengan pipa digunakan metode pengelasan dengan tipe sambungan *fillet weld*. Antara tube dengan pipa terdapat perbedaan ukuran diameter maupun ketebalan yang cukup besar. Dimensi dari obyek pemeriksaan memiliki ukuran diameter luar 9,5 mm dengan tebal dinding 1,3 mm sementara untuk pipa bertekanan memiliki diameter 100 mm dengan ketebalan 6 mm. Pada bagian tepi dekat dengan daerah patahan tampak sedikit sekali adanya deformasi plastik (*necking*) sebagai indikasi material yang bersifat ulet. Bagian tube yang berada dekat dengan area patahan terlihat mengalami lendutan sebagai indikasi bahwa tube mengalami tegangan tekuk (Gambar 1). Observasi terhadap permukaan patahan dari tube memperlihatkan pola deformasi plastik sebagai indikasi awal mula retak serta arah penjalaran retak yang diawali dari sisi bagian luar tube yang kemudian menjalar ke sisi bagian dalam hingga patah secara keseluruhan. Adanya perbedaan pola deformasi pada permukaan patahan merupakan indikasi perubahan dari mekanisme perambatan retak fatiq menjadi patah *overload* ketika sisa penampang tube tidak lagi mampu menerima pembebanan (Gambar 2).



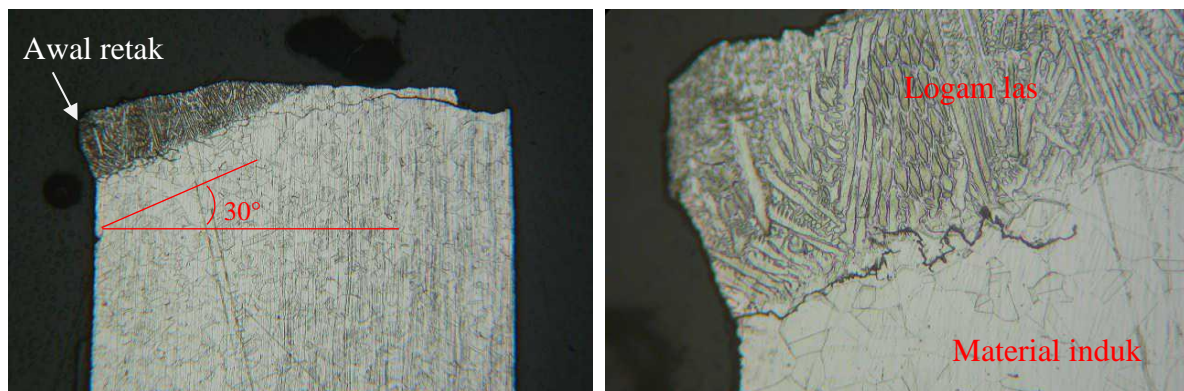
Gambar 2. Pemeriksaan pada Permukaan Patahan dengan Perbesaran Rendah

Dari hasil analisa pengujian komposisi kimia dengan metode *optical emission spectroscopy* diketahui bahwa material tube memenuhi standar komposisi dari material stainless steel tipe TP316L yang sesuai untuk kategori tube dengan ukuran diameter kecil untuk penggunaan umum dalam kondisi lingkungan korosif pada temperatur rendah maupun temperatur tinggi (Payam et al., 2019), kecuali dengan adanya paduan unsur tembaga dan vanadium yang ditemukan dalam komposisi material tube. Material jenis ini diketahui memiliki ketahanan yang baik pada lingkungan asam dan paparan air laut (Hussaini et al., 2014). Komposisi unsur kimia pada tube instrumentasi disajikan pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Komposisi Unsur Kimia pada Tube Instrumentasi

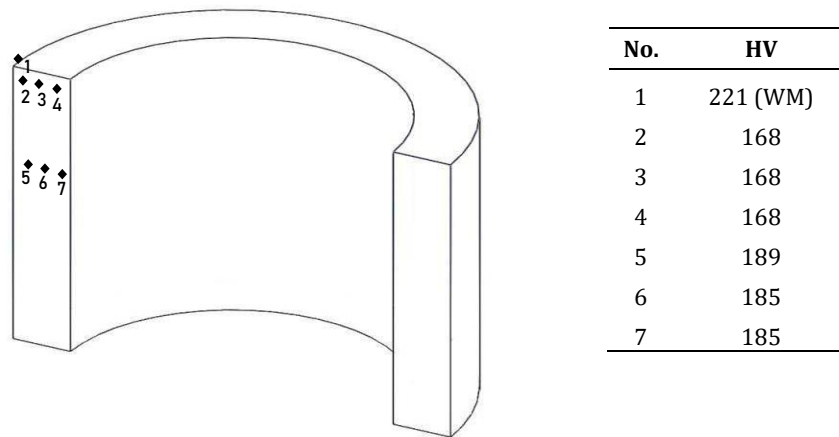
Element (wt%)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Material tube	0,025	0,45	1,9	0,001	0,032	16,05	10,07	2,35	0,58	0,15
TP 316 L	0,030	1,00	2,0	0,030	0,045	16-18	10-15	2-3	-	-

Hasil pemeriksaan metalografi memperlihatkan bahwa pengelasan antara tube terhadap pipa menggunakan desain kampuh V tunggal dengan sudut kemiringan 30° ([Gambar 3](#)). Inisiasi retak terjadi pada logam las yang kemudian menjalar memotong material tube hingga mengalami patah. Pemeriksaan metalografi juga memperlihatkan adanya retak sekunder yang diawali pada daerah batas fusi dari logam las terhadap material induk yang kemudian menjalar memotong material tube. Retak sekunder berawal dari sisi luar dinding tube dengan perambatan retak pada batas butir material (*intergranular*). Retak sekunder lain terlihat berawal dari sisi dinding dalam tube dengan pola rambatan retak memotong butir kristal material tube (*transgranular*). Struktur mikro dari tube didominasi matriks austenitik dengan butir kristal *equiaxed* dan adanya struktur kembar (*twinning*) yang merupakan ciri khas dari material baja tahan karat TP 316L. Selain itu dari pemeriksaan metalografi dapat terlihat bahwa struktur mikro yang terbentuk pada logam las sangat berbeda dengan bagian material induk yaitu morfologi *cellular* dengan lengan *dendritik* disertai fasa kedua dengan morfologi *ferrite* akibat proses pendinginan cepat dari fasa cair (Shankar et al., 2016; Suresh Kumar et al., 2021). Pada logam las maupun material tube terlihat bebas dari cacat akibat proses fabrikasi dengan ukuran butir kristal yang homogen.



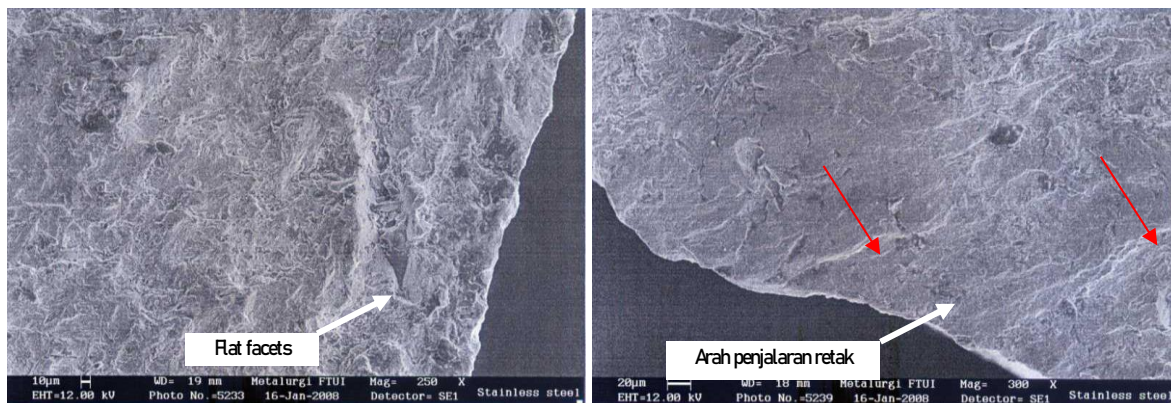
Gambar 3. Pemeriksaan Metalografi pada Potongan Melintang Tube

Pemeriksaan distribusi kekerasan material dengan metode vickers yang diterapkan terhadap spesimen tube menggunakan prinsip menekan material dengan indenter dalam bentuk piramida dengan sudut 136° (Ceramics et al., 2012). Penekanan akan menghasilkan jejak pada material yang selanjutnya dilakukan pengukuran dengan bantuan mikroskop. Sebelum dilakukan pengujian kekerasan material dengan metode Vickers, permukaan spesimen dilakukan penggerindaan dan pemolesan untuk memperoleh permukaan yang datar dan halus. Hasil analisa pengujian menunjukkan distribusi kekerasan pada daerah logam las (WM) mengalami peningkatan nilai kekerasan hingga mencapai 221 HV sementara pada daerah dekat dengan area sambungan las material tube mengalami pelunakan dengan nilai 168 HV yang lebih rendah dibandingkan area yang jauh dari daerah sambungan las yaitu dengan nilai rata rata 186,3 HV. Terjadinya peningkatan nilai kekerasan pada daerah sambungan las dapat terjadi akibat momen tekuk yang menimbulkan efek pengerjaan dingin terhadap material. Pelunakan yang terjadi pada daerah dekat dengan sambungan las dapat diakibatkan oleh fenomena segregasi unsur karbon serta pertumbuhan butir kristal dalam material yang dipengaruhi panas dari proses pengelasan. Lokasi titik pengambilan nilai distribusi kekerasan diilustrasikan pada Gambar 4.



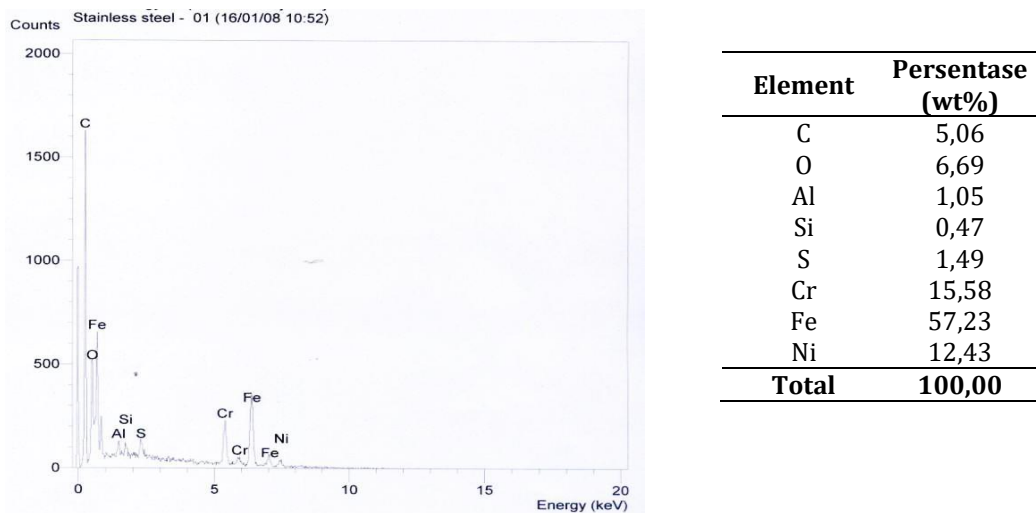
Gambar 4. Pemeriksaan Distribusi Kekerasan pada Potongan Tube

Pemindaian dengan mikroskop elektron dapat memperlihatkan perbesaran yang jauh lebih tinggi sehingga pemeriksaan dapat dilakukan lebih terperinci dibandingkan dengan penggunaan mikroskop optik. Metode SEM menghasilkan gambar dengan resolusi tinggi dan detail sehingga dapat memperlihatkan dengan baik terkait struktur permukaan, adanya ketidaksempurnaan dan pengotor yang dapat dengan jelas untuk dilakukan identifikasi. Pemeriksaan dengan metode scanning electron microscope memperlihatkan bahwa permukaan patahan membentuk morfologi cleavage dengan pola deformasi plastik yang mengindikasikan arah penjalaran retak (Babu et al., 2010). Dengan perbesaran yang lebih tinggi ditemukan adanya daerah datar (flat facets) yang merupakan indikasi mekanisme patahan yaitu penjalaran retak sepanjang batas butir kristal austenite (Sajith et al., 2020). Pemeriksaan SEM pada permukaan patahan disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemeriksaan SEM pada Permukaan Patahan

Energy dispersive x-ray spectroscopy adalah salah satu fitur yang disematkan dalam alat uji SEM sebagai detektor untuk menentukan komposisi pada area spesifik dari sampel. Dari hasil pemeriksaan EDS pada permukaan patahan menunjukkan adanya peningkatan persentase kadar unsur karbon dan unsur sulfur dibandingkan dengan hasil pengujian komposisi kimia pada material induk tube TP316L menggunakan metode OES. Hasil pemeriksaan EDS ditunjukkan pada Gambar 6. Kandungan karbon yang tinggi pada sambungan las material baja tahan karat austenitik umumnya adalah dalam bentuk karbida yang terbentuk pada batas butir yang dapat menyebabkan naiknya nilai kekerasan pada daerah logam las. Senyawa karbida akan menurunkan sifat mekanis terutama terkait keuletan material dan dapat menjadi situs awal mula retak pada sambungan las (Moslemi et al., 2015). Keberadaan fasa kedua berupa *ferrite* pada batas butir merupakan kondisi ideal bagi karbida untuk terkumpul yang kemudian membentuk segregasi pada daerah batas butir. Karbida yang terbentuk pada baja tahan karat tipe 316 pada umumnya adalah karbida krom dan karbida molibdenum (Ostovan et al., 2021).



Gambar 6. Pemeriksaan EDS pada Permukaan Patahan

Pembahasan

Kegagalan akibat mekanisme temperatur tinggi, erosi, korosi dan cacat fabrikasi telah tereliminasi dari hasil observasi melalui inspeksi visual, komposisi kimia serta karakteristik mikrostruktur (Y. Li et al., 2022). Hipotesa kegagalan mengerucut terhadap pembebanan mekanis pada sambungan las. Terjadinya awal retak pada sisi luar tube merupakan indikasi bahwa tube mengalami tegangan tekuk dengan puncak tegangan berada pada dinding sisi luar yang membedakan terhadap patahan yang diakibatkan oleh tekanan fluida di dalam tube yang cenderung menimbulkan retakan pada arah longitudinal (Ling et al., 2019; M. Liu et al., 2021). Tidak terlihatnya deformasi plastis dalam bentuk penipisan dinding tube pada daerah patahan menunjukkan bahwa tekanan fluida yang terjadi di dalam tube masih berada di bawah batas elastisitas sehingga tidak membuat tube menggebung (Deshmukh & Dhamangaonkar, 2023; J. Li et al., 2022). Hasil observasi metalografi tidak menunjukkan adanya degradasi struktur mikro pada logam induk maupun terbentuknya rongga inisiasi retak sebagai pertanda tidak terjadi paparan temperatur tinggi pada tube (G. Li et al., 2022) sehingga distribusi butir kristal pada material induk terlihat seragam tanpa ada pertanda morfologi sensitisasi pada batas butir (J. Li et al., 2022). Bentuk retakan yang tidak bercabang merupakan indikasi bahwa patahan terjadi tanpa adanya pengaruh dari lingkungan korosif (M. Liu et al., 2021; Y. Liu et al., 2021; Zhai et al., 2021). Pemeriksaan dengan SEM maupun EDS tidak menemukan senyawa yang bersifat korosif maupun adanya deposit produk korosi yang menguatkan dugaan bahwa penyebab kegagalan merupakan beban mekanis (Ou et al., 2022).

Pemeriksaan dengan metode visual memperlihatkan adanya lendutan dekat dengan daerah patahan yang mendukung hipotesa awal bahwa komponen tersebut mengalami pembebanan mekanis dalam bentuk tegangan tekuk. Konstruksi dari tube instrumentasi yang memiliki diameter yang kecil rentan untuk mengalami lendutan pada saat menerima pembebanan yang timbul akibat berat dari *fitting* tube dan katup pengaman yang terpasang. Pemeriksaan terhadap permukaan patahan dengan metode *scanning electron microscope* menunjukkan dominasi dari pola *cleavage* yang merupakan bentuk dari terjadinya perambatan retak yang memotong batas butir sebagai indikasi patahan terjadi pada material yang getas (Ling et al., 2019; Wu et al., 2021). Observasi dengan *scanning electron microscope* juga menunjukkan indikasi mekanisme patahan berupa retak yang menjalar pada batas butir dan menyebabkan

butir kristal austenite terpisah membentuk permukaan yang datar (*flat facets*) (Sajith et al., 2020). Peluang terjadinya penjalaran retak pada batas butir dapat dipengaruhi oleh orientasi batas butir kristal terhadap arah penjalaran retak (Payam et al., 2019). Sementara adanya retak yang terjadi pada batas butir merupakan efek pelemahan pada daerah batas butir yang merupakan daerah terjadinya segregasi dari unsur paduan dalam material. Semakin kecil luas area batas butir akan memperkecil daerah yang menahan penjalaran retak sehingga berpeluang retakan memotong butir kristal (Prasad Reddy et al., 2008). Dengan ukuran butir yang halus dan adanya fasa kedua pada logam las menyebabkan arah penjalaran retak berdefleksi memotong material induk pada daerah terpengaruh panas pegelasan. Keberadaan batas butir dari fasa kedua di dalam logam las dapat menjadi penghambat bagi perambatan retak (Shankar et al., 2016). Peluang perambatan retak juga ditentukan oleh kekuatan dari fasa dalam struktur mikro material dan kekuatan fatiq akan lebih baik apabila orientasi batas butir paralel terhadap arah pembebanan dibandingkan batas butir yang memiliki orientasi arah tegak lurus terhadap pembebanan (Babu et al., 2010). Pola deformasi plastik yang terjadi pada permukaan patahan yang ditampilkan dengan bantuan mikroskop pada perbesaran rendah memperlihatkan adanya dua macam pola perambatan retak sebagai indikasi perubahan mode retak *fatigue* menjadi patah akibat *overload* (Gambar 3) (He et al., 2018).

Komposisi kimia dari hasil pemeriksaan dengan metode OES menunjukkan bahwa material tube merupakan tipe baja tahan karat dengan kesesuaian paling mendekati adalah terhadap standar material TP316L kecuali dengan adanya paduan tembaga dan vanadium. Terdapatnya perbedaan komposisi terhadap standar baku pada material tube dapat saja terjadi yang ditujukan untuk memperoleh karakteristik khusus yang kemudian dikenal dalam klasifikasi baja tahan karat dengan merk dagang dari material tersebut. Penambahan unsur tembaga pada baja tahan karat dapat memberikan efek untuk meminimalkan kemungkinan terjadi *stress corrosion cracking* serta memberikan efek *age hardening*. Sementara paduan vanadium dapat memberikan efek untuk memperhalus ukuran butir kristal. Material baja tahan karat austenitik 316L diketahui memiliki ketahanan terhadap penjalaran retak fatiq yang baik pada suhu ruang serta memiliki keuletan dan ketangguhan yang lebih baik dibandingkan material baja karbon dan baja paduan rendah (American Society for Metals, 2005). Material baja tahan karat austenitik seri 300 memiliki karakteristik ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik sehingga banyak digunakan dalam aplikasi industri (Hussaini et al., 2014; M. Liu et al., 2021).

Material tersebut pada dasarnya memiliki sifat non magnetik dan dapat ditingkatkan kekerasannya dengan pengerjaan dingin. Baja tahan karat austenitik termasuk material metastabil yang memiliki kemungkinan terjadi perubahan fasa menuju *martensite* dari pengerjaan dingin yang menimbulkan deformasi plastis (Singh et al., 2021). Baja tahan karat tipe 316 L adalah pengembangan dari tipe 316 dengan kadar karbon yang lebih rendah untuk menghindari terbentuknya karbida dalam proses pengelasan (Kant et al., 2018). Sifat mampu las dari material baja tahan karat austenitik memiliki kecenderungan untuk mengalami distorsi yang diakibatkan nilai koefisien ekspansi termal yang cukup tinggi serta untuk terjadi retak panas dan presipitasi karbida yang akan menurunkan sifat mekanis dari sambungan las (Moslemi et al., 2015). Terdapatnya pengotor berupa unsur sulfur dan pospor merupakan faktor utama yang menyebabkan retak pada sambungan las baja tahan karat austenitik dengan terbentuknya senyawa yang memiliki titik lebur yang rendah yang menyebabkan terpisahnya batas antar muka akibat adanya tegangan dari penyusutan yang terjadi ketika logam las membeku sementara senyawa tersebut masih berada diatas temperatur solidus. Pada umumnya pengelasan material baja tahan karat austenitik tidak membutuhkan adanya perawatan panas setelah proses pengelasan, tetapi terkadang perawatan panas dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan karat serta untuk menghilangkan tegangan sisa. Tegangan sisa dapat timbul dari proses pembentukan dalam keadaan dingin maupu dari proses pengelasan (M. Liu et al., 2021).

Proses perawatan panas secara lokal perlu dilakukan dengan kehati-hatian disebabkan kenaikan temperatur secara lokal dapat menimbulkan daerah yang mengalami sensitisasi serta tegangan sisa baru yang timbul akibat adanya gradien temperatur. Hal ini menggiring asumsi bahwa sumber dari unsur karbon yang berlebih pada permukaan patahan yang terlihat melalui pengujian EDS merupakan sedimen dari fluida yang mengalir di dalam tube atau material dari pipa sebagai ruang bertekanan merupakan tipe baja yang memiliki kadar karbon yang cukup tinggi sehingga menyebabkan dilusi unsur karbon ke dalam logam las austenitik yang memiliki tingkat kelarutan yang tinggi terhadap unsur karbon yang menimbulkan terjadinya peningkatan senyawa karbida pada permukaan patahan. Data pengujian menunjukkan nilai kekerasan pada logam las melampaui standar material dengan nilai kekerasan yang diizinkan untuk material tube TP 316L adalah tidak melampaui 200 HV (Steel, 2008). Meningkatnya nilai kekerasan yang memiliki efek samping menurunkan ketahanan fatiq menjadi awal mula inisiasi retak pada sambungan las akibat beban dinamis. Dengan nilai kekerasan yang lebih tinggi pada bagian logam las menyebabkan respon terhadap tegangan yang bekerja menjadi lebih tinggi dibandingkan pada material

induk dengan keuletan yang lebih baik sehingga dapat berdefleksi terhadap beban yang diterima. Nilai keuletan akan lebih berperan pada beban dinamis yang memiliki nilai amplitudo yang tinggi sementara kekuatan material berperan pada beban dinamis dengan nilai amplitudo yang rendah (Shankar et al., 2016) yang menyebabkan umur *fatigue* pada daerah sambungan las akan lebih rendah dibandingkan pada bagian material induk. Terjadinya peningkatan nilai kekerasan pada logam las terkait dengan adanya perubahan struktur mikro serta terjadinya peningkatan kadar karbon pada logam las yang dibuktikan melalui pemeriksaan dengan metode metalografi dan EDS.

Struktur mikro dari patahan tube didominasi matriks austenitik yang merupakan ciri khas dari material baja tahan karat TP316L (Vander Voort & Baldwin, 2004). Di sisi lain struktur mikro pada logam las adalah transisi dari *dendritik austenite* menuju struktur mikro *cellular austenite* halus. Struktur mikro logam las baja tahan karat austenitik dapat tampak berbeda dibandingkan dengan material induknya meskipun dengan komposisi yang serupa dengan adanya reaksi dekomposisi, presipitasi dan segregasi elemen selama tahap pendinginan (Moslemi et al., 2015). Terbentuknya struktur mikro *cellular dendritik* yang mirip dengan struktur mikro dari produk cor merupakan indikasi dari logam las austenitik yang mengalami laju pendinginan yang cepat (Fu et al., 2008). Hal ini dapat terjadi melalui mekanisme perpindahan panas secara konduksi terutama terhadap material induk pipa bertekanan yang memiliki ukuran diameter dan dinding yang tebal serta rendahnya nilai masukan panas dari proses pengelasan yang diketahui dari ukuran volume logam las yang kecil dari pembuatan kampuh dengan sudut 30°. Meningkatnya nilai kekerasan pada logam las dapat terjadi pada penyambungan dua jenis material yang berbeda yaitu baja tahan karat tipe 316 terhadap tipe 304 baik dengan logam pengisi tipe 316 maupun 309 yang menghasilkan struktur mikro *dendritik* pada logam las (Kant et al., 2018).

Tebentuknya fasa yang bersifat keras dan getas pada material baja tahan karat 316 dapat terjadi akibat deformasi plastis dari proses fabrikasi maupun akibat pembebanan pada kondisi operasional (Nishimura & Alyousif, 2009). Pada daerah yang mengalami sensitisasi minimnya kadar krom akan lebih memiliki kecenderungan membentuk fasa *martensite* yang getas (Alyousif & Nishimura, 2010). Fasa *martensite* terbentuk pada daerah batas butir yang akan menahan untuk terjadinya pergeseran butir kristal sehingga meningkatkan nilai kekerasan material. Deposit logam las baja tahan karat pada material baja karbon perlu menggunakan logam pengisi (kawat las) yang mengandung kadar paduan yang tinggi untuk menjamin dilusi dari baja karbon tidak akan menghasilkan struktur yang getas pada logam las. Logam pengisi tipe 308, 316 atau 347 sebaiknya dihindari dan digantikan oleh logam pengisi tipe 309, 309L, 310 atau 312 (Ostovan et al., 2021). Terjadinya peningkatan nilai kekerasan pada daerah logam las juga dapat disebabkan oleh adanya fenomena pengerasan akibat regangan dari proses penyusutan saat logam las membeku (American Society for Metals, 2018).

Beban dinamis pada tube instrumen katup pengaman tekanan kerja dapat terjadi akibat dari tekanan fluida yang tidak konstan, mekanisme dari katup itu sendiri dan juga efek dari resonansi (Galbally et al., 2015). Lonjakan tekanan dapat dialami pada tube yang diinisiasi oleh mekanisme menutupnya katup dengan cepat. Lonjakan tekanan pada kondisi ini dapat terjadi dengan peningkatan tekanan jauh lebih tinggi dibandingkan tekanan kerja normal yang menghasilkan vibrasi bahkan pergerakan yang cukup keras pada tube instrumentasi yang memiliki ukuran diameter kecil. Begitupun apabila respon pergerakan membuka dari komponen katup pengaman tidak cukup cepat maka akan terjadi peningkatan tekanan yang menyebabkan tube mengalami batas tekanan maksimum secara berulang sebelum katup pengaman membuka secara penuh (X. G. Song et al., 2015). Pada kondisi akan menutup setelah terbuka penuh, katup pengaman tekanan dengan prinsip kerja menggunakan pegas dan piringan akan mengalami osilasi pada komponen piringan katup yang menyebabkan timbulnya getaran (Galbally et al., 2015; X. Song et al., 2014). Penyebab lainnya terjadi getaran pada tube adalah akumulasi dari kotoran yang menghalangi aliran fluida sehingga menyebabkan turbulensi, terjadinya perubahan tekanan hidraulis, resonansi akustik serta getaran mekanis yang dieksitasi kemudian ditransmisikan dari peralatan lainnya (Thomas & Mourad, 2021).

Retak sekunder yang terjadi pada batas fusi antara logam las dan material induk dapat disebabkan karena pada daerah tersebut terdapat perubahan geometri yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan serta sebagai daerah yang memiliki tegangan sisa dalam arah tarik akibat siklus termal dari proses pengelasan (Almeida et al., 2017). Inisiasi retak *fatigue* sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan pada titik tegangan paling tinggi (Zhang et al., 2020). Begitupun bentuk profil manik las yang kasar dan membentuk takikan pada bagian tengah menimbulkan situs sebagai titik konsentrasi tegangan yang tinggi. Terdapatnya tegangan sisa dari proses pengelasan dapat meningkatkan nilai tegangan yang diterima oleh material melampaui nilai tegangan yang diizinkan dalam desain yang akan menginisiasi serta meningkatkan laju perambatan retak (Babu et al., 2010; Johan Singh et al., 2007). Daerah sambungan las yang meliputi logam las, daerah terpengaruh panas dan material induk memiliki sifat heterogen secara struktur mikro maupun sifat mekanis yang dapat menjadi daerah potensial untuk terjadinya awal mula

retak akibat *fatigue* (Prasad Reddy et al., 2008; Suresh Kumar et al., 2021). Gradien regangan yang terjadi pada struktur mikro yang tidak homogen menimbulkan ketidakseragaman deformasi dengan nilai lendutan cenderung lebih besar pada daerah yang lebih lunak. Detail geometri dan konfigurasi sambungan las merupakan variabel penting yang akan mempengaruhi umur dari struktur ataupun komponen dalam menerima pembebanan. Terdapatnya titik konsentrasi tegangan dapat menjadi lokasi awal retak yang umumnya terjadi pada tepi mahkota las. Untuk meningkatkan kemampuan sambungan las dalam menerima beban dinamis dapat dilakukan dengan menghindari takikan yang memiliki sudut yang tajam (American Society for Metals, 2018). Aspek tersebut dapat ditempuh dengan cara membuat logam las membentuk segitiga simetris pada kedua kaki las dan membentuk sudut yang landai pada tepi dari mahkota las. Awal permulaan dan akhir pengelasan juga dapat menjadi titik konsentrasi tegangan, oleh karenanya sebisa mungkin dihindari terletak pada lokasi titik pembebanan yang paling tinggi. Profil manik las yang digerinda rata juga diketahui dapat memperpanjang umur komponen terhadap beban dinamis (Zhang et al., 2020).

Berdasarkan ciri-ciri kerusakan yang tampak dari serangkaian hasil pengujian dapat dinyatakan bahwa kerusakan sambungan tube diakibatkan oleh mekanisme *fatigue* yang diawali dengan terjadinya retak dari sisi bagian luar tube pada daerah sambungan las sebagai daerah yang memiliki ketahanan *fatigue* yang paling rendah. Retak kemudian menjalar ke material tube hingga sisa penampang tidak lagi mampu menahan pembebanan yang terjadi sehingga tube patah secara keseluruhan. Dilihat dari luas area penjaralan siklus *fatigue* yang sangat kecil apabila dibandingkan dengan luas area sisa patahan maka dapat dikatakan tube mengalami beban dinamis dengan amplitudo yang tinggi (He et al., 2018). Kegagalan akibat *fatigue* terjadi ketika material mengalami tegangan secara berulang atau berfluktuasi dengan nilai beban yang lebih rendah dari kekuatan material dalam menerima satu kali beban statis. Semua sambungan tube lainnya yang memiliki konstruksi serupa dapat diperkirakan mengalami kegagalan dengan mekanisme yang sama. Tindakan pencegahan yang dapat dilakukan diantaranya adalah pemilihan material tube yang memiliki nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi (Thomas & Mourad, 2021).

Nilai kekakuan material juga diketahui dapat meningkatkan ketahanan terhadap pembebanan dinamis yang dapat diperoleh dengan pemilihan tube yang memiliki ketebalan dinding yang lebih besar. Getaran yang terjadi pada tube dapat diminimalisasi dengan pemasangan struktur penahan tube (*tube support*) yang memadai (Pettigrew & Taylor, 2003). Untuk meningkatkan kekuatan pada desain sambungan las *fillet* perlu menghindari adanya sudut yang tajam yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan yang dapat diperoleh dengan membuat sambungan las dengan ukuran kaki las yang simetris dan dengan sudut yang landai serta menghindari terjadinya takik terutama pada tepi mahkota las (Mourad et al., 2004). Bagian tepi dari kaki las merupakan daerah utama sebagai inisiasi retak yang sering terjadi dalam pengelasan busur listrik dengan adanya konsentrasi tegangan yang timbul dari perubahan geometri dan terdapatnya tegangan sisa dengan arah tarik. Bentuk tepi mahkota las dengan sudut yang landai dapat diperoleh dengan cara melakukan penggerindaan atau dengan cara memanaskan kembali menggunakan elektroda tungsten yang dapat dilakukan dalam proses pengelasan *gas tungsten arc welding*.

4. SIMPULAN

Tube mengalami retak *fatigue* pada daerah sambungan las yang diawali dari dinding sisi luar tube yang kemudian menjalar ke bagian dalam hingga terjadi patah secara keseluruhan. Kegagalan sambungan las disebabkan oleh beban dinamis (vibrasi) dari mekanisme membuka dan menutupnya katup pengaman tekanan kerja. Dengan luas area perambatan siklus *fatigue* yang sangat kecil dibandingkan dengan luas area sisa patahan menunjukkan bahwa tube mengalami tegangan nominal yang cukup besar yang merupakan efek dari lonjakan tegangan yang terjadi akibat respon dari katup yang tidak cukup cepat membuka ketika tekanan fluida melampaui desain yang diizinkan dan atau mekanisme menutupnya katup yang terlampaui cepat. Metode yang paling efektif untuk meningkatkan umur pakai komponen terhadap beban *fatigue* adalah dengan melakukan pengembangan terhadap detail prosedur fabrikasi yang bertujuan untuk mengeliminasi terdapatnya daerah yang dapat menjadi konsentrasi tegangan dan meminimalkan terjadinya lonjakan tegangan yang tinggi pada komponen tube instrumentasi dengan mengembangkan desain katup agar memiliki respon membuka dengan cepat dan menutup secara perlahan serta meminimalkan nilai lendutan yang terjadi pada material tube dengan cara membuat struktur penahan (*pipe support*) yang memadai. Disamping itu dengan adanya kecenderungan terjadinya retak saat proses solidifikasi pada pengelasan baja tahan karat austenitik maka pemeriksaan terhadap sambungan las perlu dilakukan terhadap kemungkinan adanya cacat retak terutama yang terbuka ke permukaan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, D. F., Martins, R. F., & Cardoso, J. B. (2017). Numerical simulation of residual stresses induced by TIG butt-welding of thin plates made of AISI 316L stainless steel. *Procedia Structural Integrity*, 5, 633–639. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.032>.
- Alyousif, O. M., & Nishimura, R. (2010). A hydrogen embrittlement mechanism for sensitized types 304, 316 and 310 austenitic stainless steels in boiling saturated magnesium chloride solutions. *Corrosion Science*, 52(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.07.016>.
- American Society for Metals. (2005). *ASM Handbook-Fatigue and Fracture* (Vol. 19). ASM International.
- American Society for Metals. (2018). *ASM Handbook-Failure Analysis and Prevention. Failure Analysis and Prevention*, 1061–1077. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.a0005695>.
- American Society for Testing and Materials E92. (2004). Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. *ASTM International*, 82(Reapproved 2003), 1–9.
- ASTM Standard. (2015). E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *ASTM International*, 07(Reapproved 2015), 1–22.
- Babu, M. N., Dutt, B. S., Venugopal, S., Sasikala, G., Bhaduri, A. K., Jayakumar, T., & Raj, B. (2010). On the anomalous temperature dependency of fatigue crack growth of SS 316(N) weld. *Materials Science and Engineering A*, 527(20), 5122–5129. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.075>.
- Ceramics, A., Precision, W. S., Hardness, A. B., Hardness, V., Hardness, S., Hardness, K., & Hardness, S. (2012). *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials 1. C*, 1–43. <https://doi.org/10.1520/E0384-11.2>.
- Deshmukh, S., & Dhamangaonkar, P. (2023). Materials Today : Proceedings Coupled CFD-FEA simulation of bulging tube failure in hot temperature zone. *Materials Today: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.014>.
- Fu, J. W., Yang, Y. S., Guo, J. J., & Tong, W. H. (2008). Effect of cooling rate on solidification microstructures in AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Technology*, 24(8), 941–944. <https://doi.org/10.1179/174328408X295962>.
- Galbally, D., García, G., Hernando, J., Sánchez, J. D. D., & Barral, M. (2015). Analysis of pressure oscillations and safety relief valve vibrations in the main steam system of a Boiling Water Reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 293, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.08.005>.
- He, L., Akebono, H., & Sugeta, A. (2018). Effect of high-amplitude loading on accumulated fatigue damage under variable-amplitude loading in 316 stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 116(June), 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.045>.
- Hussaini, S. M., Singh, S. K., & Gupta, A. K. (2014). Formability and fracture studies of austenitic stainless steel 316 at different temperatures. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(2), 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.05.001>.
- Johan Singh, P., Mukhopadhyay, C. K., Jayakumar, T., Mannan, S. L., & Raj, B. (2007). Understanding fatigue crack propagation in AISI 316 (N) weld using Elber's crack closure concept: Experimental results from GCMOD and acoustic emission techniques. *International Journal of Fatigue*, 29(12), 2170–2179. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.12.013>.
- Kant, R., Mittal, R., Kumar, C., Rana, B. S., Kumar, M., & Kumar, R. (2018). Fabrication and characterization of weldments AISI 304 and AISI 316 Used in industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18475–18481. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.189>.
- Li, G., Cai, Q., Lu, X., Zhu, X., & Xu, S. (2022). Failure analysis of cracking in the welded joints of hydrogen reformer outlet pigtail tubes. *Engineering Failure Analysis*, 137(March), 106257. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106257>.
- Li, J., Cao, T., Zhang, C., Cheng, C., & Zhao, J. (2022). Failure analysis of reheater tubes in a 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler. *Engineering Failure Analysis*, 137(February), 106285. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106285>.
- Li, Y., Chen, H., Pan, Z., Liang, H., Wang, Z., Feng, Z., Li, Z., & Kuang, Y. (2022). Failure analysis of superheater tubes in an air quenching cooler waste heat boiler. *Engineering Failure Analysis*, 131(November 2021), 105869. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105869>.
- Ling, J., Chen, Y., Wang, B., Chen, C., Song, F., Ye, Y., & Wang, Y. (2019). Failure analysis of 304H stainless steel convection tube serviced in an ethylene cracking furnace. *Engineering Failure Analysis*, 97(October 2017), 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.019>.
- Liu, M., Ni, Z., Du, C., Liu, Z., Sun, M., Fan, E., Wang, Q., Yang, X., & Li, X. (2021). Failure investigation of a 304 stainless steel geothermal tube. *Engineering Failure Analysis*, 129(May), 105694. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105694>.
- Liu, Y., Qu, Y., Chang, F., & Li, S. (2021). Failure analysis of heat exchange tubes in hydrogenation unit. *Engineering Failure Analysis*, 129(September), 105718.

- <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105718>.
- Moslemi, N., Redzuan, N., Ahmad, N., & Hor, T. N. (2015). Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties. *Procedia CIRP*, 26, 560–564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.010>.
- Mourad, A. H. I., Alghafri, M. G., & Zeid, O. A. A. (2004). Stable crack extension through AISI 4340 steel: Experimental investigation. *Key Engineering Materials*, 261–263(I), 207–212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.261-263.207>.
- Nishimura, R., & Alyousif, O. M. (2009). A new aspect on intergranular hydrogen embrittlement mechanism of solution annealed types 304, 316 and 310 austenitic stainless steels. *Corrosion Science*, 51(9), 1894–1900. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.01.031>.
- Ostovan, F., Shafiei, E., Toozandehjani, M., Mohamed, I. F., & Soltani, M. (2021). On the role of molybdenum on the microstructural, mechanical and corrosion properties of the GTAW AISI 316 stainless steel welds. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2115–2125. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.095>.
- Ou, G., Gu, Y., Yu, C., & Jin, H. (2022). Failure analysis of ammonium chloride salt coagulation corrosion of U-tube heat exchanger in diesel hydrogenation unit. *Engineering Failure Analysis*, 137(March), 106264. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106264>.
- Payam, A. F., Payton, O., Picco, L., Moore, S., Martin, T., Warren, A. D., Mostafavi, M., & Knowles, D. (2019). Development of fatigue testing system for in-situ observation of stainless steel 316 by HS-AFM & SEM. *International Journal of Fatigue*, 127(February), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.05.015>.
- Pettigrew, M. J., & Taylor, C. E. (2003). Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: An overview - Part 1: Flow, damping, fluidelastic instability. *Journal of Fluids and Structures*, 18(5), 469–483. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.08.007>.
- Prasad Reddy, G. V., Sandhya, R., Valsan, M., & Bhanu Sankara Rao, K. (2008). High temperature low cycle fatigue properties of 316(N) weld metal and 316L(N)/316(N) weld joints. *International Journal of Fatigue*, 30(3), 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.03.009>.
- Redutskiy, Y., Camitz-Leidland, C. M., Vysochyna, A., Anderson, K. T., & Balycheva, M. (2021). Safety systems for the oil and gas industrial facilities: Design, maintenance policy choice, and crew scheduling. *Reliability Engineering and System Safety*, 210(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107545>.
- Sajith, S., Shukla, S. S., Murthy, K. S. R. K., & Robi, P. S. (2020). Mixed mode fatigue crack growth studies in AISI 316 stainless steel. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 80(November), 103898. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103898>.
- Shankar, V., Mariappan, K., Sandhya, R., & Laha, K. (2016). Understanding low cycle fatigue and creep-fatigue interaction behavior of 316 L(N) stainless steel weld joint. *International Journal of Fatigue*, 82, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.003>.
- Singh, R., Agrahari, S., Yadav, S. D., & Kumar, A. (2021). Microstructural evolution and mechanical properties of 316 austenitic stainless steel by CGP. *Materials Science and Engineering A*, 812(March), 141105. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141105>.
- Song, X., Cui, L., Cao, M., Cao, W., Park, Y., & Dempster, W. M. (2014). A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel. *Energy Conversion and Management*, 81, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.021>.
- Song, X. G., Wang, L. T., Park, Y. C., & Sun, W. (2015). A Fluid-structure Interaction Analysis of the Spring-Loaded Pressure Safety Valve during Popping off. *Procedia Engineering*, 130, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.178>.
- Steel, A. A. (2008). *Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubing for A 262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels of Steel Products less Steel Tubes*. 2–7.
- Suresh Kumar, T., Nagesha, A., Mariappan, K., & Kumar Dash, M. (2021). Deformation and failure behaviour of 316 LN austenitic stainless steel weld joint under thermomechanical low cycle fatigue in as-welded and thermally aged conditions. *International Journal of Fatigue*, 149(March), 106269. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106269>.
- Thomas, D., & Mourad, A. I. (2021). Failures and leak inspection techniques of tube-to-tubesheet joints : A review. *Engineering Failure Analysis*, 130(September), 105798. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105798>.
- Vander Voort, & Baldwin, W. (2004). Metallography and Microstructures Handbook. *ASM International*, 9, 2733. <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>.
- Wu, Z., Zhang, K., Zhou, C., Zhou, Z., Zhang, W., Bao, F., Zheng, J., & Zhang, L. (2021). Warm deformation

- enhances strength and inhibits hydrogen induced fatigue crack growth in metastable 304 and 316 austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 818(April), 141415. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141415>.
- Zhai, J. hui, Sun, B. bei, & Zhou, Y. (2021). Failure analysis on 304 stainless steel tube of semi water gas preheater in coal chemical plant. *Engineering Failure Analysis*, 125(March), 105443. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105443>.
- Zhang, B., Haghshenas, A., Zhang, X., Zhao, J., Shao, S., Khonsari, M. M., Guo, S., & Meng, W. J. (2020). On the failure mechanisms of Cr-coated 316 stainless steel in bending fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 139(February), 105733. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105733>.