

Analisis Patah Lelah Pipa Cold Superheater Boiler PLTU 2 Banten – Labuan

Andika Widya Pramono

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

Email : andika_pram@yahoo.com

Ari Yulianto

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

Abstract

Boilers (Boiler) is a major component in the plant in which there are pipes steam boiler that serves to drain the water to be heated by the flame or hot gases to be steam. Boiler pipes are arranged into a single entity, starting from the steam drum, the combustion chamber (furnace / burner), superheater and economizer. The existing pipe in the boiler is a vital component, because the pipe is used as a container to drain the vapor or liquid throughout the existing system with high operating temperatures. It depends on the type of material engineering digunakan. Pipa boiler operating at high temperature and pressure in the long term is a problem that often occurs is in the form of leaks that resulted in the power plant should cease to operate as it did on 2 Banten Labuan power plant. Boiler pipe leakage at this plant occurs in areas of cold pipe boiler superheater in the form of fracture mechanics and surface defects due to the weld metal splashes. To overcome this, a boiler pipe to be analyzed by observing the microstructure, chemical composition analysis and micro hardness tester with Vickers method to determine the cause of the leak. In the sample cold pipe fracture failure occurs superheater tired (fatigue failure) that is indicated on the beach mark (the beach) and striation. From the results shows that the chemical composition of the material cold pipe superheater in accordance with the standard specifications (ASTM A210 Grade C), so that failure and damage of all pipes that are not investigated due to the specifications of the material are not standardized.

Keywords: Boiler, Boiler Pipe, leakage, power plant 2 Banten-Labuan

1. PENDAHULUAN

Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) terdapat beberapa komponen utama yang menyusun PLTU tersebut, seperti ketel uap (*boiler*), turbin, kondensor, generator dan lain-lain. Apabila salah satu dari komponen tersebut rusak maka akan mengakibatkan PLTU tersebut tidak dapat beroperasi dengan baik bahkan kerja dari PLTU tersebut harus dihentikan agar tidak terjadi kerusakan pada PLTU tersebut.

Ketel uap merupakan salah satu komponen utama pada PLTU yang berfungsi untuk merubah fasa yaitu dari fasa cair menjadi fasa gas sehingga menghasilkan uap kering yang akan digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Setelah turbin bergerak maka putaran turbin akan digunakan untuk menggerakkan generator sehingga dapat menghasilkan listrik.

Pada ketel uap di PLTU 2 Banten-Labuan sering terjadi kerusakan terutama pada pipa-pipa ketel uap (*boiler tubes*) seperti kebocoran dan pecah. Kebocoran dan pecahnya pipa-pipa ketel uap tersebut dapat terjadi karena beberapa hal, seperti terjadi temperature operasi yang berlebih (*overheating*) akibat adanya lapisan kerak pada area dalam dan luar pipa, patah mekanik (*fracture mechanics*), cacat permukaan, korosi, erosi, abrasi dan lain-lain pada tube boiler. Beberapa penyebab kerusakan yang mungkin terjadi adalah dari segi faktor beban dinamis, konsentrasi tegangan tinggi dan pengelasan adalah patah mekanik (*fracture mechanic*) dan cacat permukaan akibat terpercik logam lasan. Oleh karena itu perlu melakukan pembahasan lebih lanjut mengenai proses dan penyebab terjadinya kerusakan tersebut.

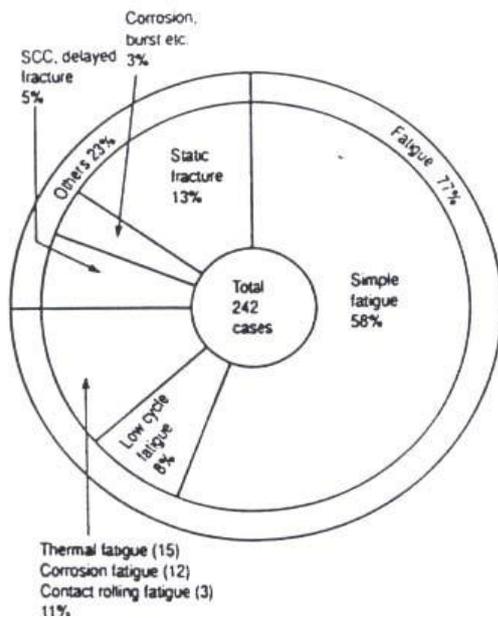
Diharapkan dengan penelitian yang dilakukan dapat mengetahui kesesuaian material sampel pipa yang mengalami kerusakan dengan spesifikasi standar dan menganalisis kerusakan yang terjadi pada pipa ketel uap *superheater* yang mengalami kebocoran pada pipa ketel uap (*boiler*) di PLTU 2 Banten-Labuan pada area pipa *cold superheater boiler*.

2. KAJIAN LITERATUR

2.1 *Fatigue Failure*

2.1.1 Karakteristik Kelelahan Logam

Kelelahan (*Fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan (patah) pada komponen akibat beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah). Diperkirakan 50%-90% (lihat gambar 2.1) kegagalan mekanis adalah disebabkan oleh kelelahan.



Gambar 1. Distribusi mode kegagalan^[1].

Kegagalan lelah adalah hal yang sangat membahayakan, karena terjadi tanpa petunjuk awal. Kelelahan mengakibatkan patah yang terlihat rapuh, tanpa deformasi pada patahan tersebut. Pada skala makroskopik, permukaan patahan dapat biasanya dikenal dari bentuk bidang perpatahan, ada bagian yang halus akibat gesekan yang terjadi sewaktu retak merambat dan daerah kasar, perpatahan ulet terjadi pada waktu penampang tidak menerima beban. Seringkali perkembangan retakan ditandai oleh sejumlah cincin atau "garis pantai" (*beach mark*), bergerak ke dalam dari titik di mana

kegagalan mulai terjadi. Karakteristik kelelahan yang lain yaitu, bahwa suatu kegagalan biasanya terjadi pada bagian dimana terdapat konsentrasi tegangan, seperti sudut yang tajam, atau takik, atau pada tempat dimana terdapat konsentrasi tegangan metalugis seperti inklusi.

Terdapat tiga faktor dasar yang diperlukan agar terjadi kegagalan lelah. Ketiga hal tersebut adalah (1) tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi, (2) variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar, dan (3) siklus penerapan tegangan yang cukup besar. Selain itu masih terdapat sejumlah variable-variabel lain, yakni : konsentrasi tegangan, korosi, suhu, kelebihan beban, struktur metalurgis, tegangan-tegangan sisa, dan tegangan kombinasi, yang cenderung untuk mengubah kondisi kelelahan.

Modus kegagalan komponen atau struktur dapat dibedakan menjadi 2 katagori utama yaitu:

1. Modus kegagalan quasi statik (modus kegagalan yang tidak tergantung pada waktu, dan ketahanan terhadap kegagalannya dinyatakan dengan kekuatan).
2. Modus kegagalan yang tergantung pada waktu (ketahanan terhadap kegagalannya dinyatakan dengan umur atau *life time*).

Jenis-jenis modus kegagalan quasi statik yaitu:

1. Kegagalan karena beban tarik.
2. Kegagalan karena beban tekan.
3. Kegagalan karena beban geser.

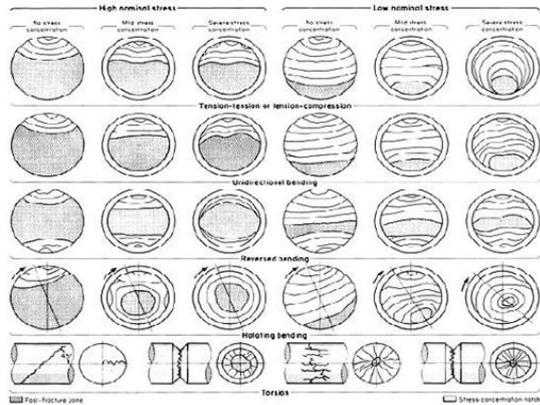
Patahan yang termasuk jenis modus kegagalan ini adalah patah ulet dan patah getas. Sedangkan jenis-jenis modus kegagalan yang tergantung pada waktu yaitu:

1. Kelelahan (patah lelah).
2. Mulur.
3. Keausan.
4. Korosi.

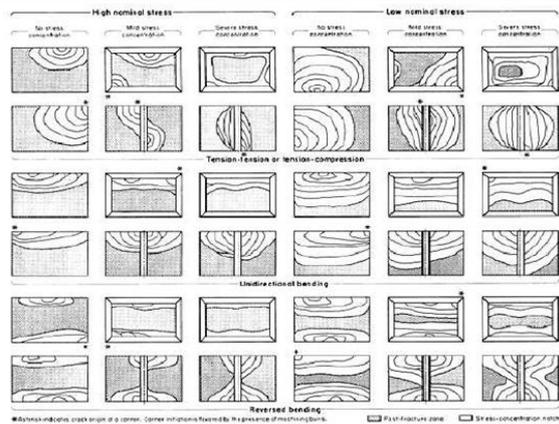
Pelopop dalam penelitian mengenai kelelahan logam adalah Wohler (Jerman) dan Fairbairn (Inggris) tahun 1860. Pengamatan yang lebih mendetail terhadap kelelahan logam, dilakukan sejak 1903 oleh Ewing dan Humparey yang mengarah pada lahirnya teori 'Mekanisme Patah Lelah'. Hingga saat ini, mekanisme patah lelah adalah terdiri atas 3 tahap kejadian yaitu:

1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack inisiation*).
2. Tahap penjalaran retakan (*crack propagation*).
3. Tahap akhir (*final fracture*).

Pada Gambar 2. dibawah ini ditunjukkan secara skematis penampilan permukaan patahan dari kegagalan lelah pada berbagai kondisi pembebanan.



(a)



(b)

Gambar 2. Skematis permukaan patahan lelah dari (a) penampang bulat dan (b) penampang persegi pada berbagai kondisi pembebanan^[1]

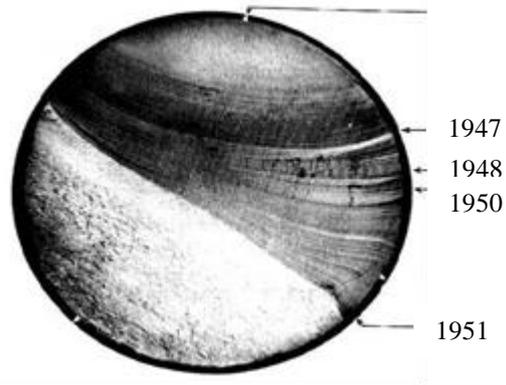
Karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi 2 yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop.

❖ Karakteristik Makroskopis

Karakteristik makroskopis dari kelelahan logam adalah sebagai berikut:

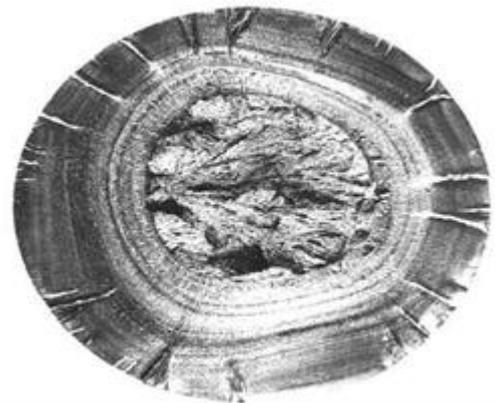
1. Tidak adanya deformasi plastis secara makro.
2. Terdapat tanda 'garis-garis pantai' (*beach marks*) atau *clam shell* atau *stop/arrest*

marks, seperti yang ditunjukkan pada gambar. 3. dibawah ini :



Gambar 3. Permukaan patah lelah pada poros

3. Terdapat '*Ratchet marks*' seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. dibawah ini :



Gambar 4. Permukaan patah lelah dari baut akibat beban tarik

Ratchet marks menjalar kearah radial dan merupakan tanda penjalaran retakan yang terjadi bila terdapat lebih dari satu lokasi awal retak, ratchet marks ini merupakan pertemuan beach marks dari satu lokasi awal retak dengan *beach marks* dari lokasi lainnya.

Tanda garis-garis pantai (*beach marks*) yang merupakan tanda penjalaran retakan, mengarah tegak lurus dengan tegangan tarik dan setelah menjalar sedemikian hingga penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan beban yang bekerja, maka akhirnya terjadilah patah akhir atau patah statik. Luas daerah antara tahap penjalaran retakan dan tahap patah akhir secara kuantitatif dapat menunjukkan besarnya

tegangan yang bekerja. Jika luas daerah tahap penjalaran retakan lebih besar daripada luas daerah patah akhir, maka tegangan yang bekerja relatif rendah, demikian sebaliknya. Tahap satu terjadinya kelelahan logam yaitu tahap pembentukan awal retak, lebih mudah terjadi pada logam yang bersifat lunak dan ulet tetapi akan lebih sukar dalam tahap penjalaran retakannya (tahap II), artinya logam-logam ulet akan lebih tahan terhadap penjalaran retakan. Demikian sebaliknya, logam yang keras dan getas, akan lebih tahan terhadap pembentukan awal retak tetapi kurang tahan terhadap penjalaran retakan.

Tahapan pembentukan awal retak dan penjalaran retakan dalam mekanisme kelelahan logam, membutuhkan waktu sehingga umur lelah dari komponen atau logam, ditentukan dari ke-2 tahap (lihat Gambar 5.) tersebut (*total fatigue life, NT = fatigue initiation, Ni + fatigue propagation, Np*). Fase-fase yang terjadi selama kejadian kelelahan logam tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 5. Fase-fase Kegagalan lelah (*fatigue*)

❖ Karakteristik Mikroskopis

Karakteristik mikroskopis dari kelelahan logam adalah sebagai berikut:

1. Pada permukaan patahan terdapat striasi (*striations*).
2. Permukaan patahan memperlihatkan jenis patah transgranular (memotong butir) tidak seperti jenis patah intergranular seperti yang terjadi pada kasus SCC (*stress corrosion cracking*) atau mulur (*creep*).

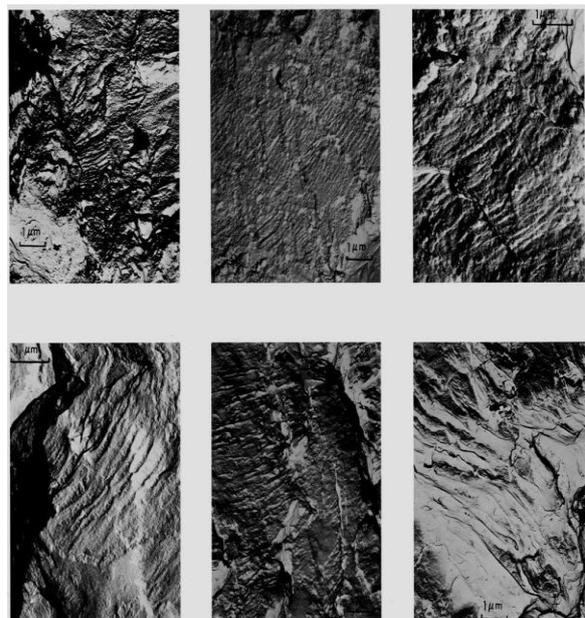
Striasi adalah garis halus yang ada pada permukaan yang akan merambat pada siklus beban. Garis striasi terjadi akibat pertumbuhan retakan yang disusul pengumpulan retakan secara plastis dilanjutkan dengan penutupan retakan akibat turunnya tegangan (lihat Gambar 6). Persamaan striasi dan *beach marks* adalah sebagai berikut:

1. Keduannya menunjukkan posisi ujung retak yang terjadi setiap saat sebagai fungsi dari waktu siklik.
2. Keduanya berasal dari lokasi awal retak yang sama.
3. Keduanya memiliki arah yang sama (*parallel ridges*).
4. Keduanya tidak hadir pada logam-logam yang terlalu keras atau terlalu lunak.

Perbedaan striasi dan *beach marks* adalah sebagai berikut:

1. Ukuran striasi adalah mikroskopis ($1 \div 100 \mu$) dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.
2. Ukuran beach marks adalah makroskopis ($> 1000 \mu$ atau 1 mm) dan dapat dilihat dengan mata telanjang.

Striasi mewakili majunya ujung retakan yang bergerak setiap satu siklus pembebanan, sedangkan beach marks mewakili posisi dari ujung retakan ketika beban siklik berhenti untuk satu perioda tertentu. (satu beach mark dapat terdiri atas ratusan bahkan ribuan buah striasi).

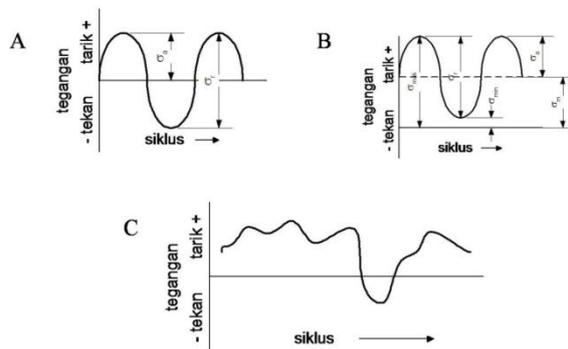


Gambar 6. Contoh dari striasi pada baja karbon

2.1.2. Siklus Tegangan

Kelelahan logam dapat terjadi karena berbagai macam kondisi pembebanan, termasuk tegangan berfluktuasi, regangan berfluktuasi, temperature berfluktuasi (*fatik thermal*), atau dalam kondisi lingkungan korosif atau temperature tinggi. Kebanyakan kegagalan pemakaian terjadi sebagai akibat tegangan-tegangan tarik. Tiga

jenis siklus tegangan yang umum terjadi diperlihatkan pada Gambar 7. berikut :



Gambar 7. Siklus tegangan lelah. (a) Tegangan balik; (b) tegangan berulang; (c) siklus tegangan acak atau tak teratur^[2]

Gambar 7. menggambarkan jenis-jenis siklus yang tegangan yang dapat menyebabkan kelelahan. Gambar (a) menggambarkan siklus tegangan lengkap yang berbentuk sinusoidal, dimana fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (*mean*) nol dengan amplitudo konstan atau beban tegangan bolak-balik (*reversed stresses*). Gambar tersebut adalah keadaan ideal yang dihasilkan oleh mesin fatik balok putar R.R. Moore dan dianggap sebagai putaran poros dengan kecepatan konstan tanpa beban berlebih. Untuk siklus tegangan tipe demikian, tegangan maksimum dan minimum sama besarnya. Tegangan minimum merupakan tegangan terendah aljabar pada suatu siklus. Tegangan tarik dianggap positif, dan tegangan tekan dianggap negative. Gambar (b) menggambarkan suatu siklus “tegangan berulang”, dengan tegangan maksimum σ_{maks} dan tegangan minimum σ_{min} tidak sama, dimana fluktuasi tegangan berkisar suatu rata-rata (*mean*) tidak sama dengan nol tetapi dengan amplitudo konstan atau beban tegangan berulang (*repeated stresses*). Keduanya adalah tegangan tarik. Suatu siklus tegangan dapat terdiri dari tegangan maksimum dan minimum dengan tanda berbeda atau keduanya berupa tekanan. Gambar (c) menggambarkan suatu siklus tegangan yang rumit, dimana kedua pertukaran dan rata-rata beban berubah, bisa secara acak maupun berpola tertentu atau beban tegangan tidak beraturan (*random stresses*), yang mungkin terdapat pada suatu bagian tertentu, seperti pada sayap pesawat yang menerima beban berlebih periodik yang tak terduga besarnya disebabkan oleh hembusan udara yang keras.

Siklus tegangan berfluktuasi, terdiri dari 2 komponen : tegangan rata-rata atau tegangan tetap σ_m , dan tegangan bolak-balik atau tegangan beragam σ_a .

2.1.3 Aspek Metalurgis pada Kelelahan Logam

Kelelahan logam diawali dengan pembentukan awal retak dan dilanjutkan dengan penjarangan retakan hingga komponen mengalami patah. Lokasi awal retak pada komponen atau logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklik adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum dan atau pada titik daerah dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Oleh karena itu untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen merupakan suatu hal yang cukup sulit, hal ini disebabkan oleh banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelahnya. Faktor-faktor tersebut adalah :

- ❖ **Pembebanan:**
 - Jenis beban: uniaksial, lentur, puntir.
 - Pola beban: periodik, random.
 - Besar beban (besar tegangan).
 - Frekwensi siklus beban.
- ❖ **Kondisi material.**
 - Ukuran butir.
 - Kekuatan.
 - Penguatan dengan larutan padat.
 - Penguatan dengan fasa ke-2.
 - Penguatan regangan.
 - Struktur mikro.
 - Kondisi permukaan (*surface finish*).
 - Ukuran Komponen.
- ❖ **Proses pengerjaan.**
 - Proses pengecoran.
 - Proses pembentukan.
 - Proses pengelasan.
 - Proses pemesinan.
 - Proses perlakuan panas.
- ❖ **Temperatur operasi.**
- ❖ **Kondisi lingkungan.**

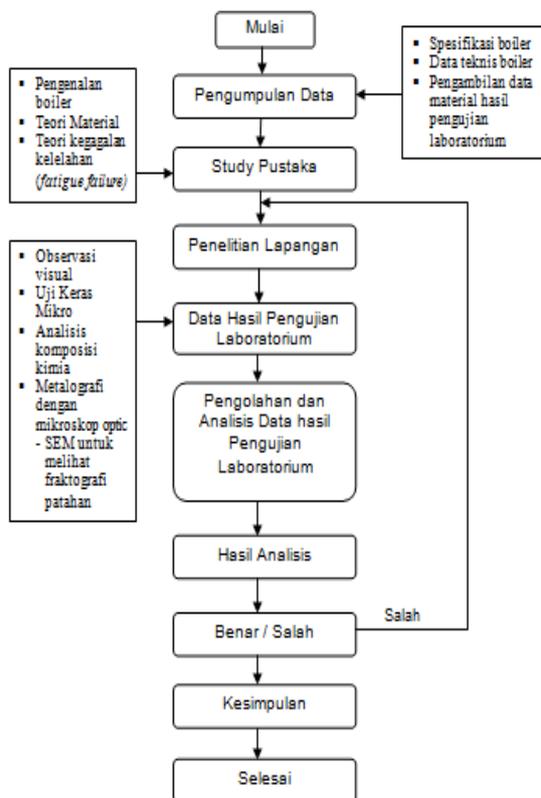
3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian dilakukan di PLTU 2 Banten-Labuan Unit Pembangkitan Lontar. Dalam penelitian ini penulis menggunakan metode deskriptif dimana metode deskriptif yang digunakan penulis memiliki tujuan untuk melakukan pengembangan, karena dalam skripsi

ini penulis melakukan analisa terhadap kerusakan tube Boiler untuk mengetahui terjadinya kerusakan tube boiler baik dari sisi dalam maupun dari sisi luar pipa boiler. Data-data penelitian didapat dengan pengarah, observasi langsung, wawancara, studi literatur dan pengujian laboratorium.

Beberapa pengujian laboratorium yang dilakukan untuk mengetahui kerusakan pada sampel pipa yang mengalami kerusakan meliputi pengamatan visual, pengujian makrostruktur, pengujian metalografi, uji komposisi kimia dengan menggunakan alat spark spectrometer, uji kekerasan vickers dan *scanning electron microscope*(SEM).

Dalam teknik analisis data penulis mencari hubungan antara data-data yang diperoleh setelah dilakukan karakterisasi secara metalurgi dengan informasi sistem operasi dan kondisi lingkungan dalam pipa-pipa ketel uap di PLTU 2 Banten-Labuan.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pengamatan visual

Pengamatan visual dilakukan pada area pipa superheater yang mengalami kerusakan. Pengamatan visual dapat mengidentifikasi jenis beserta posisi pengujian yang akan dilakukan. Area pipa superheater yang mengalami kerusakan kemudian didokumentasikan dengan kamera digital.

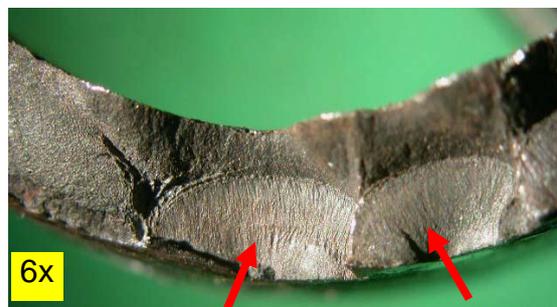


Gambar 9. Permukaan patah dari sampel pipa yang ditandai dengan anak panah

Pada gambar 9. terlihat bahwa terdapat retak yang berasal dari diameter luar pipa tersebut. Awal retak diperlihatkan dari diameter luar (tanda panah).

Pengujian makrografi

Dengan pengujian makrografi, area terjadinya awal retakan dapat diobservasi pada perbesaran yang lebih tinggi dibandingkan pengamatan secara visual, sehingga informasi yang diperlukan untuk menjawab penyebab kerusakan akan lebih mendukung.



Gambar 10. Makrografi dari sampel pipa (Gambar 9.) dengan perbesaran 6x

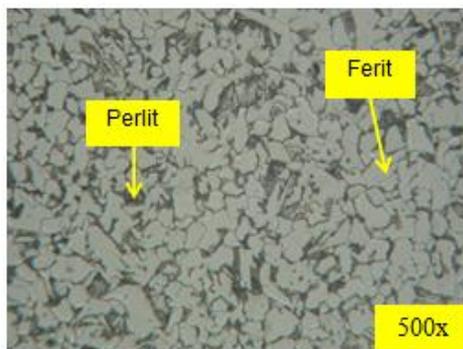


Gambar 11. Perbesaran lebih besar dari permukaan patah (*fracture*) yang ditunjukkan oleh Gambar 10 dengan perbesaran 12x

Pada Gambar 10 struktur makrografi dari sampel pipa 2 dengan perbesaran 6x terlihat bahwa retak diindikasikan dari diameter luar dan terlihat tanda pantai (*beach mark*) dan juga striasi yang ditandai oleh tanda panah yang menunjukkan asal dan arah kerusakan. Perbesaran lebih besar juga dilakukan pada permukaan patah (*fracture*) Gambar 11 dengan perbesaran 12x yang menunjukkan dengan jelas terdapat striasi pada permukaan patah yang merupakan karakteristik atau identitas dari kegagalan lelah (*fatigue failure*). Gambar 10 dan 11 tersebut dapat dibandingkan dengan morfologi permukaan *fatigue failure* (patah lelah) pada material karbon steel, seperti terlihat pada Gambar 6.

Pengujian metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui morfologi mikrostruktur dari pipa yang mengalami kerusakan tersebut dengan menggunakan mikroskop optik perbesaran 50x sampai dengan 500x dengan menggunakan mikroskop metaloplan sehingga dapat menyelidiki lebih detail awal patahan (*fracture*) dan daerah disekelilingnya dengan mikrostruktur.

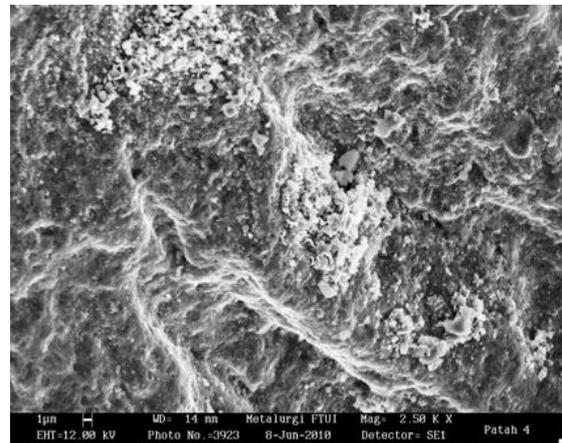


Gambar 12. Mikrostruktur dari sampel pipa dengan perbesaran 500x

Pada Gambar 12. mikrostruktur sampel pipa dengan perbesaran 500x memperlihatkan bahwa mikrostruktur sampel pipa terdiri dari campuran ferit dan perlit yang merupakan jenis mikrostruktur dari baja karbon. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terjadi perubahan fasa karena suhu tinggi yang mendukung *fatigue failure* (patah lelah).

Scanning Electron Microscope (SEM)

Metode SEM digunakan untuk melihat morfologi mikrostruktur permukaan material yang mengalami kerusakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui lebih dalam pada luas permukaan patah pada sampel pipa 2 terutama pada awal patah dengan SEM untuk menemukan informasi berharga yang tidak dapat diperoleh dengan *microscope optic*. Perbesaran SEM bisa mencapai 600.000 kali



Gambar 13. Striasi ditemukan pada permukaan patah (*fracture*) dari hasil SEM pada sampel pipa

Dari hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) terlihat bahwa permukaan patah pada sampel pipa terdapat *striation* yang merupakan awal dari *fatigue failure* (patah lelah) pada pipa tersebut (gambar 4.5). Bukti ini mendukung hasil makrografi yang menemukan adanya tandai pantai (*beach mark*) dan *striation* (striasi).

Analisis Komposisi Kimia

Analisis komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan komposisi kimia pada material sampel pipa apakah sesuai dengan standar yang berlaku dan karakter penggunaannya pada temperature dan tekanan tinggi. Dari hasil pengujian komposisi kimia tersebut akan disesuaikan dengan standar komposisi kimia ASTM. Berdasarkan spesifikasi

material, SA 210 C (ASME specification) merupakan *seamless medium carbon steel* untuk boiler tube. Berikut adalah tabel perbandingan komposisi kimia material sampel pipa dengan komposisi kimia spesifikasi standar SA 210 C.

Tabel 1. Perbandingan komposisi kimia dari sampel pipa dengan spesifikasi standar

Benda Uji / Speciment	Hasil / Result		ASTM A – 210 Grade C / ASTM A 210 M-02 Grade C standard
	Kode / Code	Unsur / Element (Wt %)	
Tube no.1 (brokan tube)	Fe	98.06	Ballance
	C	0.25	0.35 max.
	Si	0.25	0.10 min.
	Mn	0.95	0.29-1.06
	Cr	0.048	-
	Ni	< 0.018	-
	Mo	< 0.0018	-
	Cu	0.16	-
	Al	< 0.00	-
	V	0.012	-
	W	0.075	-
	Ti	< 0.00	-
	Nb	0.0031	-
	B	> 0.018	-
	S	0.024	0.035 max
	P	< 0.0027	0.035 max

Hasil dari analisis komposisi kimia yang diambil pada daerah normal (tabel 4.1), menunjukkan kesesuaian dengan spesifikasi standar (ASTM A 210 Grade C) sehingga kegagalan dan kerusakan dari semua sampel pipa yang diselidiki tidak disebabkan oleh spesifikasi dari material pipa yang tidak standar.

Analisis Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengkonfirmasi tingkat kekerasan material sampel pipa dengan klasifikasi tertentu dan untuk mengevaluasi kemungkinan perubahan nilai kekerasan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers. Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel pipa dengan mengambil 6 titik indentasi.



Gambar 14. Lokasi uji kekerasan pada sampel pipa dengan 6 titik indentasi.

Tabel 2. Nilai hasil uji kekerasan dari sampel pipa

No.	HARDNESS VALUE, HV	
	Sampel pipa	Standar
1	204	ASTM A-210 Grade C/ ASTM A 210 M-02 Grade C Nilai Kekerasan Max. 188 HV
2	185	
3	173	
4	170	
5	160	
6	166	

Catatan :

1. Testing Machine : Frank Finotest
2. Object : Superheater Tube
3. Material : Baja Karbon
4. Metoda test: Hardness Vickers (HV)
5. Permukaan: Polished/ Etched by Nital 2%
6. Load : 5 kgf
7. Waktu : 15 detik
8. Standar : SNI 19-0409-1989

Dari gambar dan tabel uji kekerasan pada sampel pipa dapat dilihat bahwa nilai kekerasan yang berada pada daerah permukaan yang mengalami kegagalan baik fracture (patah) dan terkena logam lasan memiliki nilai kekerasan yang cukup tinggi melebihi standar yang telah ditentukan oleh ASTM, dibandingkan dengan nilai kekerasan yang diuji pada daerah lain yang jauh dari daerah yang mengalami kegagalan. Hal ini di sebabkan karena adanya konsentrasi tegangan yang berkumpul pada daerah yang

mengalami patahan sehingga nilai kekerasan pada permukaan tersebut meningkat.

Kesimpulan

1. Akar penyebab kegagalan sampel pipa 1 dan 2 adalah karena *fracture mechanics* (patah mekanik). Dimana pada pipa sampel 1 terjadi kegagalan patah puntir dan pada sampel pipa 2 terjadi *fatigue failure* (patah lelah).
2. Kerusakan yang terjadi pada sampel pipa 3 disebabkan oleh percikan logam las selama pengelasan yang kemudian menciptakan kawah dan lubang.
3. Banyaknya cacat las seperti cacat permukaan memiliki kontribusi untuk mengurangi umur pakai dari pipa tersebut.
4. Dari hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa material pipa cold superheater sesuai dengan spesifikasi standar (ASTM A210 Grade C), sehingga kegagalan dan kerusakan dari semua tabung yang diselidiki tidak disebabkan oleh spesifikasi material.

Daftar Pustaka

Akuan, Abrianto. *Diktat Kuliah Kelelahan Logam*. Bandung : Universitas Jenderal Achmad Yani. 2007

Dieter, George E. *Metalurgi Mekanik*. Edisi ketiga. Terjemahan oleh Sriati Djaprie. Jakarta : Erlangga. 1986

George F. Vander Voort. Failure Analysis Service Problem. (online). http://www.georgevandervoort.com/frac_fail_pdf/Service_Problems.pdf. diakses 3 September 2012: 10.27 WIB)