

ANALISA KEGAGALAN DARI PIPA KETEL DENGAN MATERIAL SA-106 GR.B DI PABRIK PUSRI

Bharata¹, Nugrasyah.A² dan Razak.C³

¹ Program Insinyur Indonesia, Universitas Sriwijaya, Palembang

² Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang

³ Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

Corresponding author : bharata@pusri.co.id

ABSTRAK: Dalam kaitannya dengan terjadinya ledakan pada unit Ketel Pendukung, maka telah dilakukan pengumpulan bukti dan pekerjaan pemeriksaan yang mencakup parameter dan kondisi operasional, pipa yang bengkok, sampel retakan dari pipa sirip yang pecah untuk dilakukan analisa kegagalan. Penyebab utama dari pipa yang pecah ini adalah fenomena luluh yang merupakan faktor utama menurunkan kehandalan logam. Penyebab dari pipa yang buntu dan pengoperasian awal yang cepat memicu meningkatnya temperatur karena kurangnya aliran. Karakteristik dari penurunan mikrostruktur juga mendukung adanya kegagalan yang disebabkan pemanasan berlebih dalam jangka pendek.

Kata Kunci: Analisa Kegagalan, SA-106 GR.B, Pemanasan Berlebih Dalam Jangka Pendek

ABSTRACT: In allusion to the explosion of Auxiliary Boiler having a series of evidence collection and inspection jobs which includes collecting operation condition and parameters, bent-pipe, sampling the explosion fracture of fin-tube had been carried out firstly to do a failure analysis. The most probable cause of the unexpected these pipe SA-106 GR.B failure is yielding phenomenon which is the major factor causing unreliability in boilers. The causes of pipe blockaging and a rapid start-up will lead to high metal temperature because lack of steam flows. Characterizing the degree of microstructural degradation can also help to confirm short-term overheating damage modes.

Keywords: Failure Analysis, SA-106 GR B, Short Term Overheating

PENDAHULUAN

Ketika air dididihkan dalam sebuah pipa yang mempunyai laju perpindahan panas yang seragam sepanjang pipa tersebut dalam kondisi yang menghasilkan keadaan kesetimbangan dinamis, berbagai titik di sepanjang pipa akan bersentuhan dengan air dingin, air mendidih, uap basah, uap jenuh dan uap kering. Gradien suhu antara dinding pipa dan fluida di dalam tabung memberikan gaya penggerak perpindahan panas pada semua titik.

Pecahnya suatu material yang disebabkan oleh panas berlebih umumnya melibatkan perpatahan sepanjang jalur memanjang, biasanya dengan beberapa deformasi plastis yang terdeteksi sebelum perpatahan. Port & Herro memberikan penjelasan singkat tentang kegagalan yang disebabkan oleh panas berlebih dalam jangka pendek. Panas berlebih jangka pendek terjadi ketika suhu pipa naik melebihi batas desain dalam waktu singkat sehingga pengoperasian boiler terganggu. Kondisi yang

menyebabkan panas berlebih dalam jangka pendek, umumnya adalah akibat sumbatan pada sebagian permukaan pipa atau seluruhnya dan aliran cairan pendingin yang tidak mencukupi karena kondisi yang terganggu dan akibat panas dari sisi api yang berlebihan.

Tujuan

Makalah ini membahas mode kegagalan yang terjadi pada pipa ketel uap di Pabrik Pusri pada saat proses *start-up* dan berbagi ide untuk meningkatkan proses pabrik dan juga pemeliharannya saat perbaikan tahunan. Sebagai tinjauan pustaka, penjelasan singkat akan memberikan beberapa indikasi utama yang terjadi pada kegagalan dan menganalisis terlebih dahulu dampaknya. Sistem pembangkit uap berada dalam pipa bersirip yang memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini

Tabel 1 Spesifikasi Pipa

Diameter	Tebal	SCH	Material	Jenis
48,26mm (1,9")	0.508 cm (0,2")	80	SA-106 Gr B	Fin- Tube

Pipa dililit secara heliks dan bergerigi, kemudian dianil atau dinormalisasi. Koil pipa dapat dioperasikan pada tekanan 1500 psig (105 kg/cm²G) di saluran masuk dan keluar dengan suhu uap 325°C (598K), yang menghasilkan keluaran setara dalam koil sebesar 102.000.000 BTU per jam.



Gambar 1. Kondisi pipa yang bengkok terdampak gaya dorong dari kebocoran

Tinjauan Pustaka

Desain Koil Pemanas

Desain unit pembangkit uap menyeimbangkan masukan panas dari pembakaran bahan bakar gas dengan pembentukan dan pemanasan uap kering. Panas yang diserap diubah menjadi uap pada suhu jenuhnya, sebagai fungsi dari tekanan ketel uap yang beroperasi. Dalam lintasan konveksi, suhu gas buang dikurangi lebih lanjut oleh pemanasan berlebih atau pemanasan ulang uap dalam *superheater* dan *reheater*. Untuk mengekstrak lebih banyak panas dan meningkatkan efisiensi termal secara keseluruhan, *economizer* memanaskan terlebih dahulu air umpan ketel uap hingga suhu mendekati titik didihnya. Gas buang bergerak melalui pemanas awal udara, yang memanaskan udara pembakaran, lalu naik ke cerobong asap.

Rumus untuk perpindahan panas kondisi tunak adalah sebagai berikut:

$$\frac{Q}{A_0} = U_0 \Delta T \tag{1}$$

di mana Q/A_0 (dalam Btu/jam·ft²) adalah fluks panas per satuan luas, U_0 (dalam Btu/jam·ft²·°F) adalah koefisien perpindahan panas keseluruhan, dan ΔT (dalam derajat Fahrenheit) adalah perbedaan suhu yang menggerakkan aliran panas. Ada kondisi yang tidak diinginkan yang menggerakkan sistem ke analisis lain yang menggunakan persamaan resistansi termal individual untuk aliran panas. Dan sistem akan berjalan dari gas buang ke uap dan juga gradien suhu individual, efeknya adalah peningkatan suhu logam tabung. Secara sederhana, penurunan koefisien perpindahan panas sisi uap yang disebabkan oleh aliran yang berkurang, akan menyebabkan peningkatan suhu logam tabung.

Tegangan Kerja

Ketika suatu dinding pipa atau silinder tipis dikenai tekanan dari sisi dalam, maka akan terbentuk tegangan melingkar dan memanjang pada sisi dinding pipa.

Tegangan melingkar dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\sigma_h = \frac{P \cdot D}{2t} \tag{2}$$

dimana,

σ_h = tegangan melingkar (MPa, psi)

P = tekanan internal pada pipa (MPa, psi)

D = diameter internal pipa (mm, in)

T = tebal pipa (mm, in)

dan ketika menggunakan parameter temperature, tegangan pada pipa yang tetap akan menjadi sebagai berikut,

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot dT \tag{3}$$

dimana,

σ = tegangan (MPa, lb/in²)

α = koefisien muai linear (m/moK, inch/inchoF)

E = modulus elastisitas dari material (MPa)

dT = perubahan temperatur (°C)

Tegangan luluh (σ_y) tidak lain hanyalah sifat material di mana fenomena luluh mulai terjadi. Tidak ada hubungan langsung antara tegangan luluh dengan tegangan pembebanan apa pun. Untuk mendefinisikan kegagalan, teori Tresca menggabungkan tegangan melalui lingkaran Mohr untuk menemukan tegangan geser maksimum. Jika tegangan geser maksimum (τ_{max}) lebih besar dari setengah tegangan luluh (σ_y), maka sistem

dinyatakan gagal. Jika kurang, maka diperoleh Faktor Keamanan (SF) yang dapat dinyatakan sebagai

$$SF = \frac{\sigma_y}{2 \cdot \tau_{max}} \quad (4)$$

Untuk teori kegagalan Von Mises, semua tegangan yang bekerja akan bekerja secara kombinasi dengan menggunakan rumus tegangan Von Mises. Jika tegangan Von Mises ekuivalen lebih besar dari tegangan luluh, maka sistem akan gagal. Jika tidak, maka Faktor Keamanan dapat dinyatakan sebagai berikut

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{design}} \quad (5)$$

Material

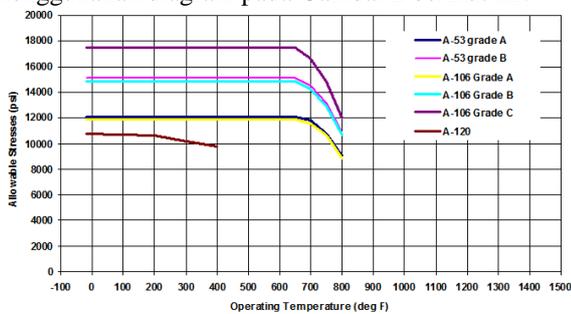
Standar spesifikasi dari material pipa adalah ASME SA-106 Grade B steel (1) dengan komposisi kimia sebagai berikut,

Tabel 3 Komposisi kimia dari SA-106 GR. B

Mat'l	C	P	Cr	Mo	S
SA106 Gr.B	0,3% (mid-CS)	0.035% (max)	0.4%	0.15%	0.035% (max)

Source: ASTM A 106 – 99e1

Temperatur operasional dan tegangan yang diizinkan pada dinding pipa dapat diperkirakan dengan menggunakan diagram pada Gambar 2 berikut ini.



$$1 \text{ psi (lb/in}^2\text{)} = 6,894.8 \text{ Pa (N/m}^2\text{)} ; T(^{\circ}\text{C)} = 5/9[T(^{\circ}\text{F)} - 32]$$

Gambar 2 Tegangan yang diizinkan pada berbagai material Carbon Steel

Kegagalan Akibat Pemanasan Berlebih Jangka Pendek

Kegagalan pemanasan berlebih jangka pendek adalah kegagalan yang terjadi ketika satu insiden atau sejumlah kecil insiden memaparkan pipa baja pada suhu yang sangat tinggi (ratusan derajat di atas normal) hingga terjadi deformasi atau luluhan. Kondisi seperti hilangnya aliran pendingin dan suhu gas ketel uap yang berlebihan sering terjadi pada kegagalan ini. Viswanathan menyatakan kondisi abnormal yang menyebabkan kegagalan sebagai berikut, penyumbatan internal pipa,

hilangnya sirkulasi pendingin atau level air rendah, hilangnya pendingin karena kegagalan pipa di hulu, pembakaran yang berlebihan atau tidak merata atau pembakar bahan bakar ketel uap. Ketiga penyebab yang pertama menyebabkan kekurangan pasokan dan pipa dapat tersumbat oleh puing-puing pemasangan atau perbaikan, peralatan, tembakan serbuk baja, oksida praboiler, endapan dari air yang terbawa atau disemprotkan, atau bagian perangkat keras internal yang longgar seperti pelat bekas, baut dan mur yang menyebabkan kondisi terburuk seperti mendekati suhu gas dalam ruang pembakaran.

Efek-efek Metalurgi

Secara umum, panas berlebih dalam jangka pendek melibatkan deformasi pipa yang cukup besar dalam bentuk pemanjangan logam dan pengurangan luas dinding atau penampang. Kegagalan tersebut menunjukkan adanya penipisan dinding dan penonjolan lokal yang mendahului patahan sebenarnya, karena kekuatan material berkurang pada suhu yang lebih tinggi.

Perubahan pengukuran diameter dalam dan luar pipa dapat menjadi indikator panas berlebih. Peningkatan sebesar 5% atau lebih merupakan indikasi overheating jangka pendek. Selain itu, perubahan mikrostruktur yang signifikan pada baja karbon akan terjadi ketika baja mengalami panas berlebih, dan perubahan ini dapat digunakan untuk memperkirakan suhu logam pada saat terjadi kegagalan.

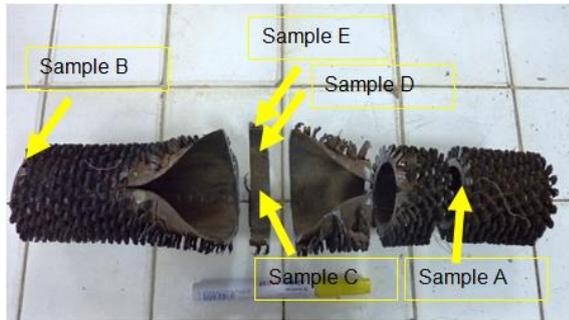
METODE PENELITIAN

Sampel dari pipa yang pecah sepanjang 30,5 cm (1 kaki) dipotong untuk dianalisis dan diperiksa secara metalografi. Potongan pipa pecah dipotong, dan daerah yang terkait dengan inisiasi retakan diperiksa di bawah stereoskop optik dan mikroskop.

Analisis kimia akan dilakukan untuk mengungkap informasi untuk memprediksi fasa material pada suhu tinggi menggunakan perhitungan karbon ekuivalen seperti di atas.

Perhitungan sifat mekanik yang memanfaatkan perhitungan tegangan terhadap kegagalan diarahkan pada pengukuran kekerasan pada bibir sisi bawah, pada bibir, retak bukaan dan pada pipa.

Gambar 3 Pipa yang pecah akibat pemanasan berlebih dalam waktu yang singkat



Sampel menunjukkan :

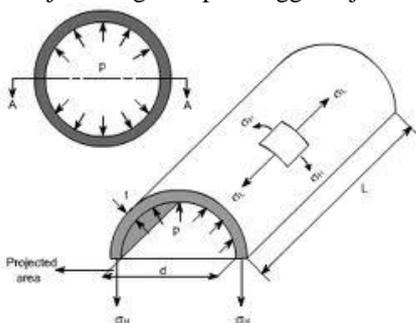
- A = Sisi dalam pipa (lokasi terjauh dari bagian yang pecah)
- B = Sisi melingkar (lokasi terjauh dari bagian yang pecah)
- C = Sisi yang beseberangan dan tegak lurus dengan area yang pecah
- D = Sisi yang mengalami transisi menuju deformasi plastis
- E = Sisi yang pecah dan terjadi deformasi plastis

HASIL DAN DISKUSI

Start-up dan Kegagalan Proses

Pada bagian koil ketel, *fin-tube* dipasang pada pipa utama dan aliran uap dialirkan dari bawah ke sisi atas ketel. Pada saat penyalaan terjadi ketidaknormalan dimana tingkat suplai gas meningkat dari 80-85% dan *Riser Temperature* mencapai $\pm 750^{\circ}\text{C}$. Temperatur ini cukup berpotensi pada material SA-106 Gr.B untuk rusak dan pecah dalam jangka pendek. Untuk kriteria keagalannya sendiri, suhu antara $650-800^{\circ}\text{C}$ akan menghasilkan fenomena luluh akibat penurunan sifat mekanik dan perubahan fasa pada *fin-tube*. Bagian terlemah akan gagal setelah ledakan sehingga menghasilkan lebih banyak daripada creep dan jika sekeliling pipa lainnya mengalami peningkatan tekanan dan suhu yang cepat, retakan akan terjadi pada sambungan antara header dan pipa.

Kegagalan terjadi ketika tegangan kerja (*Hoop stress* dan *longitudinal stress*) diatas titik leleh telah tercapai dan kemudian terjadi dengan cepat hingga terjadi kegagalan.

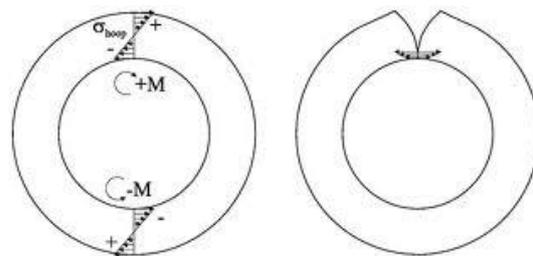


Gambar 4 Tegangan melingkar (kondisi normal)

Pada beberapa kondisi sebelum luluh, tegangan kerja (tegangan melingkar) meningkat dengan cepat karena diameter bertambah dan ketebalan berkurang dengan sangat cepat seperti yang dinyatakan pada Persamaan 2. Sebaliknya, untuk tegangan yang diizinkan, tegangannya menurun secara logaritmik seperti ditunjukkan pada Gambar 4, karena kenaikan suhu. Dapat dijelaskan sebagai

$$\sigma_{kerja} \gg \sigma_{diizinkan}$$

$$\sigma_{diizinkan} \approx 2/3 \text{ kekuatan Luluh (ASME II Part A)}$$



Gambar 5 Tegangan melingkar sebelum pecah

Selanjutnya, ketika σ_{kerja} mencapai titik leleh, dislokasi akan bergerak dan berlipat ganda, serta mengalami deformasi. Jika kekuatan tarik ultimat telah tercapai, akan terjadi inisiasi retakan pada permukaan material akibat perkalian tegangan terkonsentrasi dan lama kelamaan, tabung pada titik terlemah akan merambat hingga tabung rusak (lihat Gambar 6).

Sifat Mekanik

Pengukuran kekerasan dilakukan dengan menggunakan MicroVickers. Pengumpulan data diperiksa minimal 6 lekukan untuk setiap lokasi.

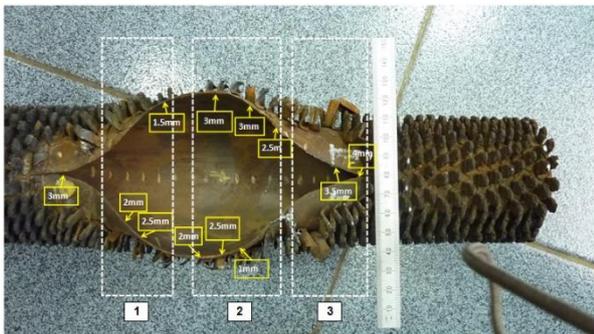
Seperti yang ditunjukkan data (lihat Tabel 5), terdapat peningkatan tren kekerasan rata-rata jika dikaitkan dengan lokasi keruntuhan. Semakin dekat ke bibir aligator, bahannya semakin keras. Hal ini membuktikan bahwa deformasi berperan dalam kegagalan, bukan mulur atau difusi secara bertahap. Dislokasi sepanjang butir berlipat ganda ketika waktu kegagalan mencapai batasnya.

Kondisi lain yang membuktikan kegagalan panas berlebih jangka pendek yang terjadi pada pipa adalah penebalan. Perubahan pengukuran ID dan OD pipa dapat menjadi indikator panas berlebih. Peningkatan sebesar 5% atau lebih merupakan indikasi overheating jangka pendek. Pengukuran dilakukan di beberapa lokasi untuk mengklasifikasikan derajat deformasi.

Tabel 5 Pengukuran Kekerasan

AREA	ASTM SA 106 GR.B)	t (MM)	% PENGURANGAN
1	5.08 mm (0,2")	1,5	
		2	
		2,5	
Rerata		2	60%
2		3	
		3	
		2,5	
		2,5	
		2	
		1	
Rerata	2.33	54.1%	
3	3,5		
	4		
Rerata	3.75	26.2 %	

Pengurangan ketebalan dalam jumlah besar yang ditunjukkan pada Tabel 6 membuktikan sepenuhnya bahwa peran deformasi lebih mendominasi dalam kegagalan yang dapat membuat kontur mulut kobra. Hal ini akan terjadi jika material tidak mempunyai kekuatan untuk menahan tekanan internal di dalam pipa. Pipa yang lebih tebal berarti memiliki kekuatan yang lebih rendah untuk menangani deformasi yang besar.



Kondisi Pipa Bagian Sisi Dalam (Pemeriksaan Fisik)

Untuk kualitas fluida (lihat Gambar 8), setelah diperiksa dari pipa sisi dalam, sisi pipa yang terkena kondisinya bersih berarti tidak ada tambahan kontaminan seperti sulfida, fosfat, dan lainnya yang terjadi selama pengoperasian. Viswanathan juga mengatakan bahwa fluida tersebut memiliki faktor kegagalan yang lebih kecil dibandingkan puing-puing atau media penyumbatan padat. Jadi, dari investigasi pabrik diketahui bahwa tidak ada masalah pengoperasian dengan sistem pengolahan air dan sumber air yang diolah tuntut digunakan dalam ketel.

Area yang terdeformasi telah menipis sebesar 60% (Gbr. 8) dibandingkan dengan ketebalan dinding aslinya (0,508 cm, atau 0,2 inci). Pecahnya pipa ketel uap biasanya dikenal dengan label bibir tipis (yang

berhubungan dengan panas berlebih dalam jangka pendek) untuk menggambarkan jumlah penipisan ($\pm 60\%$) dan peningkatan diameter lebih dari 10% pada area yang mengembang. Ada ciri-ciri overheating jangka pendek namun, tidak adanya kerak, sisa lumpur, dan oksida di bagian dalam menunjukkan bahwa tidak terjadi panas berlebih dalam jangka panjang.

Tabel 6 Pengukuran Ketebalan Pipa Yang Pecah

No	Kekerasan (HV)				
	A	B	C	D	E
1	160	159	155	177	236
2	161	160	150	163	233
3	159	160	157	154	253
4	163	155	168	152	231
5	155	157	149	163	235
6	155	157	150	168	241
7			148	187	
8			153		
Rerata	158,8333	158	156,6	171,6	238,1667

Metalogri

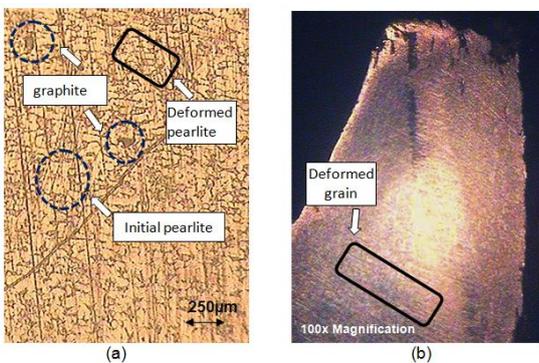
Oleh karena itu, untuk penjelasan metalografi, penampakan mulut kobra (lihat Gambar 6) dengan permukaan rekahan bertepi tipis dan pembengkakan yang cukup besar merupakan ciri khas dari tabung baja feritik yang telah rusak sebelum suhunya melebihi suhu kritis atas (Ac3). Namun, jika suhu pipa cukup tinggi untuk mengubah besi dalam baja dari ferit menjadi austenit, tidak akan ada "necking down" atau pengurangan ketebalan dinding pada tepi patahan yang terlihat. Struktur mikro baja akan dilakukan untuk memastikan bahwa suhu tabung sebelum kegagalan cukup tinggi untuk mengubah ferit menjadi austenit.

French menjelaskan tentang indikasi spesifik kegagalan yang disebabkan oleh panas berlebih yang cepat. Bentuk umum berbibir tipis yang terjadi pada retakan jangka pendek biasanya adalah retakan tarik transgranular yang terjadi pada suhu logam antara 650 hingga 870 °C (1200 hingga 1600 °F). Rekahan tarik suhu tinggi ini menunjukkan ciri makroskopis dan mikroskopis yang merupakan karakteristik pipa.

Pipa tersebut mengalami retakan sepanjang 20 cm (7,8 inci) dalam area deformasi 8,5 cm (3,34 inci). Letak kegagalan pada bagian terjauh susunan tabung boiler ditemukan karena kurangnya distribusi steam pada sisi tersebut sehingga harus dipasangi kondisi steam yang relevan pada seluruh tabung.

Struktur mikro yang dinormalisasi dari tabung jenis ini mengandung sekitar 60% perlit jika kandungan karbon berada pada batas spesifikasi yang tinggi. Dalam hal ini,

perlit masih terlihat di dekat tabung OD dan telah berubah bentuk. Grafitisasi, pada tahap awal transformasi, pelat karbida pada perlit berubah menjadi spheroid. Bola-bola tersebut kemudian menyatu membentuk grafit. Nodul grafit diidentifikasi dalam penelitian ini, dan satu-satunya karbida yang ditemukan sebagian besar berada di batas butir (Gambar 7.a). Dekarburisasi akibat panas berlebih dalam jangka pendek diduga bertanggung jawab atas munculnya grafit pada area bersirip sampel tempat terjadinya retakan. Butir-butir yang terdeformasi dan penampakan grafit yang diamati pada struktur mikro pada retakan terjadi dan kemungkinan besar butiran-butiran biasa di jauh dari tabung kegagalan mencatat dukungan terhadap panas berlebih jangka pendek dalam tabung ketel.



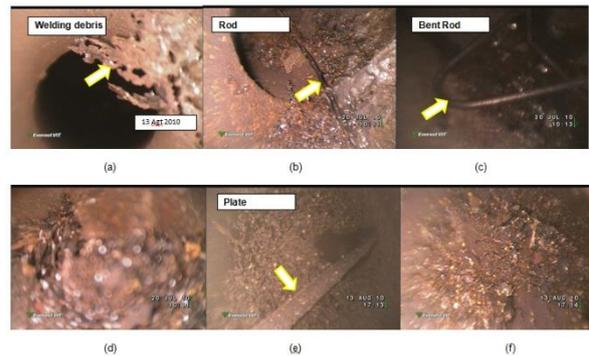
Gambar 7 (a) Mikrostruktur retakan; (b) Makrostruktur bibir retakan

Kegagalan mulur memang biasanya terjadi pada pipa. Namun, mulur juga dapat terjadi pada kondisi lain, dengan syarat laju pembakaran yang tinggi pada sisi api (OD) dan adanya endapan pada sisi air (ID), seperti pada kasus ini, dan hilangnya kekuatan akibat dekarburisasi. Namun dalam kasus ini, jika creep tidak ditampilkan berarti kewaspadaan masih menjadi perhatian utama karena penurunan sifat mekanik pada beberapa pipa.

Dipastikan bahwa bagian dari prosedur pemadaman boiler ini dapat mengakibatkan burner beroperasi setelah air dikeluarkan dari sistem. Para penulis percaya bahwa gas panas dari pembakar yang mengenai permukaan tabung tanpa air pendingin menyebabkan panas berlebih dalam jangka pendek.

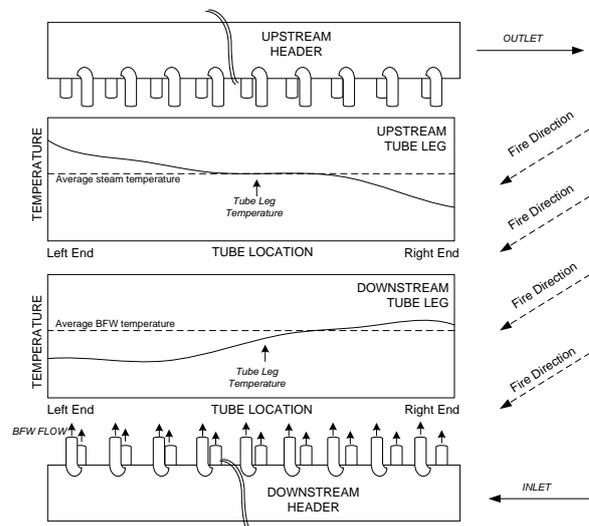
Penyebab Tambahan

Bukti mengejutkan yang ditemukan pada hasil tersebut adalah penyumbatan media aliran uap terletak pada header dan overfiring atau pembakaran tidak merata pada pembakar bahan bakar boiler ditunjukkan pada Gambar 8 di bawah. Viswanathan menyatakan kondisi abnormal tersebut sebagai salah satu penyebab kegagalan terjadi.

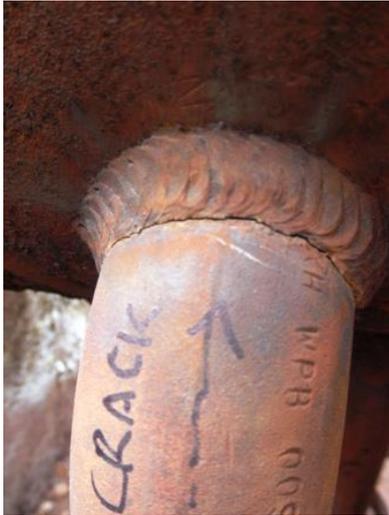


Gambar 8 Temuan pada pipa utama sisi bawah (bottom header) yang menghalangi aliran (terak las, kawat, plat, dll).

Ada tiga faktor yang mempengaruhi kegagalan pipa pada suhu tinggi: pembakaran, aliran uap, dan beban boiler. Kebanyakan pabrik merancang boiler dengan pembakar yang disusun di dinding depan dan/atau belakang. Ketika distribusi panas di dalam boiler tidak seragam: input burner dapat bervariasi, distribusi udara tidak seragam dan *slagging* serta *fouling* dapat terjadi. Efek langsung dari parameter pembakaran ini adalah variasi masukan panas ke masing-masing pipa. Jika digabungkan dengan perbedaan aliran uap antar pipa di dalam koil, variasi suhu uap yang masuk ke header dapat terjadi secara signifikan (Gambar 9).



Gambar 9 Variasi Temperatur dengan Berbagai Lokasi Pipa



Gambar 10 Retak yang Terjadi pada Sambungan Las di Pipa Utama Sisi Bawah

Perubahan beban boiler semakin memperburuk perbedaan suhu antara kaki tabung individual dan header massal. Saat beban boiler meningkat, laju pembakaran harus meningkat untuk mempertahankan tekanan. Selama transien ini, boiler untuk sementara waktu dipanaskan berlebihan untuk mengimbangi peningkatan aliran uap dan penurunan tekanan. Selama penurunan beban, laju pembakaran menurun sedikit lebih cepat daripada aliran uap di superheater dengan penurunan suhu outlet tabung yang dihasilkan relatif terhadap header massal. Sebagai konsekuensi dari gradien suhu ini, header mengalami tegangan lokal yang jauh lebih besar daripada yang terkait dengan tekanan uap dan dapat mengakibatkan retakan ligamen yang besar (Gambar 10). Fleksibilitas perpipaan uap dapat menyebabkan beban berlebihan ditransmisikan ke nosel outlet header. Tegangan ini mengakibatkan retakan yang dimulai secara eksternal pada nosel outlet ke las pelana header.

KESIMPULAN

Penggembungan dan keretakan pada pipa yang diamati disebabkan oleh panas berlebih jangka pendek. Kerak yang tebal tidak terbentuk di tabung bagian dalam, berarti hal ini menunjukkan murni akibat panas berlebih jangka pendek.

DAFTAR PUSTAKA

American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service. *American Society for Testing and Materials A 106*. West Conshohocken : American Society for Testing and Materials, 1999.

D.N, French. *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*. s.l. : John Wiley & Sons, 1983, pp. 155–165.

French, David N. ASM International®. *Failures of Boilers and Related Equipment*. s.l. : ASM International, 2003.

Sathyanathan, Dr V T.
<http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/78125.aspx>. <http://www.brighthub.com>. [Online] June 19, 2010. [Cited: September 28th, 2010.]

Short-Term Overheating. [book auth.] Herro, Harvey M. Robert D. Port. *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. s.l. : Mc-GrawHill.Inc, 1991

Steam. 38. New York : Babcock & Wilcox Co, 1972.

Viswanathan, Ramaswamy. *Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components*. USA : ASM International, 1995.