

Heat Transfer Effect of Reheater Tube Materials Steam Power Plant

M. Prihajatno*

Program Studi Mekanisasi Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Sorong
Jl. Kapitan Pattimura, Tanjung Kasuari-Suprau, Kota Sorong-Papua Barat 98401
Email : prihajatno.m16@gmail.com

ABSTRACT

Reheater tube is an installation for steam reheating output of turbine to work encouraging. Therefore need be heated again of steam to increase pressure and temperature so be used for drive turbine blades. Reheater tube last work for 54,000 hours. The method used of study to mechanical test and visual and microstructure observations. It is also used iterative method for temperature loads calculation occur in reheater tube. The result of iterative calculation obtained wall tube temperature $T_1 = 608.43$ °C, $T_2 = 618.18$ °C, $T_3 = 655.74$ °C and convection coefficient = $3.604,37$ W/m².°C. Based on mechanical strength of materials tube is 481.85 MPa, this is still above the minimum standards of material SA-213 T22 so that decrease was not significant. Visual observation accour oxidation corrosion and visible cavity in micro structure. Some spheroidized and decarburizing phenomena are also seen in microstructure materials. The phenomenon is due to high temperature and pressure at the long term.

Keywords : Heat transfer effect, reheater tube materials, spheroidized, decarburizing

Pendahuluan

Instalasi *reheater* dalam mesin boiler berperan untuk memanaskan kembali *steam* yang keluar dari turbin [1]. *Steam* yang keluar melalui saluran keluar turbin sudah menurun, sehingga perlu dilakukan pemanasan ulang agar menaikkan tekanan dan temperatur untuk dapat dimanfaatkan kembali memutar turbin kedua. Pada pipa *reheater* tekanan kerja *steam* sebesar 35,35 barg dan temperatur mencapai 542 °C [2]. Material yang bekerja pada beban tekanan dan temperatur tinggi tidak dapat dihindarkan dengan adanya *creep*, yaitu suatu fenomena dimana material mengalami deformasi secara permanen karena tegangan yang bekerja pada rentang waktu yang lama dan temperatur yang tinggi [3,4,5,6]. Adanya *creep* dapat mengakibatkan umur pakai pipa *reheater* terbatas, sehingga perlu diadakan evaluasi (*life assessment*) [7,8,9,10].

Pengaruh *heat transfer* pada pipa *reheater*, resistansi *oxide scale*, dan *pressure fluid* pada dinding pipa. Akibat ketebalan *oxide scale* mengakibatkan *overheating*, sehingga terjadi

Tekanan fluida memberikan tegangan dan regangan yang tinggi sehingga terjadi kegagalan material pipa [13,14]. Akslerasi peningkatan mulur lebih disebabkan oleh temperatur yang tinggi. Secara mikrostuktur terdapat daerah pemulihan batas butir dan rekristalisasi butiran ferit bertambah panjang seperti pada batas butiran *austenite* [4]. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kekuatan mekanis dan perubahan struktur mikro material pipa *reheater* yang telah beroperasi selama 54.000 jam, sehingga diketahui kualitas material sebagai dasar melakukan kegiatan *maintenance*.

Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan meliputi, perhitungan iterasi transformasi panas yang terjadi pada pipa *reheater* dan karakterisasi material dengan melakukan beberapa pengujian.

- Perhitungan iterasi mengacu pada data teknis pipa *reheater* pada kondisi nyata saat boiler beroperasi. Perhitungan iterasi untuk memperoleh temperatur dinding pipa saat bekerja secara riil

yang akan mempengaruhi sifat-sifat material pipa. Persamaan yang dipakai dalam perhitungan iterasi berikut:

Reynolds number (R_{ed}) [15].

$$\rho = \frac{\Delta P}{R.T} \quad (1)$$

$$\Delta P = \rho . g . \Delta h + \frac{\rho . V_r^2}{2} \quad (2)$$

$$R_{ed} = \frac{\rho . V_r . D_d}{\mu} \quad (3)$$

Nusselt number (Nu_d)

$$Nu_{ud} = 0,023 . R_{ed}^{0,8} . P_r^{0,4} \quad (4)$$

Koefisien perpindahan panas konveksi (h_i)

$$h_i = \frac{Nu_d . k_f}{D_d} \quad (5)$$

Fluk kalor per satuan luas [7].

$$\frac{Q}{A_o} = 300 . h_i \quad (6)$$

Temperatur dinding pipa (T)

$$T_1 = \left(\frac{Q}{A_o} \times \frac{r_3}{r_1 . h_i} \right) + T_s \quad (7)$$

$$T_2 = \left(\frac{\frac{Q}{A_o}}{\frac{k_d}{r_3 \ln(r_2/r_1)}} \right) + T_1 \quad (8)$$

$$T_3 = \left(\frac{\frac{Q}{A_o}}{\frac{k_m}{r_3 \ln(r_3/r_2)}} \right) + T_2 \quad (9)$$

ρ	=	Massa jenis fluida (kg/m^3)
ΔP	=	Perbedaan tekanan fluida (N/m^2)
R	=	Konstanta gas ideal ($\text{J.K}^{-1} . \text{mol}^{-1}$)
g	=	Gaya gravitasi (m/s^2)
Δh	=	Perbedaan ketinggian (m)
V_r	=	Kecepatan rata-rata aliran fluida (m/s)
μ	=	Viskositas dinamik (kg/m.s)
R_{ed}	=	Reynolds number
Nu_{ud}	=	Nusselt number
P_r	=	Prandtl number
h_i	=	Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W/m}^2 . \text{°C}$)
k_f	=	Konduktivitas termal fluida ($\text{W/m} . \text{°C}$)
k_m	=	Konduktivitas termal material ($\text{W/m} . \text{°C}$)
k_d	=	Konduktivitas termal deposit (karat) material ($\text{W/m} . \text{°C}$)
Q	=	Fluk kalor (W)
A_o	=	Luas penampang (m^2)
T_s	=	Temperatur kerja (°C)
T_1	=	Temperatur inside oksida (°C)
T_2	=	Temperatur inside metal (°C)
T_3	=	Temperatur outside metal (°C)
r_1	=	Jari-jari inside oksida (m)
r_2	=	Jari-jari inside metal (m)
r_3	=	Jari-jari outside metal (m)

- Pengujian tarik (*tensile strength test*) dimaksudkan untuk mengetahui kekuatan mekanis material. Proses pengujian tarik dilakukan pada kondisi temperatur kamar (27°C) untuk mengetahui kekuatan mekanis material setelah mendapatkan beban kerja saat boiler beroperasi. Standar yang digunakan pada pengujian dan ukuran spesimen uji adalah ASTM E-8M. Persamaan yang digunakan untuk menghitung tegangan kerja [16] :

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (10)$$

σ = Tegangan tarik uniaksial (MPa)

F = Gaya (N)

A_o = Luas penampang bidang tarik (mm^2)

- Pengamatan secara fisik dan mikro struktur material. Pengamatan secara fisik dengan melihat perubahan-perubahan fisik material pipa *reheater* baik perubahan bentuk maupun terjadinya korosi akibat transformasi panas dan tekanan. Pada pengamatan secara fisik dilakukan pengukuran-pengukuran pipa, untuk mengetahui perubahan yang terjadi. Pengamatan secara mikro struktur untuk melihat kejadian-kejadian perubahan struktur mikro material pipa *reheater* akibat panas dan tekanan yang dapat mengakibatkan cacat material secara mikro. Pengamatan secara mikro struktur dengan menggunakan mikroskop metalurgi.

Hasil dan Pembahasan

1. Transformasi panas pada pipa

Tabel 1. menunjukkan data teknis hasil pengukuran dan pengamatan terhadap pipa *reheater* yang telah beroperasi selama 54.000 jam. Untuk data fluida (*steam*) diambil dari standar hasil eksperimen [15].

Gambar 1. menunjukkan skema dinding pipa *reheater*. Pada gambar tampak material pipa *reheater* dengan lapisan deposit korosi (*oxide*) pada bagian dalam dan luar pipa. Jari-jari yang menunjukkan jarak antara garis sumbu pipa dengan lapisan oksida, dinding bagian dalam, dan dinding bagian luar dinyatakan dalam r_1 , r_2 , dan r_3 . Perhitungan metode iterasi dilakukan sebagai acuan kondisi kerja pipa *reheater* sebenarnya pada boiler. Temperatur dinding pipa yang dijadikan tolak ukur dalam perhitungan sisa umur pakai material pipa

reheater adalah T_1 , T_2 , dan T_3 . Hasil perhitungan metode iterasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Data teknik pipa reheater

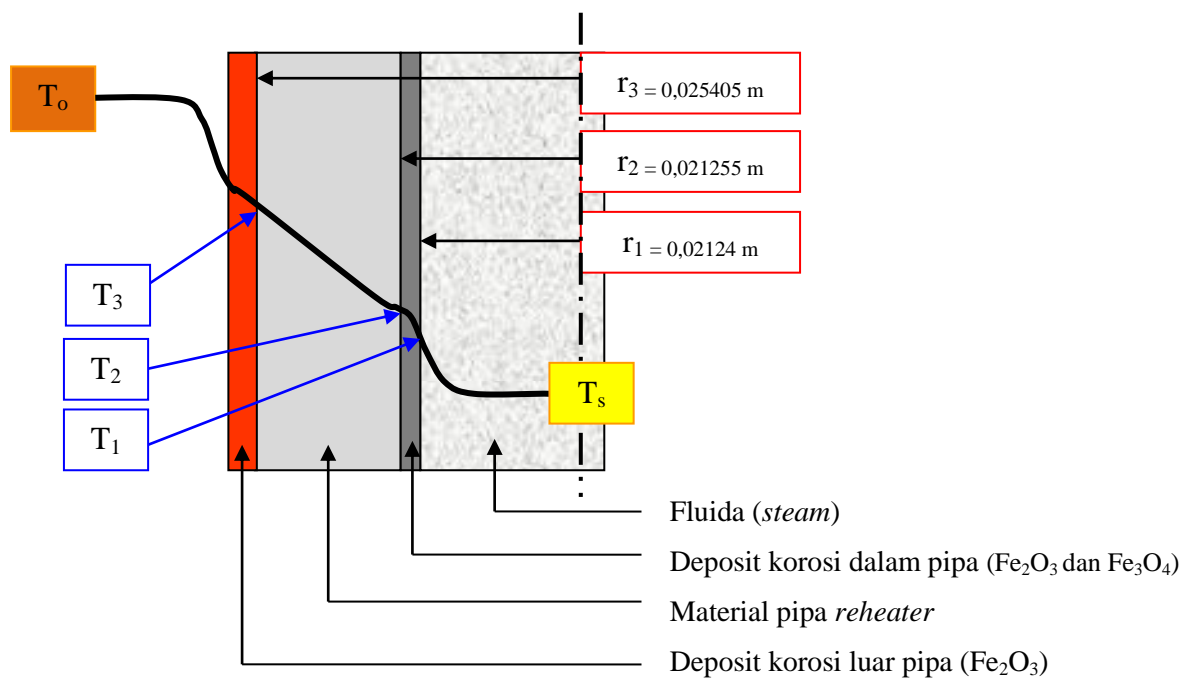
Data teknis pipa reheater	
Material	SA-213 T22
Tekanan masuk (P in)	30,7 Bar = 3,07 MPa
Temperatur operasi (T_s)	542 °C
Konduktivitas termal material (k_m) (French, 1983)	16,7 Btu/hr-ft-°F = 28,903 W/m.°C
Data pengukuran :	
Diameter luar (D_o)	50,81 mm = $5,081 \times 10^{-2}$ m
Diameter dalam (D_d)	42,49 mm = $4,249 \times 10^{-2}$ m
Ketebalan minimum (t)	3,52 mm = $3,52 \times 10^{-3}$ m
Deposit korosi :	
Tebal deposit	15 μ m = 0,015 mm = $1,5 \times 10^{-5}$ m
Konduktivitas termal deposit Fe_3O_4 (k_d) (Shinde, 2011)	0,369 W/m.°C
Data fluida (steam) [15] :	
Konduktivitas termal fluida (k_f)	0,06055 W/m.°C
Viskositas dinamik (μ)	$28,409 \times 10^{-6}$ kg/m.s
Prandle number (Pr)	1,0127

Tabel 2. Hasil perhitungan metode iterasi pipa reheater

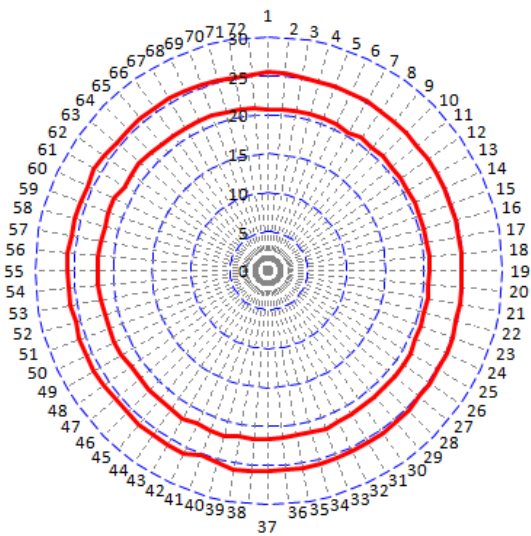
Fluk kalor tiap satuan luas Q/A_o (W/m ²)	Koefisien konveksi h_i (W/m ² .°C)	Temp. inside oksida T_1 (°C)	Temp. inside metal T_2 (°C)	Temp. outside metal T_3 (°C)
200.190,68	3.604,37	608,43	618,14	655,74

2. Perubahan bentuk fisik pada pipa

Hasil pengukuran ketebalan pipa mengelilingi pipa dengan interval sudut 5 derajat menghasilkan *run out* lingkaran pipa reheater. Berdasarkan gambar *run out* tersebut, terlihat ketebalan pipa reheater tidak seragam. Ketebalan minimum pipa reheater adalah 3,52 mm. Secara makro terlihat dengan jelas terjadi perubahan *roundness*, sehingga dapat dikatakan bahwa reheater telah mengalami degradasi material akibat dari pengaruh tekanan dan temperatur tinggi kerja dari boiler [14]. Lingkaran pipa reheater terlihat tidak lagi bulat, tetapi agak sedikit oval akibat terdegradasi. Gambar 2. menunjukkan *run out* pipa reheater.

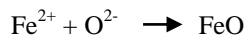
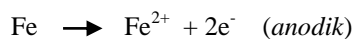


Gambar 1. Skema dinding pipa reheater

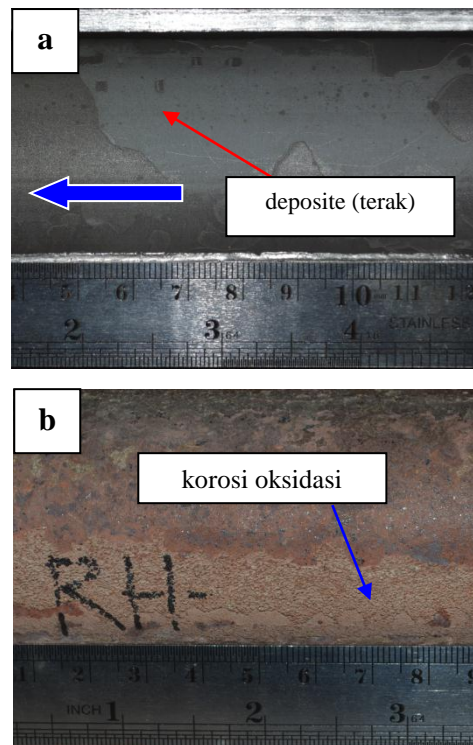


Gambar 2. Run out pipa reheater

Gambar 3. memperlihatkan penampang visual kedua dinding pipa reheater. Secara visual terlihat lapisan oksida yang terbentuk sebagai efek dari temperatur operasi kerja. Lapisan oksida tersebut terbentuk karena reaksi yang terjadi antara material pipa dengan masing-masing fluida yang bekerja pada kedua sisi. Fluida uap air jenuh (*saturated vapor*) dan fluida gas hasil pembakaran (*flue gas*) pada kedua dinding menghasilkan oksida yang berbeda. Kedua reaksi tersebut dapat menimbulkan penurunan kualitas (degradasi) pada pipa reheater. Reaksi yang terjadi pada material pipa reheater sebagai berikut [17]:



Sehingga



Gambar 3. Penampang dinding pipa reheater
(a) sisi bagian dalam (b) sisi bagian luar

Gambar 3a memperlihatkan terjadinya lapisan kerak pada bagian dalam pipa reheater. Terlihat secara visual lapisan deposit (terak) berwarna kelabu menempel menyelimuti dinding permukaan pipa. Reaksi antara dinding pipa dengan uap air jenuh (*saturated vapor*) akan menimbulkan lapisan oksida (*scale*) pada permukaan material. Oksida tersebut biasanya tumbuh membentuk berlapis-lapis dan dapat terlepas karena erosi akibat kecepatan aliran *steam*. Pada gambar tersebut terlihat lapisan oksida yang terkupas dari permukaan dinding. Fenomena yang terjadi pada permukaan dinding pipa reheater bagian dalam dinamakan dengan pelepasan lapisan (*exfoliation*) [5,7]. *Exfoliation* merupakan peristiwa terlepasnya lapisan *magnetite* pada kondisi operasional (saat *start-up*). *Exfoliation* merupakan permasalahan pada reheater, hal ini berhubungan dengan naiknya temperatur pada saat *start-up* dan tidak adanya *steam* yang mengalir. Lapisan *oxide* yang terlepas sangat berbahaya, karena dapat merusak sudu turbin apabila terbawa bersama aliran *steam*.

3. Perubahan kekuatan mekanis pipa

Tabel 3. menunjukkan sifat mekanis material pipa *reheater*. Berdasarkan tabel tersebut, nilai kekuatan tarik (*ultimate strength*) material pipa *reheater* lebih tinggi dari nilai kekuatan tarik minimum standar material SA-213 T22. Hal ini menunjukkan bahwa material pipa *reheater* belum mengalami penurunan kekuatan tarik yang signifikan. Pada sisi lain nilai *ductility* material pipa *reheater* menurun bila dibandingkan dengan nilai *ductility* standar material SA-213 T22. Kedua fenomena di atas dikarenakan oleh terbentuknya persipitasi karbida pada struktur akibat proses *spheroidized* sering terjadi pada material paduan Cr-Mo [6,7].

Tabel 3. Kekuatan mekanis material pipa *reheater* dan SA-213 T22

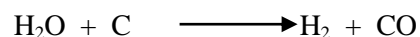
Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Ductility (%)
Pipa <i>reheater</i>	337,89	481,85	28,49
SA-213 T22 (ASME, 2010)	205 min	415 min	30

Perubahan kekuatan mekanis material dalam hal ini yang disebabkan oleh temperatur, terutama terjadinya slip (*sliding*) antar butiran (*grain*). Ketebalan dimensi material pada pembebanan dan temperatur tinggi sangat mempengaruhi terjadinya slip pada butiran [3,6]. Slip akan membentuk *cavity* yang secara mekanis akan mengurangi kekuatan material [7]. Pada sisi lain kekuatan material juga dipengaruhi oleh tingkat kelelahan material. Tingkat kelelahan material dapat disebabkan yang disebabkan oleh temperatur tinggi biasanya karena adanya tegangan sisa dan *creep*. Tegangan sisa dan *creep* akan menurunkan sifat mekanis material. Material yang telah bekerja pada temperatur tinggi akan mengalami kelelahan yang tajam, faktor mulur (*creep*) dan tegangan sisa sangat mempengaruhi kelelahan material [6].

4. Perubahan stuktur mikro material pipa

Gambar 4.c dan 4.f menunjukkan struktur mikro bagian dalam material pipa *reheater*. Terlihat adanya *cavity* yang cukup besar dekat dengan bagian permukaan bagian dalam pipa *Cavity* disebabkan oleh rongga yang membesar akibat terjadinya mekanisme slip pada batas butir oleh pengaruh tegangan dan temperatur [4]. *Cavity* akan merambat

seiring dengan terjadinya konsentrasi tegangan pada bagian tersebut. Selain terjadi *cavity* juga adanya fenomena *decarburizing*, yaitu hilangnya unsur karbon (C) karena proses oksidasi material dengan lingkungan sekitarnya. Ciri khusus terjadinya *decarburizing* pada *steam-side* adalah pada bagian permukaan material struktur ferit membesar akibat lepasnya unsur karbon, sedangkan perlit cenderung berkumpul (*colonies*) di bagian dalam. Reaksi kimia *decarburizing* material baja dengan *steam* di dalam pipa [7].

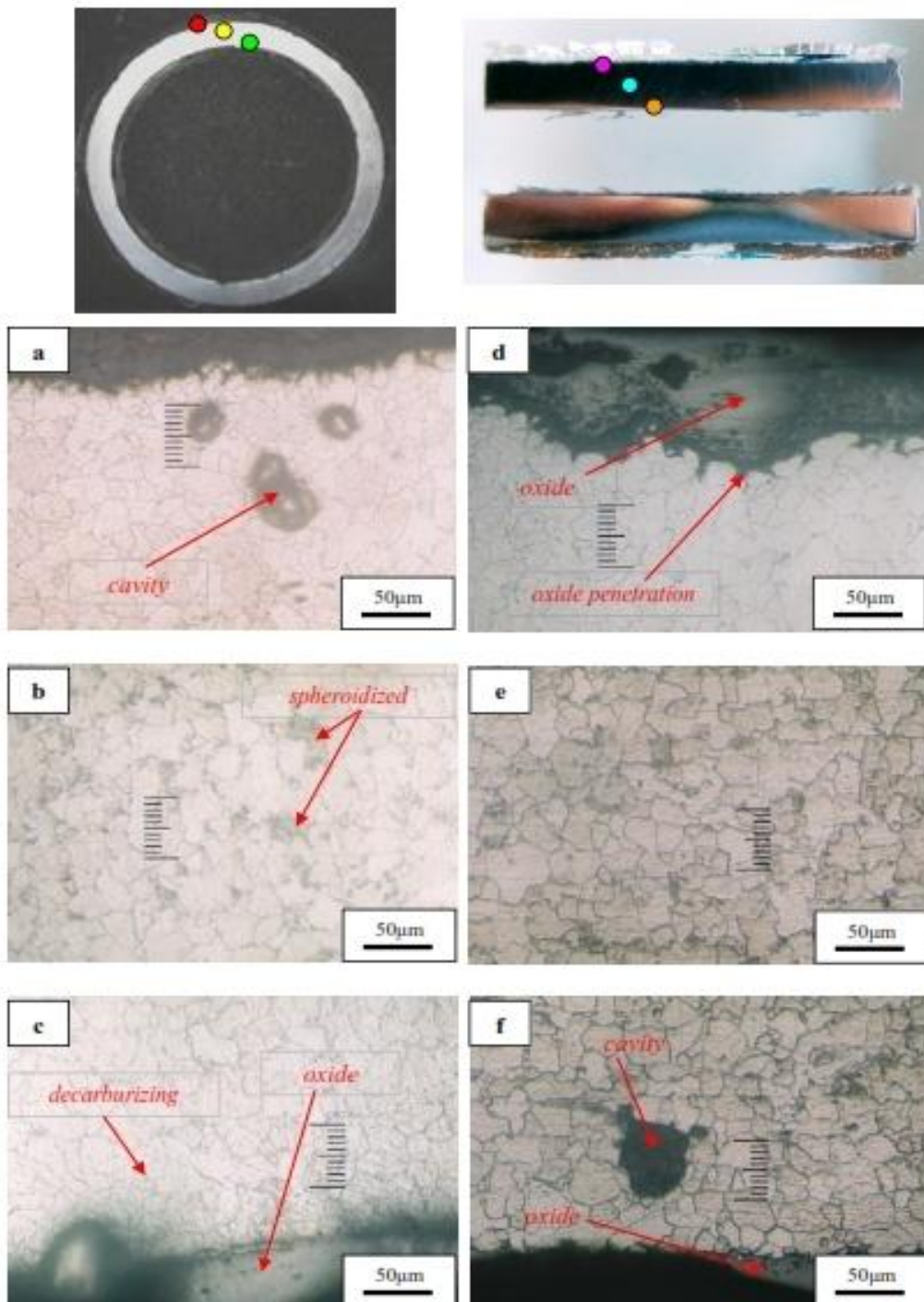


Pada permukaan terlihat oksida yang menempel dengan kuat, dan terdapat juga permukaan yang terbuka akibat dari terlepasnya oksida (*exfoliation*). Struktur bagian tengah pipa *reheater* (Gambar 4.b) terjadi fenomena *spheroidized*, yaitu berkumpulnya perlit pada bagian tertentu membentuk *colonies*. Hal ini mengakibatkan menurunnya kekerasan, karena perlit tidak menyebar secara merata. *Spheroidized* mengakibatkan *decomposition* karbida besi dalam ferit. Karbida besi akan mengubah morfologi struktur perlit asli menjadi partikel-partikel kecil karbida dan berkumpul secara bergerombol [5,6,7]. Mekanisme *spheroidized* disebabkan oleh penamasan pada temperatur di atas temperatur *eutectoid* yang berkepanjangan dan alternatif pendinginan lambat.

Gambar 4.b memperlihatkan permukaan dinding bagian luar pipa *reheater* yang terserang korosi oksidasi. Korosi oksidasi terjadi akibat reaksi oksidasi antara dinding material dengan fluida (*flue gas*) yang ada di sekeliling luar pipa *reheater* [2,11]. Lapisan oksida korosi yang menempel paling luar pada pipa berwarna jingga, hal ini kemungkinan besar adalah *iron-oxide* Fe₂O₃. Karat biasanya merupakan senyawa Fe₂O₃ dengan warna jingga

Struktur mikro permukaan dinding bagian luar pipa *reheater* di tunjukkan Gambar 4.a dan 4.d. Terlihat pada permukaan oksida menempel cukup tebal sekitar 50-70 µm. Daerah sekitar permukaan penampang pipa terjadi fenomena *decarburizing* sebagai akibat reaksi dengan *flue gas* yang mengandung gas O₂ [12]. *Cavity* juga terjadi di sekitar dekat permukaan bagian luar pipa *reheater*. Fenomena lain adalah terjadinya penetrasi oksida di permukaan dinding. Akibat dari penetrasi tersebut, oksida masuk disela-sela batas butir (*minor grain-boundary*). Hal ini dapat menyebabkan terjadinya serangan korosi di batas butir dan terjadi pembengkakan daerah permukaan serta membuka

jalur korosi (*initial corrosion*) pada permukaan pipa. Penetrasi oksida disebabkan oleh panas yang berlebihan dan operasi kerja yang cukup lama, sehingga dapat menyebabkan kegagalan akibat kombinasi antara *creep* dan korosi pada dinding pipa [7,13].



Gambar 4. Struktur mikro material pipa reheater (nital 2%) penampang transversal (a) bagian luar (b) bagian tengah (c) bagian dalam dan penampang longitudinal (d) bagian luar (e) bagian tengah (f) bagian dalam

Kesimpulan

Pada material pipa *reheater* yang telah beroperasi selama 54.000 jam, terjadi perubahan bentuk *roundness* dilihat dari pengukuran *runout*, yaitu keovalan dan penipisan dinding pipa. Keovalan disebabkan oleh deformasi yang terjadi pada material pipa akibat proses *creep*. Sedangkan penipisan dinding pipa lebih disebabkan oleh terjadinya korosi oksidasi dan adanya *cavity*. Kekuatan mekanis material pipa masih di atas standar minimum, hal ini berarti penurunan kekuatan mekanis tidak terlalu signifikan. Secara struktur mikro terlihat terjadinya proses *spheroidized* dan *decarburizing* sebagai akibat dari reaksi antara material dengan *steam* yang memiliki tekanan dan temperatur. Lapisan oksida hasil reaksi *steam* menempel pada dinding yang selanjutnya berakibat terjadinya *oxide penetration* masuk ke batas butir (*grain boundary*) dan selanjutnya dapat melepaskan ikatan butiran (*removal material*).

Daftar Pustaka

- [1] Shields, C.P., 1996, *Boilers Types, Characteristic and Functions*, McGraw Hill, New York, United States of America.
- [2] Chaudhuri, S., 2006, *Some Aspects of Metallurgical Assessment of Boiler-Basic Principles and Case Studies*, Material Science and Technology Journal Vol. A-432 pp 90-99, Elsevier.
- [3] Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 1997, *Material Science and Engineering 8st*, John Wiley & Sons, New York.
- [4] Evans, R.W., Wilshire, B., 1993, *Introduction to Creep*, Bourne Press Limited, Bournemouth.
- [5] Hertzberg, R.W., 1996, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, Toronto.
- [6] Dieter, G.E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, Singapore.
- [7] French, D.N., 1992, *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, John Wiley & Sons, New York
- [8] Jia, J.H., *etl*, *Test Verification of an Extensometer for Deformation Measurement of High Temperature Straight Pipes*, Measurement Journal Vol.45 pp. 1933-1936, Elsevier.
- [9] Mazaheri, M., *etl*, 2010, *Creep Life Assessment of an Overheated 9Cr-1Mo Steel Tube*, Pressure Vessel and Piping Journal Vol.87 pp. 746-752, Elsevier.
- [10] Moriyama, K., *etl*, 2008, *Estimation of Material Properties and Maintenance of Pressure Part of Thermal Power Plant Boiler Under Long-Term Service of 300.000 hours*, Material Science and Engineering A 510-511 pp 142-148, Elsevier.
- [11] Purbolaksono, J., *etl*, 2009, *Failure Investigation on Reheater Tube Due to Deposit and Wall Thinning*, Failure Analysis and Preventive Journal Vol. 9 pp.365-369.
- [12] Huang, J.L., *etl*, 2012, *On The Failure of Steam-Side Oxide Scales in High Temperature Components of Boilers During Unsteady Thermal Processes*, Loss Prevention in The Process Industries Journal Vol.26 pp. 22-31, Elsevier.
- [13] Luo, X., and Zhang, Z., 2013, *Leakage Failure Analysis in a Power Plant Boiler*, Prosedia IERI Journal Vol.5 pp. 107-111, Elsevier.
- [14] Kayama, M. *etl*, 2007, *Failure Pressure of Straight Pipe with Wall Thinning Under Internal Pressure*, Pressure Vessels and Piping Journal Vol.85 pp. 628-634, Elsevier.
- [15] Holman, J.P., 1984, *Heat Transfer 6th*, Mc-Graw Hill, Singapore
- [16] ASTM, 1993, *Standard Testing Method*, ASTM International.
- [17] Jones, D.A, 1992, *Principles and prevention of Corrosion*, Mac millan, United States of America.