

BOILER RELIABILITY ANALYSIS WITH WEIBULL TO MEASURE THE IMPACT OF METAL COATING ON THE WALL TUBE BOILER CFB UPK TARAHAN

(Analisa Keandalan Boiler dengan *Weibull* Untuk Mengukur Dampak *Metal coating*
Pada *Wall Tube Boiler* CFB UPK Tarahan)

Eko Setiono^{1*}

ABSTRACT

One of the problems related to the operation of PLTU with CFB type boilers is the occurrence of leaks in the furnace area caused by erosion in the boiler tube which is a consequence of the use of bed material for the fluidization process. This writing aims to provide an overview of the implementation of metal coating on CFB type boilers in preventing leakage due to erosion that occurs in the furnace to increase the reliability of boiler equipment, especially the furnace wall tube area. Through a very good planning, implementation and monitoring and evaluation process including the process of determining the coating material based on the results of research conducted by the PLN Research and Development Center, the process of installing the coating according to standard requirements and carrying out an inspection of the condition of the boiler pipe that is applied to the coating as well as appropriate follow-up based on the results of the coating inspection. , the application of metal coating boiler pipes at PLTU Tarahan succeeded in increasing the reliability of unit 3. With the same number of operating hours, namely 96,696 hours, based on the data above, it is known that the reliability value of Boiler unit 3 after metal coating has increased from 8.2% to 11.2% with the percentage of Probability of Failure (POF) decreasing from 95.1% to 88.5%.

Keywords: *Slagging, George Waterhouse Consultants, Babcock & Wilcox*

PENDAHULUAN

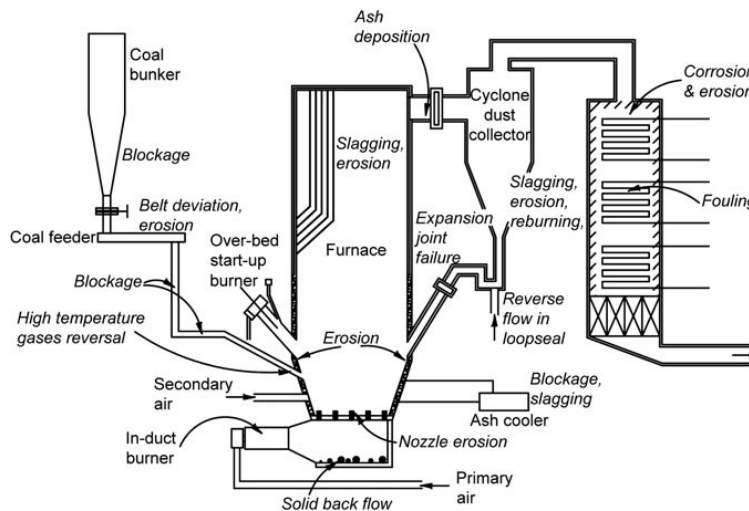
Sejak tahun 2007 PT PLN (Persero) telah mengoperasikan Pembangkit PLTU dengan teknologi *boiler Circulated Fluidized Bed* (CFB), *boiler* tipe ini digunakan karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah efisiensi yang relative tinggi, ramah lingkungan (SOx

¹ PT. PLN Persero, Indonesia

*Corresponding author:
eko.setiono@pln.co.id

dan NOx rendah), fleksibilitas penggunaan bahan bakar dan biaya operasional yang murah karena menggunakan batubara jenis *low rank* (kalori rendah).

Ketika *boiler* beroperasi, *tube boiler* terekspos dengan tekanan dan temperatur tinggi dibagian dalam tube dan aliran flue gas dan bed material disisi luar tube. Hal ini menjadikan kebocoran tube (*tube leak*) menjadi salah satu penyebab utama yang menjadi perhatian terkait pengoperasian *boiler* CFB. *Outage/shutdown boiler* dapat terjadi karena degradasi material pada berbagai komponen *boiler*. Ini bisa terjadi melalui korosi, erosi atau abrasi atau karena tidak berfungsinya komponen tertentu. *Metal loss* (pengikisan) pada material tube *boiler* adalah penyebab tertinggi dari *forced outage* yang terjadi di *boiler* CFB. Dan dua penyebab utama yang menyebabkan kegagalan material tube *boiler* adalah erosi dan korosi. gambaran lokasi terjadinya erosi dan korosi pada *boiler* CFB dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Erosi dan Korosi pad *Boiler* CFB

Telah banyak tulisan mengenai permasalahan terkait pengoperasian *boiler* CFB dimana salah satu permasalahannya adalah terkait erosi dan korosi yang terjadi di *wall tube furnace*, juga banyak terdapat penelitian tentang solusi terkait permasalahan erosi yang terjadi di *boiler* dimana salah satunya adalah dengan metode coating menggunakan berbagai jenis teknik *metal spray* dengan berbagai material. Tulisan kali ini membahas dampak dari implementasi *metal coating* terhadap keandalan *boiler*.

METODE PENELITIAN

Data penelitian ini merupakan data pengoperasian boiler PLTU Tarahan yang berlokasi di Kabupaten Lampung Selatan Provinsi Lampung. Boiler ini merupakan boiler tipe CFB dengan spesifikasi sebagai berikut:

Steam Generator

Manufacturer : Alstom Power Inc.

Steam generator : 400 ton/hour

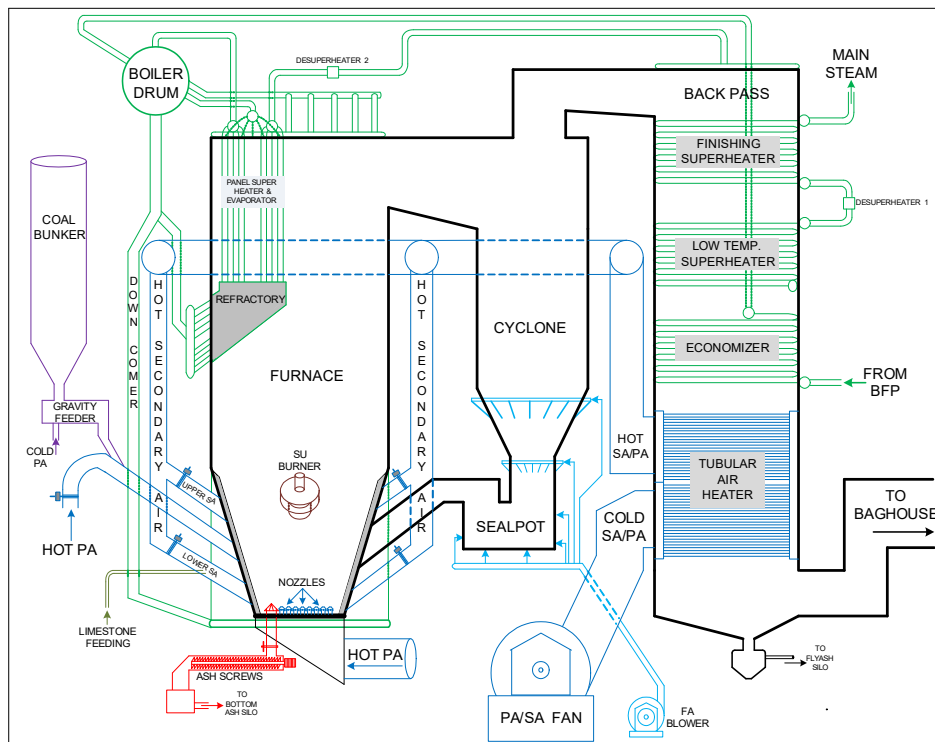
Feed water temp. : 238 °C

Outlet pressure : 128 kg/cm²g

Superheater outlet : 538 °C

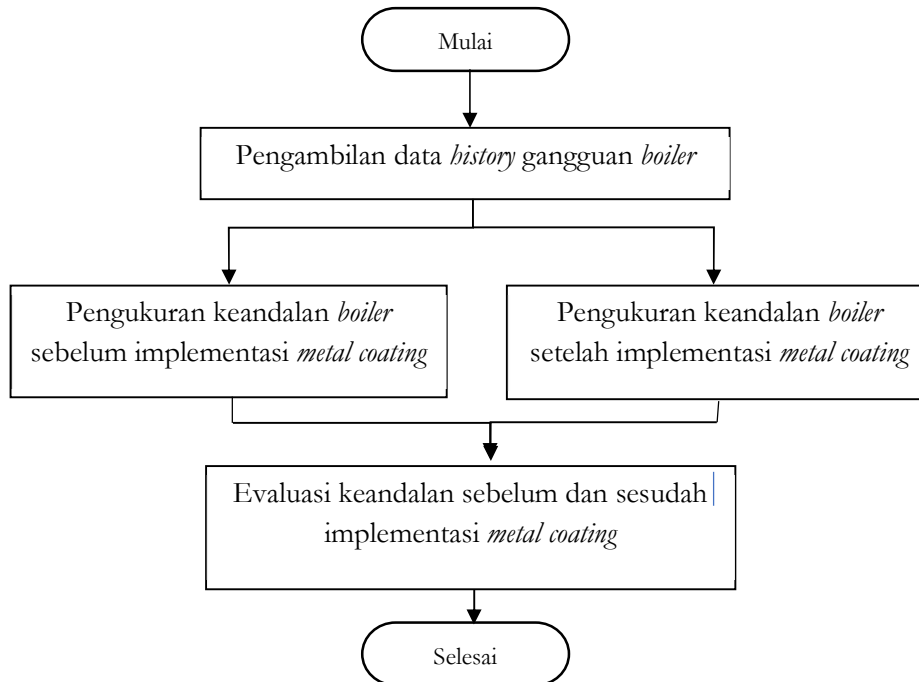
Precipitator : Bag filter

Firing system : CFB



Gambar 2. Skema Boiler CFB PLTU Tarahan

Pada penelitian ini indikator yang digunakan untuk mengukur dampak dari implementasi *metal coating* pada *boiler* adalah *reliability* (keandalan), dampak diukur dengan membandingkan keandalan *boiler* sebelum dan sesudah implementasi berdasarkan data pengoperasian *boiler*.



Gambar 3. Flowchart Metode Penelitian

Karakteristik Pengoperasian *Boiler* CFB

Proses pembakaran pada *boiler* CFB menggunakan tumpukan (*bed material*) berupa partikel pasir yang diletakan di dalam *furnace* (ruang bakar) sebagai media penyimpan energi panas yang memacu batu baru untuk terus terbakar serta sebagai media transfer panas. Udara dengan tekanan dan kecepatan tertentu dihembuskan dari *nozzle* yang berada di bagian dasar ruang bakar untuk membuat proses fluidisasi dari *bed material* dan batubara. Proses fluidisasi ini yang membuat batubara akan mudah terbakar serta meningkatkan proses perpindahan panas sehingga meningkatkan efisiensi pembakaran.

Bed material yang digunakan adalah jenis material yang inert (tidak bereaksi terhadap pembakaran dan mampu mempertahankan kandungan panas) biasanya dipilih pasir, alumina, atau juga bottom ash (abu berat) hasil dari pembakaran batubara. Limestone (batu kapur) berfungsi sebagai pembentuk bed material dan juga sebagai sorbent (pengikat sulfur). Temperatur pembakaran dijaga sekitar 850 °C untuk mengurangi emisi NOx. Dengan temperatur tersebut efisiensi pembakaran akan tercapai dengan residence time (waktu tinggal) bahan bakar di ruang bakar lebih lama.

Namun aliran fluegas dan bed material inilah yang sangat mempengaruhi keandalan dari komponen *boiler* karna dapat menyebabkan erosi pada pipa *boiler* yang diakibatkan oleh proses fluidisasi yang *abnormal*.

History Gangguan Tube Failure Pada Boiler

Sejak pengoperasian PLTU Tarahan pada tahun 2007 sampai dengan tahun saat ini *boiler* PLTU Tarahan telah mengalami serangkaian kejadian tube leak (kebocoran pipa). *Boiler* unit #3 telah mengalami 50 kali kebocoran, data tanggal kejadian dan lokasi kebocoran dapat dilihat pada table 1 berikut.

Table 1. Tanggal dan Lokasi Kebocoran pada Tube Boiler PLTU Tarahan unit #3

No	Area Boiler	COD	Tanggal Gangguan	TBF (jam)
1	Economizer	20-Sep-07	20-Oct-07	720.00
2	Wall Tube Header Backpass	20-Sep-07	5-Jan-09	11,352.00
3	Superheater	20-Sep-07	2-Apr-09	13,440.00
4	Wall Tube	20-Sep-07	29-May-09	14,808.00
5	Superheater	20-Sep-07	11-Jul-09	15,840.00
6	Wall Tube	20-Sep-07	6-Sep-09	17,208.00
7	Wall Tube	20-Sep-07	9-Oct-09	18,000.00
8	Wall Tube	20-Sep-07	26-Jan-09	11,856.00
9	Wall Tube	20-Sep-07	11-Apr-10	22,416.00
10	Wall Tube	20-Sep-07	8-Jun-10	23,808.00
11	Wall Tube	20-Sep-07	18-Jun-10	24,048.00
12	Wall Tube	20-Sep-07	3-Jul-10	24,408.00

13	Wall Tube	20-Sep-07	12-Aug-10	25,368.00
14	Wall Tube	20-Sep-07	4-Sep-10	25,920.00
15	Evaporator	20-Sep-07	30-Nov-10	28,008.00
16	Wall Tube	20-Sep-07	13-Dec-10	28,320.00
17	Wall Tube	20-Sep-07	28-Dec-10	28,680.00
18	Wall Tube	20-Sep-07	3-Feb-11	29,568.00
19	Wall Tube	20-Sep-07	28-Feb-11	30,168.00
20	Wall Tube	20-Sep-07	1-Apr-11	30,936.00
21	Wall Tube Roof	20-Sep-07	23-May-11	32,184.00
22	Wall Tube	20-Sep-07	11-Oct-11	35,568.00
23	Wall Tube	20-Sep-07	12-Feb-12	38,544.00
24	Evaporator	20-Sep-07	8-Mar-12	39,144.00
25	Wall Tube	20-Sep-07	20-Jun-12	41,640.00
26	Wall Tube	20-Sep-07	6-Sep-12	43,512.00
27	Evaporator	20-Sep-07	2-Nov-12	44,880.00
28	Wall Tube	20-Sep-07	28-Nov-12	45,504.00
29	Wall Tube	20-Sep-07	3-Jan-13	46,368.00
30	Evaporator	20-Sep-07	23-Mar-13	48,264.00
31	Evaporator	20-Sep-07	11-Jun-13	50,184.00
32	Economizer	20-Sep-07	6-Jul-13	50,784.00
33	Evaporator	20-Sep-07	23-Feb-14	56,352.00
34	Evaporator	20-Sep-07	16-May-14	58,320.00
35	Evaporator	20-Sep-07	20-Nov-14	62,832.00
36	Wall Tube	20-Sep-07	5-Jan-15	63,936.00
37	Evaporator	20-Sep-07	12-Apr-15	66,264.00
38	Wall Tube	20-Sep-07	28-Oct-15	71,040.00
39	Economizer	20-Sep-07	22-Nov-15	71,640.00
40	Wall Tube	20-Sep-07	27-Mar-16	74,664.00
41	Wall Tube	20-Sep-07	3-Apr-16	74,832.00
42	Wall Tube	20-Sep-07	10-May-16	75,720.00
43	Evaporator	20-Sep-07	17-Oct-16	79,560.00
44	Finishing Superheater	20-Sep-07	28-Jan-18	90,792.00
45	Wall Tube Header Backpass	20-Sep-07	31-Jul-18	95,208.00

46	Wall Tube	20-Sep-07	27-Dec-18	98,784.00
47	Wall Tube	20-Sep-07	12-Feb-19	99,912.00
48	Evaporator	20-Sep-07	21-Feb-19	100,128.00
49	Wall Tube	20-Sep-07	15-Nov-21	124,080.00
50	Wall Tube	20-Sep-07	12-Dec-21	124,728.00

Dari data pada gambar 3 diketahui bahwa kebocoran terjadi hampir setiap tahun dan hal ini berdampak pada kinerja dari PLTU Tarahan. Sebagai Langkah penanganan PLN UPK Tarahan telah melakukan beberapa *improvement* pada *boiler* meliputi *coating tube*, pemasangan *anti abrasive beam*, perbaikan *refactory* dan terakhir adalah *metal coating*.

Aplikasi *Metal coating* di *Boiler* CFB PLTU Tarahan

Penyebab utama dari kebocoran tube *boiler* adalah erosi dan korosi, terdapat tiga area utama di *boiler* CFB yang mengalami degradasi permukaan tube. Tube area lower furnace (bed) dimana terjadi fenomena bubbling yang menjadi subject aliran partikel dengan berbagai sudut yaitu horizontal, vertical, atau miring. Area combustor dan tube vertikal pada waterwall tepat diatas area *refactory* pada zona pembakaran dan area tube superheater di lokasi convection zone dari *boiler*[3]. Beberapa cara telah dilakukan sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut seperti pengelasan overlay, penggunaan pengganngu aliran seperti ball studs, fins, rods dan pin telah terbukti dapat mengurangi pengikisan pada tube *boiler*.

Yang terbaru adalah penggunaan coating untuk melindungi komponen tube *boiler* dengan Teknik thermal spray coating, Terdapat beberapa Teknik yang digunakan untuk memperbaiki permukaan termasuk coating untuk meningkatkan sifat permukaan logam, salah satunya adalah proses thermal spray. Thermal Spray dapat digambarkan sebagai gabungan / kombinasi antara pemanfaatan energi panas untuk pemanasan atau peleburan dan Energi Kinetik untuk mengalirkan dan mendispersikan leburan/lelehan yang diarahkan ke permukaan benda kerja. Energi panas dapat dihasilkan secara kimiawi, pembakaran bahan bakar dan oksigen, listrik ataupun dari radiasi.

Spesifikasi coating yang digunakan pada area furnace boiler:

Unsur kimia:

Chromium : 29 % - 35 %

Nickel : 37 % - 46 %

Unsul lain : < 6 %

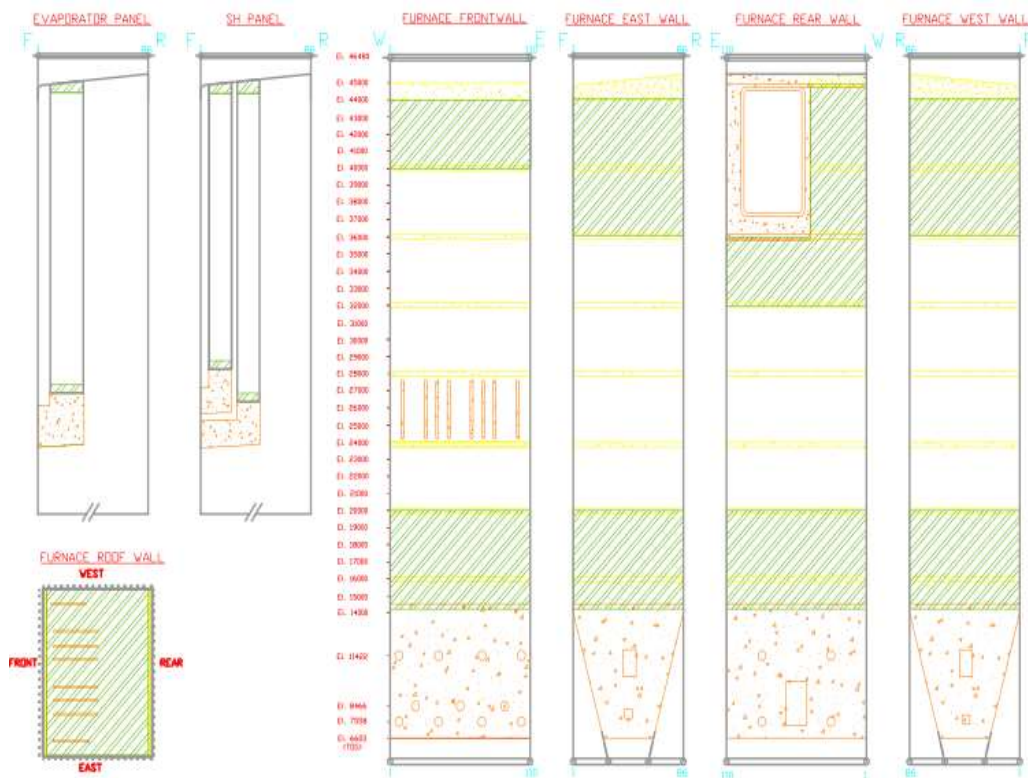
Iron : bal

Bond strength : > 7000 psi (48 MPa)

Hardness : > 66 HRC (900 HV)

Coating Thickness : *Approx. 18 mils*

Area boiler yang diaplikasikan *metal coating* adalah di area furnace dan juga roof, dan jenis coating yang digunakan adalah Chrome Clad E dan tube armor ceramics. Lokasi area coating ditandai dengan arsir warna hijau pada gambar 4



Gambar 4. Area lokasi implementasi *metal coating*

Tabel 2. Luas area coating per masing masing bagian

Side	EL (m)	EL (m)	L (m)	W (m)	CF	Area (m ²)	Noted
FRONT	44	40	4	9,81	1,4	54,94	
REAR	44,8	32	12,8	9,81	1,4	118,80	(Minus gas exit 57 m ²)
WEST	44	36	8	7,68	1,4	86,02	
EAST	44	36	8	7,68	1,4	86,02	
ROOF			9,81	7	1,4	96,14	
FRONT	20	14	6	9,81	1,4	82,40	
REAR	20	14	6	9,81	1,4	82,40	
WEST	20	14	6	7,68	1,4	64,51	
EAST	20	14	6	7,68	1,4	64,51	
SHP in	45		0,5	1,146	1,3	8,94	(SHP in 1 to 6, 2 SIDE)
SHP in	28,8		0,5	1,146	1,3	8,94	(SHP in 1 to 6, 2 SIDE)
SHP Out	45		0,5	1,146	1,3	8,94	(SHP Out 1 to 6, 2 SIDE)
SHP Out	28,8		0,5	1,146	1,3	8,94	(SHP Out 1 to 6, 2 SIDE)
SHP Out	28,8		4			1,66	(SHP Out 1 to 6, TUBE No.20 @180 DEG)
Evaporator 1	45	44	0,5	2,4	1,4	3,36	2 SIDE
Evaporator 1	28	27	0,5	2,4	1,4	3,36	2 SIDE
Evaporator 1	28	27	5			0,50	TUBE No.28 @180 DEG
Evaporator 2	45	44	0,5	2,4	1,4	3,36	2 SIDE
Evaporator 2	28	27	0,5	2,4	1,4	3,36	2 SIDE
Evaporator 2	28	27	5			0,50	TUBE No.28 @180 DEG
TOTAL						787,58	

Proses aplikasi *metal coating*

Untuk memastikan bahwa aplikasi coating terpasang dengan baik, dilakukan *proses coating* mulai dari pembersihan, pelaksanaan sand blasting, perbaikan, pengukuran dan inspeksi sesuai dengan requirement standar aplikasi *metal coating*.



Gambar 5. Contoh area yang belum memenuhi persyaratan untuk *metal coating*

Sebelum dilakukan proses coating area yang akan dilakukan coating terlebih dahulu dilakukan sand blasting sesuai dengan standar SSPC-SP5, gambar 6 menunjukkan beberapa area yang masih perlu dilakukan perbaikan oleh welder dan grinders agar permukaan yang akan di coating memenuhi kriteria untuk thermal coating. Kondisi area sesuai gambar 6 menunjukkan kondisi pipa yang sudah memenuhi persyaratan untuk dilakukan proses coating.



Gambar 6. Kondisi pipa yang sudah dilakukan sand blasting dan repaire



Gambar 7. Proses metal coating



Gambar 8. Proses pengukuran ketebalan hasil *metal coating*

Setelah dilakukan proses coating, dilakukan pengukuran ketebalan hasil coating, gambar 8 menunjukkan proses pemeriksaan ketebalan coating pada roof, angka menunjukkan 18,8 Mils, diatas batas persyaratan yaitu 18 Mils.



Gambar 9. Contoh hasil *metal coating*

Gambar 9 menunjukkan kondisi ideal hasil *metal coating* yang dilakukan *spray* dengan optimum. Setelah dilakukan inspeksi dan hydrostatic test, permukaan pipa yang sudah dilakukan proses coating di lakukan coating tambahan menggunakan *ceramic coating*.



Gambar 10. Aplikasi *ceramic coating* setelah dilakukan proses *metal coating*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Inspeksi kondisi peralatan yang di lakukan coating setelah pengoperasian

Aplikasi *metal coating* dilaksanakan pada bulan Oktober 2018, dan inspeksi dilakukan 10 bulan setelah aplikasi coating yaitu pada bulan Oktober 2019. Dengan hasil sebagai berikut: *Metal coating* mampu menahan 98% erosi pada pipa *boiler*. Hanya beberapa area yang menjadi perhatian dan perlu ditingkatkan ke jenis coating yang lebih tinggi. Ditemukan bahwa jumlah keausan di *upper furnace* lebih tinggi dibandingkan dengan apa yang terlihat di bagian *furnace* yang lebih rendah. Tampaknya bahan bakar tidak terbakar secara efektif. Ini dapat dilihat dari adanya sisa pembakaran tidak sempurna batu bara di area front wall, keausan disisi atas *furnace* dan *side wall*, dan keausan dari *front wall* sampai ke bagian *roof*. Hal ini juga terjadi pada bagian belakang di inlet siklon dan juga *rear wall*.

Terdapat beberapa bagian lasan yang tidak mulus dan habis bahkan melewati lapisan *coating*. Terdapat pola aliran dengan keausan pada beberapa lasan. Diketahui bahwa keausan pada bagian atas lasan pada *rear wall* menunjukkan bahwa partikel bed material kembali ke *lower furnace*.

Tabel 3. Kondisi area pada *boiler* yang dilakukan *metal coating*

Area	Sub Area	Kondisi
Lower Frunace	<i>Back Wall</i>	Terdapat kondisi las lasan yang menonjol, kondisi <i>lower furnace</i> dalam keadaan baik
	<i>Front Wall</i>	Satu-satunya keausan yang terdeteksi adalah pada pipa terakhir menuju dinding barat. Pada sebagian besar dinding depan terdapat kerak batubara tipis yang menempel pada tabung. Saat dibersihkan <i>coating</i> keramik masih terlihat. Sebagai tambahan, masalah yang sama seperti yang terjadi disemua dinding, beberapa aus pada las lasan
	<i>Side Wall sisi barat</i>	Side Wall Sisi barat, terjadi keausan yang signifikan pada pipa interface refractory no 1-22 dan beberapa pada pipa yang menonjol di tengah dinding yang perlu dilakukan perbaikan. Untuk area di atasnya masih dalam kondisi baik
	<i>Superheater</i>	Pada umumnya kondisi baik dimana sebagian lapisan ceramic masih terlihat di tube. Hanya saja beberapa pipa mengalami erosi yang menembus coating pada interface dengan refractory. Kerusakan ini diperbaiki dengan melakukan upgrade coating
Upper Furnace	<i>Back Wall</i>	Back wall, Masalah signifikan pada back wall furnace bagian atas yang mengalami keausan. Perbaikan pada area ini adalah coating ulang dengan jenis coating yang di upgrade
	<i>Side Wall</i>	Side wall sisi timur, terjadi beberapa keausan melalui keramik di sisi kanan tabung saat aliran menuju siklon.

	Juga sedikit keausan yang terkonsentrasi di beberapa pipa yang dilapisi dengan ChromeClad. Perbaikan yang dilakukan adalah coating ulang dengan Tube Armor pada sisi wall tube yang memiliki keausan yang tinggi
<i>Front Wall</i>	Front wall, Depan – Keausan datang berawal dari bawah dan naik menuju atap. Keausan yang lebih signifikan terjadi pada area menuju bagian tengah dinding depan. Perbaikan yang dilakukan adalah melakukan coating ulang
<i>Side Wall</i>	Side wall sisi barat, kondisi sangat baik, meskipun beberapa bagian coating tuber armor tertembus erosi. Dilakukan coating ulang tube armor pada bagian coating tube armor yang rusak.
<i>Roof</i>	Terjadi keausan pada beberapa pipa, bahkan pada sisi barat furnace dan sisi inlet siklon coating chromeClad mengalami keausan. Perbaikan yang dilakukan adalah coating ulang bagian yang aus.



Inlet siklon pada backwall bagian atas

Side wall sisi barat bagian bawah area erosion block (AAB) dari interface refractory

Side wall sisi timur

Kondisi las lasan yang menonjol dimana terjadi keausan yg cukup tinggi

Gambar 11. Kondisi keausan *pada metal coating* hasil inspeksi *visual*

Dampak dan efektifitas dari implementasi *metal coating* dilakukan dengan mengukur keandalan (reliability) dari peralatan dalam hal ini *boiler*. Dimana keandalan adalah kemungkinan (probabilitas) dari sebuah peralatan untuk memenuhi fungsinya secara normal

(sesuai performance standar/desain) pada periode waktu dengan perioda waktu tertentu dalam kondisi operasi spesifik. (Dhillon, 1997).

Keandalan

Terdapat dua metode umum yang digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap keandalan (reliability) dari sebuah peralatan yaitu dengan metode kualitatif dan metode kuantitatif . Metode kuantitatif didapatkan dari data pemeliharaan terkait waktu kegagalan (time to failure) dan waktu perbaikan (time to repair) dari setiap komponen, atau disebut juga dengan metode matematis.

Berikut rumus yang digunakan untuk menghitung keandalan peralatan:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

$R(t)$ = *Reliability Function*

$F(t)$ = *Cumulative Distribution Function (CDF)*

$f(t)$ = *Probability Density Function (CDF)*

Laju kegagalan (Failure Rate)

Laju kegagalan atau biasa yang disebut dengan Failure Rate merupakan banyaknya terjadi kegagalan per satuan waktu. Laju kegagalan dinyatakan sebagai perbandingan antara banyaknya kegagalan yang terjadi dalam selang waktu tertentu dengan total waktu operasi suatu komponen atau pun sistem. Laju kegagalan dapat dihitung dengan persamaan 2.13 dan 2.14 di bawah ini

$$\lambda = \frac{f}{T} \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

f = Banyaknya kegagalan selama periode waktu operasi

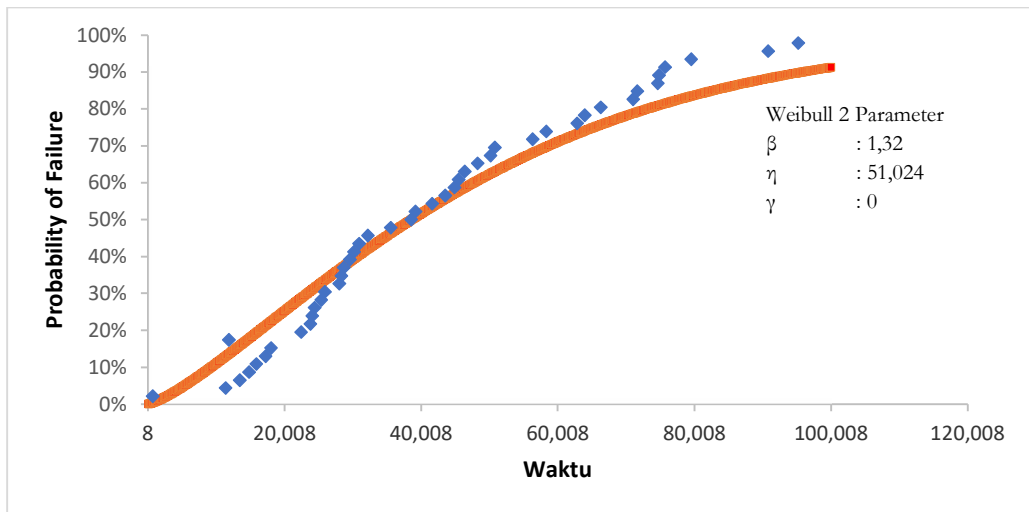
T = Total waktu operasi

$\lambda(t)$ = Laju kegagalan

Perhitungan distribusi laju kegagalan dilakukan dengan metode distribusi *Weibull*. Metode ini digunakan karena merupakan metode yang paling sederhana dan dirasa cukup untuk mengukur keandalan *boiler* pasca dilakukan proses *metal coating*.

Perbandingan Keandalan Boiler CFB PLTU Tarahan Sebelum dan Sesudah Implementasi Metal coating

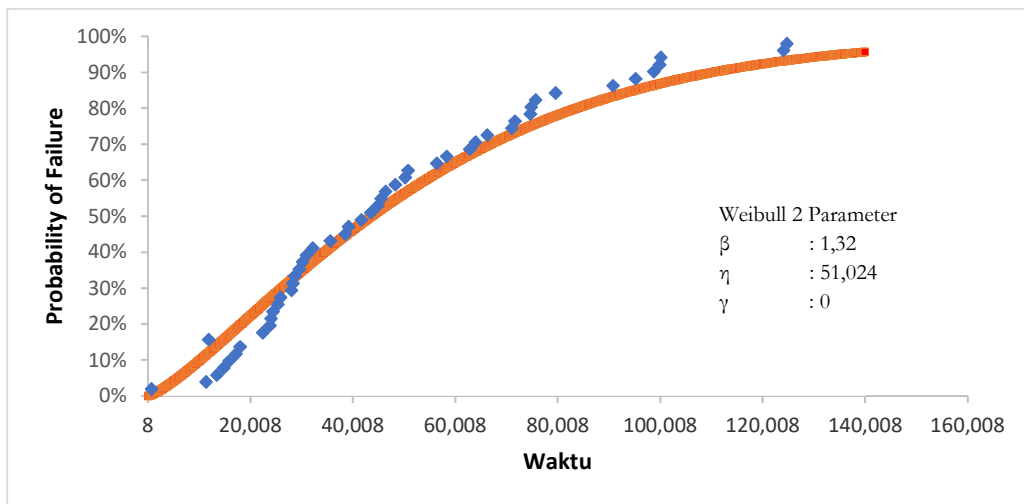
Dengan jumlah jam operasi sampai dengan dilaksanakannya *metal coating* adalah selama 96.696 jam, berdasarkan data diatas diketahui bahwa nilai keandalan dari *Boiler* unit 3 sebelum dilakukan *metal coating* adalah sebesar 8.2 % dengan prosentase *Probability of Failure* (POF) sebesar 91.8 %.



Gambar 12. Grafik *Weibull Failure Rate* sebelum coating

Tabel 4. Hasil Analisa Keandalan Boier Sebelum *Metal coating* dengan Distribusi *Weibull*

Waktu	Reliability	POF	Failure Rate pertahun
t	R(t)	F(t) = CDF	$\lambda(t)$
$\beta =$	Shape parameter		
1.3200			
$\eta =$	Characteristic life		
51,024.68			
Lama Operasi =	96.696 Jam		
720	98.2%	1.85%	0.0000066
2,160	94.6%	5.4%	0.0000094
8,760	79.7%	20.3%	0.0000147
43,800	32.2%	67.8%	0.0000246
87,600	10.4%	89.6%	0.0000308
96,696	8.2%	91.8%	0.0000317
132,480	3.2%	96.8%	0.0000351



Gambar 13. Grafik *Weibull Failure Rate* sesudah *coating*

Dengan jumlah jam operasi yang sama yaitu 96.696 jam, berdasarkan data diatas diketahui bahwa nilai keandalan dari *Boiler* unit 3 setelah dilakukan *metal coating* naik menjadi 11.2 % dengan prosentase *Probability of Failure* (POF) turun menjadi 88.5 %.

Tabel 5. Hasil Analisa Keandalan Boier Sesudah *Metal coating* dengan Distribusi *Weibull*

Waktu	Reliability	POF	Failure Rate pertahun
t	R(t)	F(t) = CDF	$\lambda(t)$
$\beta =$	1.2951	Shape parameter	
$\eta =$	57,925.50	Characteristic life	
Lama Operasi =	132.480 Jam		
720	98.4%	1.60%	0.0000061
2,160	95.3%	4.7%	0.0000085
8,760	82.2%	17.8%	0.0000128
43,800	37.6%	62.4%	0.0000206
87,600	14.1%	85.9%	0.0000253
96,696	11.5%	88.5%	0.0000260
132,480	5.2%	94.8%	0.0000285
150,000	3.5%	96.5%	0.0000296

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil inspeksi secara visual, implementasi *Metal coating* mampu menahan 98% erosi pada pipa *boiler*. Hanya beberapa area yang menjadi perhatian dan perlu ditingkatkan ke jenis coating yang lebih tinggi. Ditemukan bahwa jumlah keausan di *upper furnace* lebih tinggi dibandingkan dengan apa yang terlihat di bagian *furnace* yang lebih rendah. Dengan jumlah jam operasi yang sama yaitu 96.696 jam, berdasarkan data diatas diketahui bahwa nilai keandalan dari *Boiler* unit 3 setelah dilakukan *metal coating* naik dari 8,2 % menjadi 11.2 % dengan prosentase *Probability of Failure* (POF) turun dari 95.1 % menjadi 88.5 %.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT PLN (Persero) UPDL Suralaya dan PT UPK Tarahan Unit yang telah memberikan dukungan hingga terwujudnya makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arjunwadkar, A., Basu, P., & Acharya, B. (2016). A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers. *Applied Thermal Engineering*, 102, 672–694. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.008>
- Basu, P. (2015). *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*.
- Ebeling, C. E. (2019). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Press, Incorporated. <https://books.google.co.id/books?id=3rN8wwEACAAJ>
- Woo, T. G. (1980). Reliability Analysis of a Fluidized-Bed Boiler for a Coal-Fueled Power Plant. *IEEE Transactions on Reliability*, R-29(5), 422–424. <https://doi.org/10.1109/TR.1980.5220908>