

## Analisis Kegagalan Material Waterwall Tube Boiler PLTU Ubon Banten 3 Lontar Unit 3

**Harun Al Rosyid**

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN  
Email : [harun.alrosyid@yahoo.com](mailto:harun.alrosyid@yahoo.com)

**Jamal Firmansyah**

Jurusan D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

### **Abstract**

*In the combustion chamber of PLTU UBOH Banten 3 Lontar uses the waterwall tube (waterwall tube) for heating water to produce high pressure steam and turn a turbine, the heating of them used the principles of radiation and koveksi. Therefore, a problem often encountered is thinning and leaking waterwall tube. Depletion problem waterwall tube is a very urgent issue to be addressed immediately. In this study, the writer focused on the observation and analysis of material failure in the main area of the tube wall material. The writer intends to conduct testing of waterwall tube material with Metallography testing process. The objective of test is to determine the layer thickness and the chemical elements that there is in the material and visual observations of the surface after cleaning which is to determine the level of damage that occurs in the depletion that is caused by shotblasting.*

*Keywords : Wall Tube Material, Chamilal Composition, Structure Micro and Hardness Test.*

## **1. PENDAHULUAN**

Dalam Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) menggunakan beberapa komponen utama yang menyusun PLTU tersebut seperti ketel uap (*boiler*), turbin, kondensor, generator dan lain lain. 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. Dengan meningkatnya kebutuhan listrik nasional dan berkembangnya industri khususnya pada pembangkit listrik, dituntut adanya kualitas yang baik pada material *waterwall tube*.

PLTU Lontar memanfaatkan teknologi boiler PCC (*Pulverized Coal Combustion*). Dalam penggunaan boiler PCC proses pembakarannya berpengaruh terhadap pengurangan ukuran dari diameter *waterwall tube*. Pengurangan ukuran diameter tersebut diakibatkan karena terjadinya shotblasting sehingga terjadi pengikisan dibagian eksternal dari dinding *waterwall tube*. Pengurangan ukuran diameter pipa bisa mengakibatkan *waterwall tube* mengalami kebocoran yang kemudian pecah, dikarenakan

adanya tekanan dari dalam pipa yang berupa tekanan dari air. Akibat dari pecahnya pipa dan berkurangnya air pada *waterwall tube* akan mengakibatkan unit tersebut trip atau mati total dalam pengoperasiannya, sehingga dapat berpengaruh terhadap penyupplaiian energi listrik. Untuk itu pengkajian secara teoritis terhadap *boiler* perlu dilakukan agar kehandalan dan kinerja PLTU dapat terjaga.

Objek analisis dalam penelitian ini adalah material *waterwall tube boiler* pada PLTU UBOH Banten 3 Lontar dengan kapasitas 3 X 315 MW, oleh karena itu perlu pembahasan lebih lanjut tentang proses terjadinya pengikisan dan cara penanggulangannya menggunakan pengamatan metalografi dengan pembesaran dan pengujian komposisi kimia untuk mengetahui unsur-unsur kimianya.

## **2. KAJIAN LITERATUR**

### **Teori PLTU**

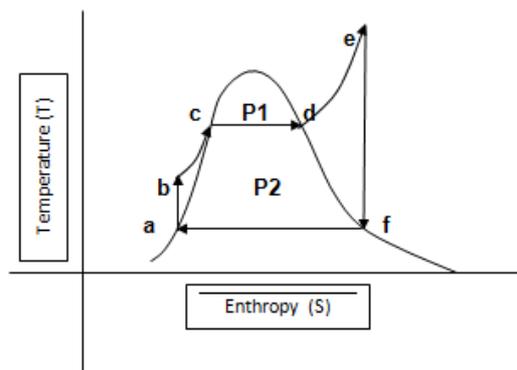
Pada PLTU energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar digunakan untuk mengubah wujud air menjadi uap. Uap ini diarahkan ke sudu-sudu sebuah turbin, sehingga sudu-sudu ini berputar.

Turbin uap (PLTU) adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik yang selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin tersebut kemudian dikopel dengan poros generator sehingga ikut berputar juga dan generator tersebut akan menghasilkan listrik.

Pada ruang bakar ketel uap salah satu komponen yang paling penting adalah *waterwall tube*, dimana panas yang dihasilkan pada pembakaran bahan bakar diserap *waterwall tube*, sehingga air yang terdapat pada *waterwall tube* mengalami kenaikan temperatur sampai berubah menjadi uap basah.

*Waterwall tube* terletak di kedua sisi *steam drum* dan merupakan pipa-pipa kecil yang tersusun secara vertikal dalam *boiler*, setiap pipa disambung satu sama lain agar membentuk selubung yang kontinu dalam boiler dimana konstruksi seperti ini disebut konstruksi membran. *Waterwall tube* bertugas menerima dan mengalirkan air dari *boiler circulating pump* kemudian dipanaskan dalam *boiler* dan dialirkan ke *steam drum*.

Pada dasarnya prinsip kerja suatu (Pusat Listrik Tenaga Uap) PLTU adalah mengikuti siklus RANKINE ideal, seperti gambar di bawah ini (lihat Gambar 1) :



Gambar 1. Siklus Rankine teoritis

Proses yang terjadi pada siklus Rankine adalah sebagai berikut :

a - b = Kompresi isentropis, terjadi dalam

*Boiler Feed Pump*

b - c = Pemanasan air pada tekanan konstan, terjadi dalam *Economizer*.

c - d = Penguapan air sampai menjadi uap jenuh pada tekanan dan temperature konstan, terjadi dalam *Evaporator*.

d - e = Uap jenuh dikeringkan lebih lanjut sampai menjadi uap panas lanjut pada tekanan konstan, terjadi dalam *Superheater*.

e - f = Ekspansi *Isentropis* (Adiabatis), terjadi dalam Turbin Uap.

f - a = Kondensasi uap pada tekanan dan temperatur konstan, terjadi dalam kondensator.

**Keuntungan Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

1. Dapat membakar berbagai jenis bahan bakar seperti padat, cair, dan gas.
2. Umur pemakaian relatif lebih panjang.
3. Dapat dibuat dalam skala besar, hingga 1200 MW per satuan unitnya.
4. Pada PLTU kondisi atmosfer tidak berpengaruh banyak.
5. Apabila menggunakan bahan bakar yang harga per kalorinya rendah maka harga listrik yang dihasilkan lebih murah.

**Kerugian Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

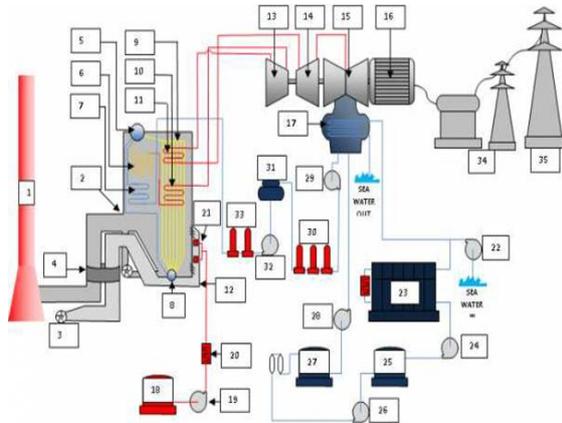
1. Memerlukan lahan yang luas.
2. Masa pembangunan yang cukup lama.
3. Membutuhkan waktu start yang cukup panjang.
4. Tidak bisa start sendiri tanpa bantuan listrik dari luar.
5. Respon terhadap perubahan beban lambat.
6. Memerlukan air penambah dengan kualitas yang tinggi.
7. Membutuhkan air pendingin dalam jumlah yang cukup besar
8. Menimbulkan pencemaran yang relatif tinggi, akibat dari bahan bakar.

**Skema Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)**

PLTU adalah suatu pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil dari penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (*boiler*).

Salah satu jenis PLTU adalah PLTU berbahan bakar batubara (lihat gambar 2.2), pada dasarnya

uraian poses pada PLTU UBOH Banten 3 Lontar sama dengan PLTU lainnya yang menggunakan bahan bakar batu bara.



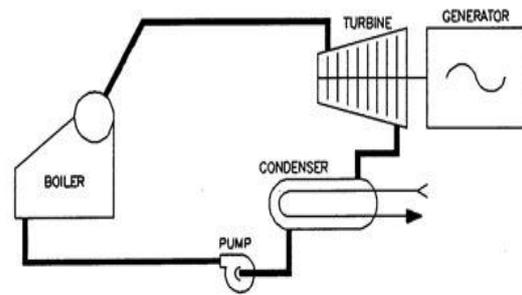
Gambar 2. Skema PLTU Batubara

Keterangan alat dan fungsi :

1. **Stack** atau *Chimney (cerobong asap)* Merupakan alat untuk pengeluaran gas buang dari *furnace* menuju udara luar.
2. **Boiler** (*steam generator*) berfungsi untuk mengubah air menjadi uap.
3. **Forced Draft Fan** berfungsi menghasilkan udara *secondary (Secondary Air)* yang digunakan sebagai udara pembakaran pada *furnace boiler*.
4. **Air Heater** berfungsi sebagai pemanas awal udara.
5. **Steam Drum** adalah Alat untuk memisahkan uap dengan air. Uap menuju *backpass* dan air akan menuju *downcomer* untuk kembali dipanaskan didalam *furnace*.
6. **Primary Superheater** berfungsi sebagai pemanas pertama.
7. **Economizer** berfungsi untuk meningkatkan temperatur air (pemanasan awal) sebelum masuk ke *boiler*.
8. **Header** fungsinya adalah sebagai tempat terpasangan *tube economizer*, dimana pada header dibuat lubang-lubang yang sesuai dengan ujung-ujung pipa.
9. **Water Wall Tube** bertugas menerima dan mengalirkan air didalam *boiler*.
10. **Secondary Superheater**, pemanas lanjut.
11. **Reheater** berfungsi untuk menaikkan temperatur *SH Steam* tanpa mempengaruhi tekanannya.
12. **Wind Box** adalah kotak angin penampung udara sebagai udara pembakaran.
13. **High Pressure (HP) Turbine** adalah turbin bertekanan tinggi.

14. **Intermediate Pressure (IP) Turbine** adalah turbin bertekanan menengah.
15. **Low Pressure (LP) Turbine** adalah turbin bertekanan rendah.
16. **Generator** berfungsi untuk merubah energi mekanik pada rotor generator menjadi energi listrik.
17. **Condenser** berfungsi untuk mengembunkan uap menjadi air kembali dengan menggunakan pendinginan dari air laut.
18. **Marine Fuel Oil (MFO) Tank** adalah tanki penampung bahan bakar.
19. **MRO Pump** (Maintenance Repair Overhaul)
20. **Marine Fuel Oil (MFO) Heater** berfungsi untuk memanaskan bahan bakar dengan tujuan menurunkan *viskositas* (kekentalan).
21. **Burner** berfungsi untuk membakar campuran antara bahan bakar (*fuel*) dengan udara (*air*) di dalam ruang bakar (*furnace*) pada boiler.
22. **Circulating Water Pump** adalah pompa pendingin utama yang berfungsi untuk memompakan air laut sebagai media pendingin utama menuju kondensor.
23. **Desalination Plant** berfungsi untuk mengubah air laut (*brine*) menjadi air tawar (*fresh water*).
24. **Distillation Plant**
25. **Make Up Water Tank** Make up Water Tank (Tangki Air Penambah) berfungsi sebagai penampung air penambah yang akan digunakan untuk menambah kekurangan air di dalam sistem.
26. **Make Up Water Pump** berfungsi untuk memindahkan air dari MWT ke *hotwell*.
27. **Demin Water Tank** adalah tangki penampung air dari laut.
28. **Demin Water Pump** adalah pompa untuk memindahkan air.
29. **Condensate Pump** berfungsi untuk memindahkan condensate dari *hotwell* ke deaerator.
30. **Low Pressure (LP) Heater** fungsi untuk menaikkan temperatur secara bertahap atau sebagai pemanas lanjut yang mendapat panas dari uap ekstraksi turbin.
31. **Deaerator** berfungsi untuk memanaskan dan menghilangkan gas dan udara terlarut dalam air pengisi.
32. **Boiler Feed Pump** berfungsi untuk memasok air bertekanan tinggi ke *boiler* selama *start up*, keadaan normal, dan pada saat operasi darurat.

33. **High Pressure (HP) Heater** berfungsi untuk menaikkan temperatur secara bertahap atau sebagai pemanas lanjut yang menggunakan uap ekstraksi dari turbin sebagai sumber pemanasan.
34. **Switch Yard** 18kV/150kV adalah perangkat yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik yang berada di wilayah.
35. **Transmission** berfungsi untuk pengiriman aliran listrik.



**Prinsip Kerja PLTU**

PLTU menggunakan fluida kerja uap air yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Urutan sirkulasinya secara singkat adalah sebagai berikut :

- a. Air diisi ke *boiler* sehingga mengisi penuh seluruh luas permukaan *waterwall tube*. Di dalam *waterwall tube* ini air dipanaskan dengan gas panas hasil pembakaran bahan bakar dengan udara sehingga berubah menjadi uap.
- b. Uap hasil produksi *boiler* dengan tekanan dan temperatur tertentu diarahkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran.
- c. Generator yang dikopel langsung dengan turbin berputar menghasilkan energi listrik.

Uap bekas yang keluar dari turbin masuk ke dalam kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi *boiler*.

Putaran turbin digunakan untuk memutar generator yang dikopel langsung dengan turbin sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal *output* generator.

Sekalipun siklus fluida kerjanya merupakan siklus tertutup, namun jumlah air dalam siklus akan mengalami pengurangan. Untuk mengganti air yang kurang, maka perlu adanya penambahan air kedalam siklus. Kriteria air penambah (*make up water*) ini harus sama dengan air yang ada dalam siklus.

**Komponen Pada PLTU**

Pada dasarnya pembangkit listrik tenaga uap mempunyai bagian-bagian utama (lihat Gambar 3.) sebagai berikut :

- 1) **Boiler Feed Pump** berfungsi untuk memasok air bertekanan tinggi ke *boiler* selama *start up*, keadaan normal, dan pada saat operasi darurat.
- 2) **Boiler** (steam generator) berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Uap bertekanan sangat tinggi yang dihasilkan *boiler* dipergunakan untuk memutar turbin. *Boiler* juga merupakan tempat untuk merubah bahan bakar menjadi energi panas, terdiri dari *furnace* yaitu tempat pembakaran bahan bakar, *economizer* untuk memanaskan air menuju titik perpindahan fasa, *evaporator* untuk merubah fasa air menjadi uap, *superheater* untuk memanaskan uap lanjut hingga suhu tertentu dan *air heater* untuk pemanas udara masuk ruang bakar (*furnace*).
- 3) **Turbin** yang berfungsi untuk merubah energi panas didalam uap menjadi energi mekanik pada poros turbin guna menggerakkan motor generator.
- 4) **Kondensor** yang berfungsi untuk mengembunkan uap menjadi air kembali dengan menggunakan pendinginan dari air laut
- 5) **Generator** yaitu alat yang berfungsi untuk merubah energi mekanik pada rotor generator menjadi energi listrik pada stator untuk disalurkan pada konsumen.

**Jenis-Jenis Boiler**

1. Berdasarkan bahan bakar  
 Jenis *boiler* menurut bahan bakar dapat di kelompokkan menjadi :

- *Boiler* bahan bakar padat : Terutama digunakan batu bara. Komponen bahan bakar dan karakteristik abu adalah faktor sangat penting dalam desain *boiler*.
- *Boiler* bahan bakar cair : Dengan kecepatan gas buang yang lebih tinggi dan volume dapur yang lebih kecil.
- *Boiler* bahan bakar gas : Terutama digunakan gas alam atau gas dapur tinggi, dengan kecepatan gas buang yang

Gambar 3. Siklus Komponen Utama PLTU

lebih tinggi dan *volume* dapur yang lebih kecil.

2. Berdasarkan posisi air dan gas panas
  - Jenis *boiler* berdasarkan posisi air dan gas panas dapat di klasifikasikan sebagai berikut :
  - *Boiler* pipa air (*water tube*) : Api dan gas panas hasil pembakaran melintas diluar *tube*, sedangkan air/uap mengalir didalam *tube*. Cocok sekali dipakai untuk pembangkit uap berkapasitas besar dan bertekanan tinggi :
    - Tekanan : 45-140 atm (jenis pipa air biasa), 350 atm (jenis superkritis).
    - Produksi uap : sampai dengan 2100 ton/jam.
    - Diameter pipa : 2-4 inch.
  - *Boiler* pipa api (*fire tube*) : Api dan gas panas hasil pembakaran melintas didalam *tube*, sedangkan air/uap berada diluar *tube* didalam bejana. Untuk mengurangi tebal bejana, penggunaan dibatasi :
    - Tekanan uap maks : 17 bar
    - Operasional : 10 bar
    - Diameter : 8 ft
    - *Boiler* kombinasi

3. Berdasarkan tekanan  
 Jenis *boiler* menurut tekanan dapat di klasifikasikan sebagai berikut :

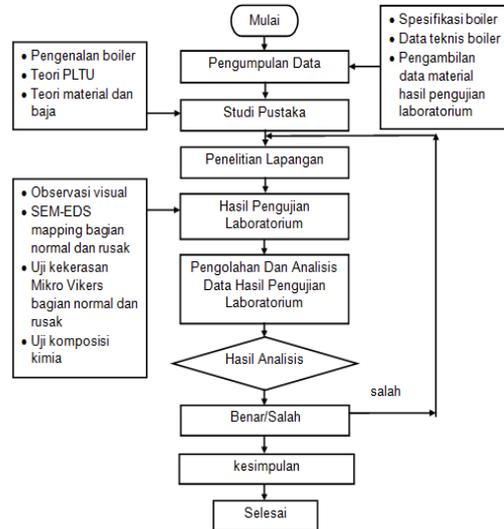
- *Boiler* tekanan rendah dan sedang (<10MPa) : Digunakan sebagai *industrial boiler*, sirkulasi natural, beberapa diantaranya dengan *boiler bank*, dapur dengan *burner* atau *stoker*, tanpa *reheater*.
- *Boiler* tekanan tinggi (10-14 MPa) : Digunakan sebagai *utility boiler*, biasanya sirkulasi natural, dengan *reheater* bila tekanannya  $\geq 14$  MPa.

4. Berdasarkan sirkulasi uap  
 Jenis *boiler* menurut sirkulasi dapat dibagi sebagai berikut :

- *Boiler* sirkulasi alami/natural : Sirkulasi fluida di pipa *evaporator* akibat perbedaan dalam massa jenis antara campuran air-uap di *riser* dan air di *downcomer*. Dengan dua atau satu drum , hanya dapat beroperasi pada tekanan subkritis.
- *Boiler* sirkulasi paksa : Sirkulasi fluida di pipa *evaporator* dihasilkan secara paksa oleh pompa sirkulasi yang

dipasang pada sirkuit sirkulasi dengan drum tunggal atau separator, hanya dapat beroperasi pada tekanan subkritis.

### 3. METODE PENELITIAN



Gambar 4. Diagram alir penelitian

### 4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pengamatan visual dilakukan pada area *waterwall tube* yang mengalami kerusakan. Pengamatan ini dapat mengidentifikasi jenis serta posisi pengujian yang akan dilakukan. Gambar 5. memperlihatkan foto permukaan *waterwall tube* yang mengalami pengikisan.



Gambar 5. Potongan Waterwall Tube yang Mengalami Pengikisan

Pada daerah pipa yang mengalami pengikisan, terjadi penipisan ketebalan dari material *waterwall tube* tersebut. Hal ini disebabkan karena shotblasting dari pipa bocor sehingga mengenai dinding luar dari material *waterwall tube* tersebut.

**Optical Emission Spectrometer**

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur yang terkandung pada material *waterwall tube*, apakah sesuai karakter penggunaannya pada temperatur dan tekanan tinggi. *Waterwall tube* yang digunakan berdasarkan spesifikasi material SA 210 C (ASME Specification), spesifikasi ini merupakan baja karbon menengah (*medium carbon steel*) boiler tube.

Berikut adalah tabel hasil pengujian komposisi kimia material SA 210 C :

Tabel 1. Perbandingan Komposisi Kimia Pada Sampel Dengan Spesifikasi Standar Material SA 210 C

Hasil / Result		ASTM SA 210 Grade C
Unsur	Kadar %	
Element	Content %	
Fe	98.66	Balance
C	0.121	0.35 max
Si	0.235	0.10 min
S	0.007	0.035 max
P	0.011	0.035 max
Mn	0.843	0.29-1.06
Ni	0.024	-
Cr	0.034	-
Mg	0.008	-
V	0.001	-
Cu	0.052	-
W	<0.0001	-
Ti	0.002	-
Sn	0.004	-
Al	0.002	-
Pb	<0.0001	-

Setelah melakukan pengujian komposisi kimia pada *waterwall tube* dan dibandingkan berdasarkan ASTM SA 210 C, maka dapat dilihat bahwa spesifikasi komposisi kimia utama yang terkandung dalam material SA 210 C adalah : **Karbon** (C) 0.35% max, berdasarkan hasil dari pengujian komposisi kimia karbon yang terkandung adalah 0.12% yang berarti material SA 210 C yang digunakan merupakan baja karbon menengah yang mengalami penurunan kadar karbon, yang berarti material ini tidak terlalu keras tetapi memiliki keuletan yang baik. **Silikon** (Si) 0.10% min, dari hasil

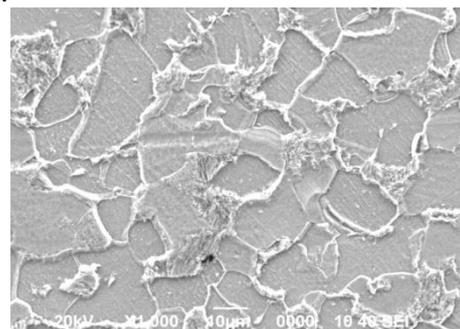
pengujian, kandungan Si 0,23%. Kandungan silicon ini dapat meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, ketahanan terhadap panas, karat dan kekuatan baja pada suhu tinggi tanpa mengakibatkan penurunan terhadap keuletan. Unsur Si ini juga berfungsi sebagai deoksidasi. **Mangan** (Mn) 0.29-1.06, dari hasil pengujian kandungan mangan 0.84%. Mangan ini dapat mencegah kegetasan pada suhu tinggi. **Sulfur/belerang** (S) 0.035% max, dari hasil pengujian kandungan sulfur 0.007% hal ini masih didalam batas normal dari standar yang ditentukan, kandungan sulfur yang rendah akan lebih baik karena kandungan sulfur dalam baja dapat menurunkan keuletan dan kekuatan pada baja. **Phospor** (P) 0.035% max, dari hasil pengujian kandungan phosphor sebesar 0.011% yang masih dalam batas normal sesuai standar yang ditentukan, phospor dalam kandungan baja merupakan impuritas yang dapat menurunkan keuletan dan kekuatan pada baja, tetapi phospor berguna untuk membersihkan material dari unsur penyebab korosi.

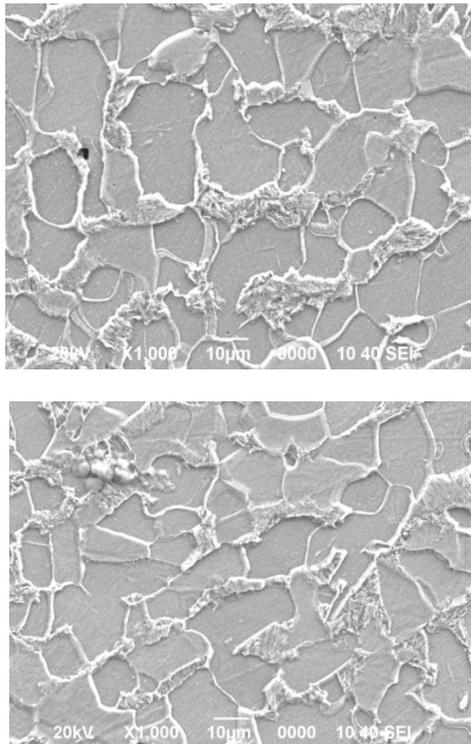
**Analisis Uji Scanning Eletron Microscope (SEM) – Electron Dispersive Spectrometer (EDS)**

Metode SEM digunakan untuk melihat morfologi mikrostruktur permukaan material yang mengalami kerusakan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui lebih dalam pada luas permukaan *waterwall tube* pada daerah rusak dengan SEM-EDS untuk menemukan informasi berharga yang tidak dapat diperoleh dengan *microscope optic*.

**Pengamatan Hasil SEM-EDS**

Metode SEM digunakan untuk melihat morfologi mikrostruktur permukaan material. Pada pengujian SEM menggunakan pembesaran foto electron microscope sebesar 1000x untuk melihat mikrostruktur dan digunakan EDS untuk mendapatkan komposisi kimia pada daerah yang diuji.





Gambar 6. Hasil SEM Perbesaran 1000x

Dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) perbesaran foto elektron microscope dari 1000x. Pada gambar 4.2 terlihat bahwa jenis struktur pada material waterwall tube ini adalah jenis Hypoeutectoid dari daerah utuh sampai daerah pengikisan, tidak terlalu terlihat perbedaan struktur mikro pada daerah utuh, daerah tengah dan daerah pengikisan. Tetapi dimana semula didaerah utuh tidak tampak unsur Cl, namun ketika didaerah pengikisan terdapat unsur Cl sebagai benda asing pada material *waterwall tube* (lihat gambar 4.2).

**Analisis Uji Kekerasan (Vickers)**

Uji kekerasan dilakukan untuk mengkonfirmasi tingkat kekerasan material sampel pipa dengan klasifikasi tertentu dan untuk mengevaluasi kemungkinan perubahan nilai kekerasan. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode Vickers. Pengujian kekerasan dilakukan pada sampel *waterwall tube* didaerah utuh dan daerah pengikisan dengan mengambil 12 titik indentasi, masing masing dengan mengambil 6 titik indentasi.



Gambar 7. Sampel Pengujian Uji Kekerasan

Pengujian didaerah utuh dan didaerah pengikisan dilakukan dengan jarak 50 µm dari permukaan dengan beban sebesar 200 gf menggunakan indenter intan

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Daerah Utuh Dan Daerah Pengikisan

Posisi Uji	No Uji	Nilai Kekerasan Mikro Vickers (HV)	KEKERASAN RATA-RATA	Keterangan
Daerah Utuh	1	183.2	184.6	Pengujian 50 µm dari permukaan » Beban 200 gf » Indenter Intan
	2	191.6		
	3	187.3		
	4	191.6		
	5	191.6		
	6	162.3		
Daerah Pengikisan	1	183.2	171.7	
	2	171.5		
	3	164.4		
	4	175.3		
	5	167.9		
	6	167.9		

Dari gambar dan hasil tabel uji kekerasan pada sampel dapat dilihat bahwa nilai kekerasan rata-rata yang berada pada daerah utuh dan daerah pengikisan berbeda, dimana nilai kekerasan rata-rata yang terjadi pada daerah pengikisan lebih rendah dibandingkan pada daerah utuh. Pada daerah utuh kekerasan rata-rata sebesar 184.6 HV, sedangkan kekerasan pada daerah pengikisan mengalami penurunan atau menurun mencapai nilai kekerasan rata-rata sebesar 171.7 HV.

**Kesimpulan**

1. Penyebab pengikisan pada pipa *waterwall* dikarenakan oleh *shotblasting*. Dimana pada pipa yang mengalami kebocoran menyemprotkan uap bertekanan, sehingga

- mengenai pipa sampel dan mengalami pengikisan.
2. Dari hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa kadar karbon pada material pipa *waterwall* mengalami penurunan, dimana pada pengujian sampel ini karbon yang terkandung adalah 0.12% berbeda dengan spesifikasi standar yaitu baja karbon menengah (0.23%-0.44%).
  3. Setelah pengujian SEM-EDS bahwa terlihat struktur mikro pada permukaan yang terdapat pada material pipa *waterwall* ini termasuk jenis struktur *Hypoeutectoid*. Hal ini yang menyebabkan keuletan dari material ini meningkat dan kekerasan pada daerah pengikisan lebih rendah dibandingkan daerah utuh.
  4. Penyebab utama kebocoran kemungkinan besar karena bahan bakar yang jelek atau air ketel yang jelek yang akan mengakibatkan korosif.

#### Daftar Pustaka

- Dieter, George E. *Metalurgi Mekanik*. Edisi ketiga. Terjemahan oleh Sriati Djaprie. Jakarta : Erlangga. 1986
- Djaprie, Sriati, *Metalurgi Mekanika*, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1987
- Lawence, H. Van Vlack, *Ilmu Logam Dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam Dan Bukan Logam)*, Edisi 5, Elangga, 1991
- Mambaul Ulum. *Meningkatkan Ketahanan Erosi Pada Material Waterwall Tube Boiler CFB Dengan Teknik Coating*. Disertasi tidak diterbitkan. Jakarta : STT-PLN. 2010
- M.F. Syahputra. *Pengenalan Boiler*. (online). <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/20329/3/Chapter%20II.pdf>, diakses 17 Juni 2013: 23.46 WIB)
- Muhammad Teguh Arifbianto. *Modifikasi Sifat Permukaan dan Pengujian Sifat Mekanis Material Tube Boiler CFB Terhadap Erosi Pada PLTU 100 MW*. Disertasi tidak diterbitkan. Jakarta: STT-PLN . 2011