

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh energi kinetik dari uap panas/kering yang dihasilkan oleh *boiler*. Sehingga Generator dapat menghasilkan listrik. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar seperti gas, minyak, batu bara, biomassa, dan lainnya.

a. Keunggulan Pembangkit Listrik Tenaga Uap :

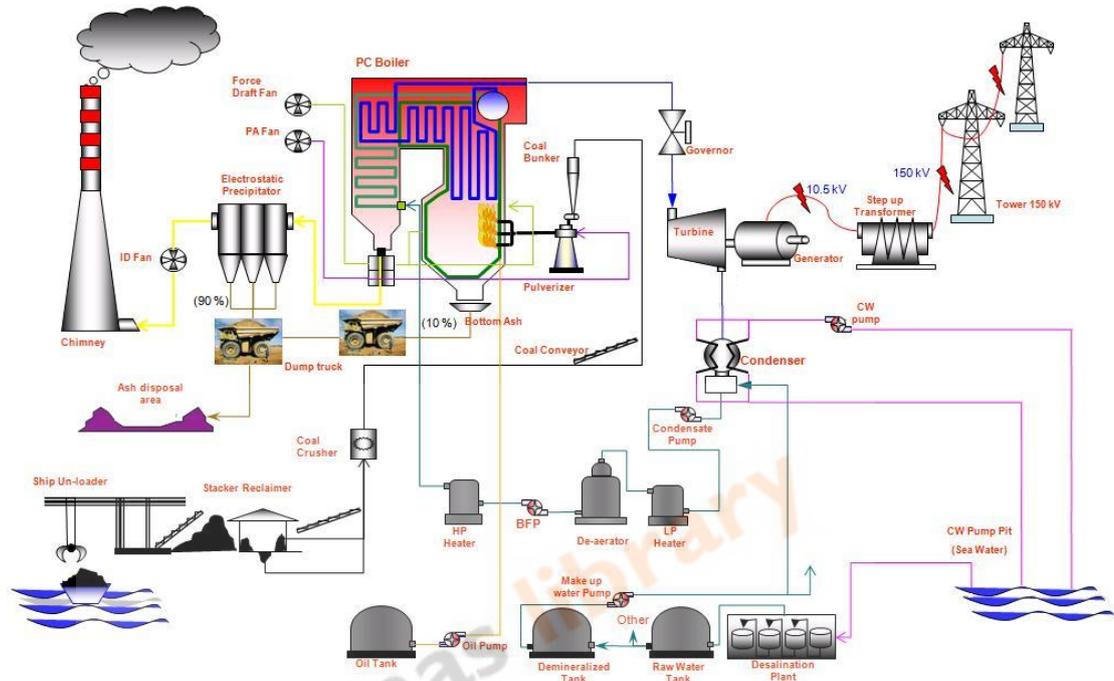
- 1) Dapat dioperasikan menggunakan berbagai jenis bahan bakar (padat, cair dan gas).
- 2) Dapat dibangun dengan kapasitas yang bervariasi.
- 3) Dapat dioperasikan dengan variasi pembebanan.
- 4) Daya yang dibangkitkan relatif lebih besar.
- 5) Usia pakai (*life time*) relatif lama.

b. Kelemahan Pembangkit Listrik Tenaga Uap :

- 1) Sangat tergantung pada tersedianya pasokan bahan bakar.
- 2) Tidak dapat dioperasikan (*start*) tanpa pasokan listrik dari luar.
- 3) Memerlukan tersedianya air pendingin yang sangat banyak secara terus menerus.
- 4) Investasi awalnya mahal.

2.2 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pada Gambar 2.1 menunjukkan siklus dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batu bara dengan kapasitas daya 625 MW :



Gambar 2.1 Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 625 MW

(Achmad Jaelani, 2016)

Gambar 2.1 menjelaskan siklus salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batu bara dengan kapasitas 625 MW terdiri dari tiga siklus, yaitu:

a. Siklus Air

Air yang digunakan dalam proses pembangkitan ini adalah air laut dan diproses dengan *chlorination* supaya biota laut tidak berkembang biak. Setelah melalui proses *chlorination* air laut MED (*Multi Effect Desalination*) dan dimasukkan ke *raw water tank*, untuk menghilangkan kadar Na pada air laut diproses dengan *demineralization* supaya air laut berbentuk *pure water* dan dimasukkan ke *demineralization water tank*. *Feed water* dimasukkan ke *gland steam condenser*, setelah itu air dimasukkan ke dalam LPH (*Low Pressure Heater*) 8, 7, 6, 5 dan

dimasukkan ke *deaerator*. *Deaerator* berfungsi untuk menghilangkan kandungan gas yang masih tersisa dalam air, seperti oksigen. Air dipompa untuk meningkatkan tekanan sebelum dimasukkan ke dalam HPH (*High Pressure Heater*) 3, 2, 1. Setelah air dibawa masuk ke dalam HPH, air dibawa masuk ke dalam *economizer* dengan memanfaatkan *flue gas* untuk menaikkan temperature air.

Setelah melewati *economizer* air dimasukkan ke dalam *steam drum*, pada *steam drum* ini fasanya sudah terbagi menjadi dua fasa yaitu fasa air dan fasa uap. Fasa uap akan naik dengan sendirinya dengan menggunakan *raiser*, dan fasa air akan turun kembali dengan bantuan *boiler circulating pump* untuk kembali dipanaskan lewat *economizer*. Fasa uap lalu melewati *superheater* yang terdiri dari LTSH (*Low Temperature Superheater*), *Div. Panel Superheater*, *Platen Superheater*, dan *Final Superheater*.

Hasil uap dari *superheater* digunakan untuk memutar turbin HP (*High Pressure*), setelah digunakan untuk memutar turbin HP temperatur *steam* akan turun sehingga akan kembali dipanaskan oleh *boiler* di bagian *reheater* dan setelah proses ini *steam* akan memutar turbin IP (*Intermediate Pressure*). Setelah dari turbin IP, *steam* akan mengalir ke turbin LP (*Low Pressure*) 1 dan 2, hasil keluaran turbin IP adalah uap basah dan dialirkan kembali ke *condensor* untuk diubah kembali fasanya menjadi air dan akan disirkulasikan kembali. (Indonesia Power, 2019)

b. Siklus Batu Bara

Batu bara yang dibawa oleh tongkang, akan disimpan di *coal yard*. Lalu batu bara akan dibawa menuju *tripper* oleh *conveyor* dan dipilah sebelum dibawa ke *coal bunker*. Setelah dipilah akan dibawa oleh *coal feeder* dan batu bara akan dimasukkan ke dalam *mill* atau *pulverizer* untuk dihaluskan sampai ukuran 200 mesh.

Batu bara dengan ukuran 200 mesh akan diterbangkan oleh PAF (*Primary Air Fan*) menuju *coal pipe*. *Coal pipe* akan mendistribusikan batu bara ke ruang bakar sesuai dengan tingkatan *layer* pembakaran.

Batu bara yang tidak terbakar terbagi menjadi dua jenis yaitu, *fly ash* dan *bottom ash*. *Bottom ash* akan dibawa oleh SSC (*Submerged Scraper Conveyor*) dan akan dimasukkan ke *bottom ash bin*. *Fly ash* akan ditangkap oleh ESP (*Electrostatic Precipitator*) dan akan dimasukkan ke *fly ash silo*. (Indonesia Power, 2019)

c. Siklus Udara

Udara primer dibawa oleh PAF (*Primary Air Fan*). Udara ini dibagi menjadi dua, yaitu *hot air* dan *cold air*. *Hot air* adalah udara dari PAF yang dipanaskan di *air preheater* dan dialirkan ke *mill* atau *pulverizer*. *Cold air* akan disalurkan langsung ke *pulverizer*. Udara ini akan memanaskan batu bara dan mengeringkan batu bara.

Udara sekunder dibawa oleh FDF (*Force Draft Fan*). Udara ini dipanaskan di *air preheater* dengan memanfaatkan *flue gas*. Tujuannya untuk meningkatkan temperatur udara sehingga efisiensi naik. Dari hasil pemanasan tersebut udara dialirkan ke *wind box* yang terhubung ke *burner boiler*. Udara ini bertugas untuk mensuplai udara pada pembakaran. Di dalam *boiler* terjadi pembakaran, sehingga menghasilkan api yang berbentuk *fireball*. Api tersebut digunakan untuk memanaskan *wall tube*, *superheater*, *reheater*, dan *economizer*. Setelah di *economizer* gas panas yang masih bertemperatur tinggi akan digunakan untuk memanaskan *air preheater*.

Udara buangan dari *boiler* akan dialirkan ke ESP (*Electrostatic Precipitator*) untuk diambil *fly ash* dan disalurkan ke *fly ash silo*. Dan sisanya akan dibuang ke *stack* atau *chimney*.(Indonesia Power, 2019)

2.3 *Pulverizer Boiler*

Boiler ini merupakan jenis *boiler* yang digunakan untuk membangkitkan daya lebih dari 600 MW. Oleh karena itu banyak industri yang menggunakan *boiler* jenis ini. Prosesnya dapat digambarkan dari *demin water*. *Demin Water* hasil dari WTP (*Water Treatment System*) dilakukan *pre-treatment* di dalam LPH (*Low Pressure Heater*) dan HPH (*High Pressure Heater*). Tujuan dipanaskan terlebih dahulu adalah untuk meningkatkan efisiensi *boiler*. *Pre-treatment* kemudian berlanjut di komponen *economizer* yang memanfaatkan *flue gas* sehingga *boiler* benar-benar efisien.

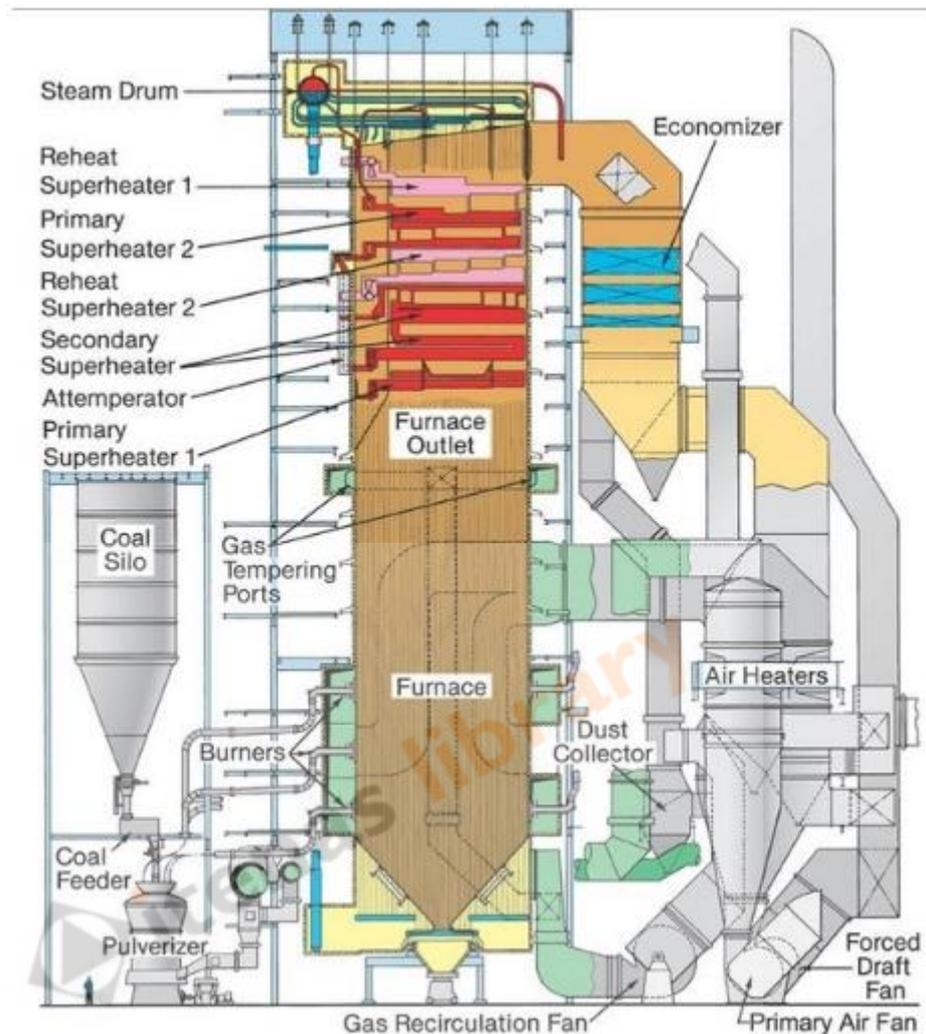
Pembakaran batu bara terjadi di *furnace* lalu di proses di *pulverizer* untuk disesuaikan ukuran batu baranya supaya lebih sempurna dalam proses pembakarannya. Sebelum batu bara dimasukkan ke *furnace* pembakaran sudah terjadi oleh HSD (*High Speed Solar Diesel*). *Pulverizer boiler* dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.

a. Kelebihan *Pulverizer Boiler* :

- 1) Energi panas yang dihasilkan merupakan yang terbesar dari tipe *boiler* lainnya.
- 2) Pemeliharaan mudah.
- 3) Menghasilkan daya lebih dari 600 MW.

b. Kekurangan *Pulverizer Boiler* :

- 1) Masalah lingkungan karena emisi gas buang.
- 2) Relatif boros bahan bakar.



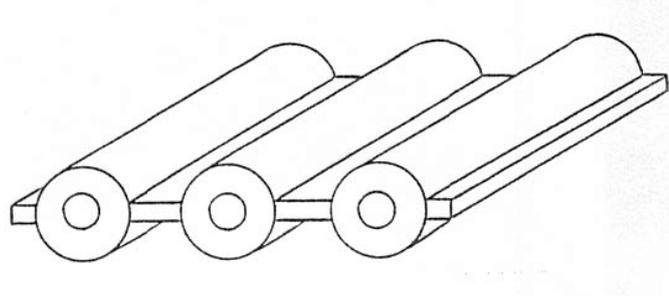
Gambar 2.2 *Pulverizer Fuel Boiler* (Thermodyne Boiler, 2017)

Boiler yang digunakan pada salah satu PLTU dengan pembangkitan daya yang besar adalah jenis *pulverizer boiler* sehingga *boiler* tersebut menggunakan bahan bakar batu bara. Pada dasarnya *boiler* ini didukung oleh *pulverizer* atau *mill*, yang berfungsi sebagai penghancur batu bara sebelum dibakar di *furnace*.

2.4 *Waterwall Tube*

Waterwall tube adalah salah satu jenis *tube* yang digunakan didalam *boiler* untuk mengalirkan *feedwater* dan juga *steam* pada *boiler* dan juga berfungsi untuk tempat penguapan air. Karena pada *boiler* sendiri terdapat sisi

inner (sisi dalam) yang berupa aliran fluida, dan juga sisi *outer* (sisi luar) yang berupa api pembakaran. *Tube* ini disusun agar proses pemidahan panas lama sehingga *input* nya berupa *feedwater* dan *ouput* berupa *steam*.



Gambar 2.3 *Waterwall Tube* (Reza Shamshirgaran, 2004)

Proses penyambungan yang digunakan adalah proses pengelasan jenis GTAW dan SMAW. Temperatur kerja pada *waterwall tube* biasanya mencapai 300 – 400 °C (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013).

2.5 Baja Carbon

Baja *carbon* adalah material logam yang terbentuk dari unsur utama Fe dan unsur kandungan campuran yang bisa merubah sifat materialnya, beserta unsur lain yang mempengaruhi berdasarkan prosentasenya.

Semakin tinggi paduan *carbon* pada Fe titik didihnya lebih rendah pada peleburannya. Maka penambahan unsur karbon pada baja sangatlah berpengaruh pada kekerasan material. Pada umumnya pemilihan material untuk *waterwall tube* ini harus memiliki kekuatan yang tinggi dan memiliki ketahanan yang baik terhadap temperatur yang tinggi dan tekanan air atau uap. Adapun baja *carbon* yang biasa digunakan untuk *waterwall tube boiler* atau digunakan dalam proses *heat exchanger*, yaitu baja ASTM A 210 Gr. A1, baja ASTM A 210 Gr. C, baja ASTM A 192, baja ASTM A 213 T11.

2.5.1 Baja ASTM A 210 Gr. A1

Baja ASTM A 210 Gr. A1 merupakan material jenis baja *carbon ferritic* yang banyak diaplikasikan untuk *heat exchanger* pada industri

pembangkit listrik karena keunggulannya yaitu *structural integrity*, memiliki kekuatan yang tinggi serta ketahanan yang sangat baik terhadap temperatur tinggi dan tekanan air atau uap (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013). Untuk melihat sifat mekanik dan komposisi kimia dapat dilihat dalam **Tabel 2.1**, **Tabel 2.2**.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia ASTM A 210 Gr. A1 (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013)

Material SA 210 Gr. A1	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	Zr	Fe
Base Metal	0,26	0,93	0,1	0,058	0,048	-	-	-	-	Bal.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Baja ASTM A210 Gr. A1 (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013)

Standard	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	e (%)	Hardness (HV)
SA 210 Gr.A1	≥ 415	≥ 255	≥ 30	143

2.5.2 Baja ASTM A 210 Gr. C

ASTM A 210 Gr. C merupakan material jenis baja *carbon ferritic* yang banyak diaplikasikan untuk *heat exchanger* pada industri pembangkit listrik karena keunggulannya yaitu *structural integrity*, memiliki kekuatan yang tinggi serta ketahanan yang sangat baik terhadap temperatur tinggi dan tekanan air atau uap (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013). Untuk melihat sifat mekanik dan komposisi kimia dapat dilihat dalam **Tabel 2.3**, **Tabel 2.4**.

Tabel 2.3 Komposisi Kimia ASTM A 210 Gr. C (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013)

Material SA 210 Gr. C	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	Zr	Fe
Base Metal	0.35	1.06	0,1	0,058	0,048	-	-	-	-	Bal.

Tabel 2.4 Sifat Mekanik Baja ASTM A 210 Gr. C (Prabua, Garg, et.al, 2103; S. Prabua, Jain, et.al, 2013)

Standard	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	e (%)	Hardness (HV)
SA 210 Gr. C	≥ 485	≥ 275	≥ 30	179

2.5.3 Baja ASTM A-192

Baja ASTM A-192 biasa digunakan pembuatan *waterwall tube boiler* untuk kondisi *boiler* dengan tekanan yang rendah, dan jika dibandingkan dengan baja ASTM A 210 Gr. A1 dan baja ASTM A 210 *mechanical properties* nya cenderung lebih rendah, sehingga sangat cocok digunakan pada *boiler* dalam kondisi tekanan rendah. Untuk melihat sifat mekanik, komposisi kimia dari baja ASTM A-192 dapat dilihat pada **Tabel 2.5** dan **Tabel 2.6**.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia ASTM A-192 (CTS Tube, 2019)

ASTM A 192	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	V
Base Metal	0.06 – 0.18	0.27 – 0.63	≤ 0.25	≤ 0.035	≤ 0.035	-	-	-

Tabel 2.6 Sifat Mekanik Baja ASTM A-192 (CTS Tube, 2019)

Standard	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	e (%)	Hardness (HRB)
ASTM A 192	≥ 325	≥ 180	≥ 35	≤ 77

2.5.4. Baja ASTM A 213 T11

Baja ASTM A 213 T11 ini merupakan baja *carbon ferritic* dan *austenitic*. Baja ini biasa digunakan dalam pembuatan *waterwall tube boiler* atau biasa sering digunakan dalam proses *heat exchanger*. Untuk melihat sifat mekanik, komposisi kimia dari baja ASTM A 213 T11 dapat dilihat pada **Tabel 2.7** dan **Tabel 2.8**.

Tabel 2.7 Komposisi Kimia ASTM A 213 T11 (Sunny Steel, 2019)

ASTM A 213 T11	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	V
Base Metal	0.05 – 0.15	0.30 – 0.60	0.50 – 1.00	≤ 0.025	≤ 0.025	1.00 – 1.50	0.44 – 0.65	-

Tabel 2.8 Sifat Mekanik Baja ASTM A 213 T11 (Sunny Steel, 2019)

Standard	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	e (%)	Hardness (HB)
ASTM A 213 T11	415 (min)	220 (min)	≥ 30	179 (maks)

2.6 Kegagalan Pada *Waterwall Tube*

Pada proses pembangkit listrik *boiler* berperan sebagai tempat pembakaran untuk men-*supply* daya pada turbin. Dengan produksi beban yang tinggi, pembangkit dapat terjadi berbagai macam permasalahan, salah satunya adalah kebocoran pipa. *Boiler* juga memiliki kehandalan dan umur pakainya, sehingga kegagalan dapat terjadi. Kegagalan ini dapat dibagi menjadi enam yang ditunjukkan pada **Tabel 2.9** (Bamrotwar & Deshpande, 2014).

Tabel 2.9 Macam-Macam Kegagalan (Bamrotwar & Deshpande, 2014).

No.	Macam-macam Kegagalan	Penyebab Kegagalan
1.	Stress Rupture	<ul style="list-style-type: none"> • Short-term Overheating • High Temperature Creep • Dissimilar Welds
2.	Water Side Corrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Caustic Corrosion • Hydrogen Damage • Pitting • Stress Corrosion Cracking
3.	Fatigue	<ul style="list-style-type: none"> • Vibration • Thermal • Corrosion
4.	Erosion	<ul style="list-style-type: none"> • Fly Ash Erosion • Falling Slag Erosion • Soot Blower Erosion
5.	Fire Side Corrosion	<ul style="list-style-type: none"> • Low Temperature Corrosion • Waterwall Corrosion • Coal Ash Corrosion
6.	Lack Of Quality Control	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance Cleaning Damage • Chemical Damage • Material Deffects

Kegagalan yang sering terjadi pada *waterwall tube boiler*, yaitu *short term-overheating, high temperature creep, dissimilar welds, long term overheating, caustic corrosion, hydrogen damage, fatigue failure, stress corrosion cracking, fly ash erosion*.

2.6.1 Short Term Overheating

Overheating jangka pendek menyebabkan pecahnya tekanan tabung. Penyebab *overheating* jangka pendek adalah pembentukan puing-puing dan skala pada tabung uap/air, laju perpindahan panas yang tinggi atau penembakan yang tidak tepat dan rendahnya tingkat air/uap karena sirkulasi yang buruk.

2.6.2 High Temperature Creep

Suhu tinggi *creep* menyebabkan pecahnya *tube boiler*. Penyebab kegagalan tersebut adalah penyumbatan umum, material yang salah, transisi material, dan tegangan yang lebih tinggi karena pemasangan las.

2.6.3 Dissimilar Metal Welds

Dissimilar metal welds menyebabkan pecahnya *tube boiler*. Jenis kegagalan ini terutama terjadi karena penggunaan batang logam yang berbeda untuk pengelasan tabung. Lokasi utama kegagalan *dissimilar metal welds* adalah *superheater* dan sambungan las yang berbeda pada *reheater*.

2.6.4 Long Term Overheating

Long term Overheating terjadi karena pemilihan bahan yang tidak benar, penyusunan skala ukuran di dalam *tube*, dan juga karena adanya *deposit* atau kotoran dari air.

2.6.5 Caustic Corrosion

Tube boiler gagal karena *caustic corrosion* muncul karena *deposit* korosi sistem *feed water*, kebocoran tabung kondensor, konsentrasi NaOH yang lebih tinggi dalam air *boiler* dan kenaikan suhu karena *deposit* internal.

2.6.6 *Hydrogen Damage*

Hydrogen Damage dapat dihasilkan dari reaksi korosi PH rendah yang menghasilkan produksi atom hidrogen. NaOH menghilangkan lapisan oksida besi magnetik pelindung Fe_3O_4 . Besi bereaksi dengan air atau NaOH membebaskan atom hidrogen. Atom hidrogen berbeda menjadi metana penghasil besi oksida. Metana atau *atomic* atom tidak dapat membuangnya, menghasilkan celah batas butir yang memanjang terjadi dengan ujung yang tebal.

2.6.7 *Fatigue Failure*

Fatigue Failure muncul karena fleksibilitas yang tidak tepat, korosi lasan, perlakuan panas yang tidak tepat, dan pembentukan lasan.

2.6.8 *Stress Corrosion Cracking*

Stress Corrosion Cracking terjadi karena korosi tegangan, retakan seperti itu biasanya diamati di *superheater*, *reheater* daerah yang memiliki konsentrasi sulfida atau hidroksida klorida dan daerah yang bertekanan, dll. Seperti *bends* (lengkungan).

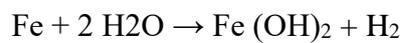
2.6.9 *Fly Ash Erosion*

Kegagalan *tube* karena *fly ash erosion* terjadi karena abu mengalami aksi abrasif, maka akan mengikis permukaan luar tabung di daerah *economizer*, LTSH, *reheater*. Lokasi khas dari *fly ash erosion* berada pada jarak antara *tube*, dinding saluran, jalur *by pass* gas. Penyebab utama *fly ash erosion* adalah temperatur dari gas buang (*flue gas*), kadar *ash content* yang tinggi dalam *flue gas*.

2.7 Hydrogen Damage

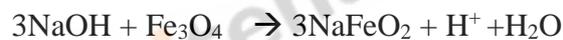
Kerusakan akibat *hydrogen damage* dipicu karena kandungan Na^+ yang tinggi sehingga mengakibatkan kerusakan lapisan lindung atau *protective layer* Fe_3O_4 pada dinding dalam *tube* [S. Srikanth et. Al,2007]. Mekanisme *hydrogen damage* dapat dijelaskan sebagai berikut :

- (a) Pada saat *tube* kontak dengan *steam*, terjadi proses oksidasi yang membentuk lapisan pelindung magnetit (Fe_3O_4) :

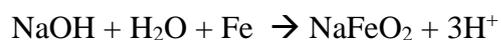


- (b) Apabila kandungan Na^+ (NaOH) berlebih maka dapat bereaksi dengan Fe sehingga menyebabkan korosi. Kelebihan NaOH menyebabkan *free caustic* pada *boiler* sehingga merusak lapisan magnetit besi (Fe_3O_4).

Reaksinya sebagai berikut:



- (c) Setelah lapisan *magnetite* (Fe_3O_4) ini rusak, lebih lanjut NaOH bereaksi dengan *base metal*, menyebabkan serangan yang dikenal sebagai *caustic gouging*.



- (d) Keberadaan H_2 ini yang selanjutnya bisa menyebabkan *hydrogen damage* jika lebih lanjut terdifusi ke struktur batas butir baja.

Kandungan Sodium (Na^+) yang tinggi sebagai akibat kebocoran yang terjadi pada kondensor yang menyebabkan masuknya air laut ke dalam pipa-pipa *boiler*.