



**ANALISIS PERFORMA *WATER TUBE BOILER*
KAPASITAS 115 TON/JAM DI PT. PERTAMINA
REFINERY UNIT VI BALONGAN-INDRAMAYU**

SKRIPSI

**Skripsi ini ditulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Program Studi Teknik Mesin S1**

oleh
Singgih Hidayanto
5212412001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2016**

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul Analisis Performa *Water Tube Boiler* Kapasitas 115 Ton/Jam Di PT. Pertamina Refinery Unit VI Balongan-Indramayu telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Unnes pada tanggal 29 November 2016

Oleh

Nama : Singgih Hidayanto
NIM : 5212412001
Program Studi : Teknik Mesin SI

Panitia

Ketua Panitia

Sekretaris

Rusiyanto S.Pd., M.T
NIP. 197403211999031002

Samsudin Anis S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197601012003121002

Pembimbing I

Pembimbing II

Penguji

Samsudin Anis, ST., M.T., Ph.D
NIP. 197601012003121002

Danang Dwi S, ST., M.T
NIP. 197811052005011001

Dr. M. Burhan Rubai W, M.Pd
NIP. 196302131988031001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Mengetahui

Dekan Fakultas Teknik UNNES



Dr. Nur Qudus, M.T
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Singgih Hidayanto
NIM : 5212412001
Program Studi : Teknik Mesin S1
Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi dengan judul "**Analisis Performa *Water Tube Boiler* Kapasitas 115 Ton/Jam di PT Pertamina Refinery Unit VI Balongan-Indramayu**" ini merupakan hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi manapun, dan sepanjang pengetahuan saya dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Semarang, Oktober 2016
Yang membuat pernyataan


UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
Singgih Hidayanto
NIM 5212412001

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto :

“ Berangkat dengan penuh keyakinan, berjalan dengan penuh keikhlasan, istiqomah dalam menghadapi cobaan. Sesungguhnya bersama kesukaran itu ada keringanan. Karena itu bila kau sudah selesai (mengerjakan yang lain) . Dan berharaplah kepada Tuhanmu. (Q.S Al Insyirah : 6-8)

“Bersikaplah kukuh seperti batu karang yang tidak putus-putusnya dipukul ombak. Ia tidak saja tetap berdiri kokoh, bahkan ia menentramkan amarah ombak dan gelombang itu.” (Marcus Aurelius).

“Rahmat sering datang kepada kita dalam bentuk kesakitan, kehilangan dan kekecewaan, tetapi kalau kita sabar, kita akan segera melihat bentuk aslinya.”(Joseph Addison).

Persembahan :

1. Puji Syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan hidayahnya yang telah memberikan kekuatan, kesehatan dan kesabaran untuk saya dalam mengerjakan skripsi ini.
2. Terimakasih yang tidak terhingga untuk Ayah dan Ibu tercinta yang telah berjuang untuk kesuksesan saya, dengan segala kesulitan yang ditempuhnya mampu memberikan semangat serta harapan pada diri saya.
3. Terimakasih untuk Bapak Samsudin Anis, Bapak Danang Dwi Saputro dan Bapak M. Burhan Rubai Wijaya yang telah membimbing saya dengan sangat baik dan penuh kesabaran.
4. Adik-adik saya tercinta yang selalu mendukung saya, kalianlah yang menjadi semangat tersendiri untuk saya segera menyelesaikan studi.
5. Tema-teman seperjuangan yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Terimakasih

Abstrak

Hidayanto, Singgih. 2016. Prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar merupakan penjabaran dari efisiensi *boiler*. Penelitian ini membahas pengaruh kandungan O₂ eksek pada gas buang dan pengaruh nilai kehilangan kalor (*heat loss*) terhadap efisiensi *boiler*. Kandungan O₂ pada *flue gas* yang terlalu banyak dapat mengakibatkan efisiensi menjadi turun. Penelitian dilaksanakan pada *boiler* dengan tipe *water tube boiler* milik PT Pertamina RU-VI Balongan, Indramayu dalam kondisi operasi dengan beban 188 MW dan kapasitas 115 ton/jam. Pengukuran dilakukan pada cerobong dengan memasang alat berupa *thermocouple* dan *oxygen analyzer* yang dihubungkan langsung dengan laboratorium proses *engineering*. Kemudian untuk mengetahui nilai efisiensi *boiler* dilakukan perhitungan dengan metode *American Petroleum Standard 560* menggunakan *software* Sinboiler untuk mengetahui nilai *heat loss* dan efisiensi *boiler*. Berdasarkan data dalam rentang waktu penelitian, parameter yang diteliti yaitu kadar persentase kandungan O₂ pada *flue gas* masih dalam kondisi yang baik yaitu berkisar antara 2,3 % hingga 2,43 %. Sedangkan *heat loss* total yang terjadi pada *boiler* sebesar 1287,20 btu/lbs dan kehilangan kalor karena radiasi sebesar 101,18 btu/lbs. Pada faktanya, mengitung efisiensi *boiler* secara manual terbilang rumit sehingga peneliti mengembangkan *software* Sinboiler dengan harapan dapat membantu kinerja analisator lebih efisien. Sinboiler dilengkapi dengan pengetahuan tentang *boiler* dan disertakan grafik untuk mempermudah membaca hasil analisis. Pada prinsipnya kedua parameter tersebut yaitu kandungan O₂ pada *flue gas* dan *heat loss* masih berada dalam batas normal operasi *boiler*, sehingga tidak terlalu mempengaruhi efisiensi *boiler* secara signifikan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *boiler* milik PT. Pertamina Refinery Unit VI Balongan-Indramayu masih dalam kondisi layak pakai dan dapat digunakan sebagai mana mestinya untuk memenuhi kebutuhan *steam* di dalam proses produksi.

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Kata kunci: efisiensi *boiler*, *heat loss*, kandungan O₂ pada *flue gas*

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi dengan judul “Analisis Performa *Water Tube Boiler* Kapasitas 115 Ton/Jam Di PT. Pertamina RU VI Balongan-Indramayu” tanpa adanya hambatan yang cukup berarti.

Proposal skripsi ini disusun dalam rangka menyelesaikan studi strata I guna memperoleh gelar sarjana teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Mengingat bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, proposal penelitian ini tidak akan terlaksana dengan baik. Dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, disampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
2. Bapak Samsudin Anis, S.T., M.T. Ph.D Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan proposal skripsi ini.
3. Bapak Danang Dwi S, S.T., M.T Dosen Pembimbing II yang telah menyediakan waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan proposal skripsi ini.
4. Bapak Dr. M. Burhan rubai Wijaya, M.Pd selaku dosen penguji skripsi yang telah menguji skripsi saya dengan penuh sabar dan bijaksana.
5. Bapak, Ibu, Adik dan Saudara-saudara penulis yang selalu memberikan dukungan dan doa.

6. Keluarga besar mahasiswa Teknik Mesin 2012 yang selalu memberikan semangat.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan proposal skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis hanya dapat mengucapkan banyak terima kasih dan penulis berharap proposal skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan para pembaca umumnya. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan proposal skripsi ini banyak terdapat kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik, saran, dan masukan dari semua pihak yang bersifat membangun untuk perbaikan proposal skripsi ini. Penulis juga berharap proposal skripsi ini dapat berguna untuk industri migas di Indonesia yang lebih baik.

Semarang, April 2016



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
ABSTRAK	v
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Identifikasi Masalah	6
C. Batasan Masalah	7
D. Rumusan Masalah	7
E. Tujuan Penelitian	8
F. Manfaat Penelitian	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA	9
A. Kajian Teori	9
1. Pengertian <i>Boiler</i>	9
2. Klasifikasi <i>Boiler</i>	11

a. <i>Fire Tube Boiler</i>	11
b. <i>Water Tube Boiler</i>	12
3. <i>Sistem Boiler</i>	13
a. <i>Sistem air umpan (feed water system)</i>	13
b. <i>Sistem Steam (Steam System)</i>	13
c. <i>Sistem Bahan Bakar (Fuel system)</i>	13
4. <i>Air Umpan Boiler</i>	14
5. <i>Neraca Kalor</i>	15
6. <i>Siklus Rankine</i>	17
7. <i>Bahan Bakar Boiler</i>	18
8. <i>Peralatan Boiler</i>	21
a. <i>Peralatan Utama</i>	21
b. <i>Peralatan Pengamanan</i>	31
c. <i>Peralatan Penunjang</i>	33
9. <i>Prinsip Kerja Boiler</i>	34
10. <i>Efisiensi</i>	36
11. <i>Inefisiensi Pada Boiler</i>	39
12. <i>Proses Pembentukan Uap Pada Boiler</i>	40
13. <i>Perpindahan Panas Pada Boiler</i>	43
14. <i>Prinsip Pembakaran</i>	45
16. <i>Kehilangan Gas Buang Kering (Dry Flue Gas)</i>	47
B. <i>Penelitian yang Relevan</i>	48
C. <i>Kerangka Pikir Penelitian</i>	50

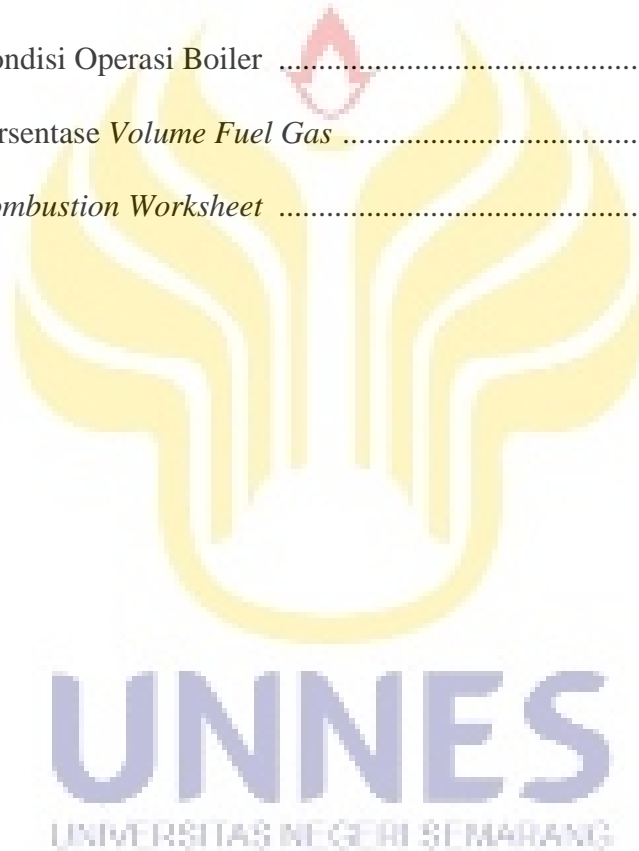
D. Hipotesis	51
BAB III METODE PENELITIAN	52
A. Waktu dan Tempat Pelaksanaan	52
B. Alat dan Bahan	53
1. Alat	53
2. Bahan	54
C. Variabel Penelitian	54
D. Prosedur Penelitian	55
1. Instalasi Penelitian	55
2. Diagram Alir Penelitian	57
3. Proses Penelitian	58
4. Data Penelitian	59
5. Analisis Data	60
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	67
A. Hasil	67
B. Pembahasan	82
C. Keterbatasan Penelitian	92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	93
A. Kesimpulan	93
B. Saran	93
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN	93

DAFTAR SIMBOL

	: Efisiensi (%)
ms	: Massa <i>steam</i> (lb/jam)
H	: Enthalpy (btu/lb)
mf	: Massa bahan bakar (lb/jam)
F	: Nilai bahan bakar (btu/lb)
Q _r	: <i>Heat Loss Radiant</i> (kj/jam)
C _z	: Konstanta radiasi Stephan-Boltzman (6,75kj/m ² .jam.K ⁴)
T	: Temperatur (°C)
Mo	: <i>Moisture in Air</i> (lbs of moisture / lbf air)
Pa	: <i>Pound of Wet Air per Pound of Fuel Required</i> (lbs of air/lbs of fuel)
P _m	: <i>Pound of Moisture per Pound of Fuel</i> (lbs of moisture/lbs of fuel)
PH ₂ O	: <i>Pound of H₂O per Pound of Fuel</i> (lbs H ₂ O/lbs of fuel)
Pe	: <i>Pound of Excess Air per Pound of Fuel</i> (lbs of air)
%e	: <i>Percent Excess Air</i> (%)
T _p H ₂ O	: <i>Total Pound of H₂O</i> (lbs H ₂ O /lbs of fuel)
Q _s	: <i>Heat Loss Stack</i> (kj/jam)
Ha	: <i>Air Sensible Heat Correction</i> (btu/lbs of fuel)
H _f	: <i>Fuel Sensible Heat Correction</i> (btu/lbs of fuel)
H _m	: <i>Atomizing Medium Sensible Heat Correction</i> (btu/lbs of fuel)
LHV	: <i>Low Heating Value</i> (btu)
HHV	: <i>Higher Heating Value</i> (btu)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Batasan <i>Feed Water</i>	14
Tabel 2.2. <i>Checking Item</i> dan <i>Testing Method</i>	15
Tabel 3.1 <i>Fuel Gas</i>	60
Tabel 3.2 Data Kondisi Operasi	61
Tabel 3.3 Data Berat Molekul	62
Tabel 4.1 Kondisi Operasi Boiler	68
Tabel 4.2 Persentase <i>Volume Fuel Gas</i>	68
Tabel 4.3 <i>Combustion Worksheet</i>	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Boiler</i>	10
Gambar 2.2. <i>Fire Tube Boiler</i>	11
Gambar 2.3. <i>Water Tube Boiler</i>	12
Gambar 2.4. Diagram Neraca Energi <i>Boiler</i>	16
Gambar 2.5. Kehilangan Panas Pada <i>Boiler</i>	16
Gambar 2.6. Bagan Diagram Alir Siklus Rankine	17
Gambar 2.7. <i>Furnace</i>	22
Gambar 2.8. <i>Steam Drum</i>	23
Gambar 2.9. <i>Water Drum</i>	24
Gambar 2.10. <i>Superheater</i>	25
Gambar 2.11. <i>Reheater</i>	26
Gambar 2.12. <i>Economizer</i>	27
Gambar 2.13. <i>Force Draft Fan</i>	27
Gambar 2.14. <i>Burner</i>	29
Gambar 2.15. <i>Blowdown Continue</i>	30
Gambar 2.16. <i>Igniter</i>	30
Gambar 2.17. Kerangka Konseptual Bahan Bakar Model Konsumsi Gas	38
Gambar 2.18. Kurva <i>Steam</i> Jenuh	41
Gambar 2.19. Pembentukan Uap Air Pada <i>Boiler</i>	42
Gambar 2.20. Diagram <i>Flue Gas Temperature</i> Terhadap <i>Excess Air</i>	47
Gambar 2.21. Grafik Hubungan Efisiensi Pembakaran Dengan <i>Excess Air</i> ...	48
Gambar 3.1. Instalasi Alat Penelitian di PT. Pertamina RU VI Balongan	55

Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 4.1. Grafik <i>O₂ content in flue gas</i>	77
Gambar 4.2. Grafik nilai kehilangan kalor	78
Gambar 4.3. Grafik <i>Boiler Efficiency</i>	80
Gambar 4.4. <i>Flow chart software Sinboiler</i>	81
Gambar 4.5. <i>Effect O₂ content in flue gas on boiler efficiency</i>	83
Gambar 4.6. Grafik <i>Heat Loss on Boiler Efficiency</i>	85
Gambar 4.7. Tampilan <i>menu login software Sinboiler</i>	88
Gambar 4.8. Tampilan menu beranda	89
Gambar 4.9. Tampilan sidebar menu pengetahuan <i>boiler</i>	89
Gambar 4.10 Tampilan menu <i>input</i>	90
Gambar 4.11 Tampilan menu hasil efisiensi <i>boiler</i>	91

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi memiliki peran yang sangat krusial untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari bahkan di dunia industri kebutuhan energi dunia terus mengalami peningkatan. Kebutuhan energi terus mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kegiatan pembangunan ekonomi suatu negara tidak terkecuali di Indonesia. Menurut proyeksi Badan Energi Dunia (International Energy Agency – IEA), hingga tahun 2030 permintaan energi dunia meningkat sebesar 45% atau rata-rata mengalami peningkatan sebesar 1,6% pertahun (Suryo dan Siswanto, 2015).

Keberlangsungan suatu industri sangat bergantung oleh energi yang tersedia. Berdasarkan data dari *blueprint* Pengelolaan Energi Nasional tahun 2006, Indonesia merupakan salah satu negara dengan persediaan sumber energi terbesar, akan tetapi pemanfaatannya masih kurang, yakni tergolong negara dengan pemanfaatan terendah. Tidak efisiennya pemanfaatan sumber energi menunjukkan Indonesia sebagai negara yang tidak produktif. Indonesia merupakan salah satu negara ekonomi berkembang yang terus melakukan kegiatan pembangunan di sektor industri (Suryo dan Siswanto, 2015).

Sumber energi yang terkandung di Indonesia diyakini belum mampu dimaksimalkan secara sempurna untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, hal ini mengakibatkan masih adanya daerah-daerah di Indonesia yang belum dialiri

energi secara total. Pengolahan kekayaan sumber daya energi yang ada di Indonesia dengan baik dan tepat akan menghasilkan energi yang cukup bahkan lebih untuk memenuhi kebutuhan energi nasional. Hal ini memaksa masyarakat untuk bertanggung jawab dalam penggunaan dan pemanfaatan sumber energi secara bijaksana.

Kerugian-kerugian akibat perpindahan energi yang mendampingi kalor dan kerja kemudian dapat dilakukan analisa terhadap energi bertujuan untuk menghitung potensial kerja maksimum suatu sistem untuk mencapai kesetimbangan dengan kondisi lingkungan serta untuk mengidentifikasi terjadinya pemusnahan energi. Berdasarkan pada penelitian sebelumnya, hasil analisis energy terhadap *system power plant* dapat dikatakan bahwa *boiler* adalah salah satu faktor penyebab utama hilangnya energi yang sebenarnya. Hal ini disebabkan karena efisiensi performa *boiler* yang menurun karena adanya kehilangan kalor yang berlebihan pada saat proses (Suryo dan Siswanto, 2015).

Menurut (Kepres No. 5, 2006), Konservasi energi yang merupakan penggunaan energi secara efisien dan rasional tanpa mengurangi penggunaan energi yang memang benar-benar diperlukan perlu diterapkan pada seluruh tahap pemanfaatan, dengan menggunakan teknologi yang efisien dan membudayakan pola hidup hemat energi mulai dari pemanfaatan sumber daya energi sampai pada pemanfaatan akhir. Konservasi energi memiliki potensi peluang penghematan yang sangat besar di semua sektor (Hendaryati, 2012).

Komponen-komponen utama yang terdapat di sistem *power plant* terdiri dari pompa, turbin, kondenser dan *boiler*. Namun, pada penelitian ini hanya

membahas mengenai komponen yang terdapat pada *boiler*. *Boiler* atau ketel uap merupakan alat yang berupa tanki/drum/vessel tertutup yang terbuat dari bahan baja fungsinya untuk mengubah air menjadi uap dapat dikatakan sebagai alat transfer panas yang dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar (baik dalam bentuk padat, cair atau gas), dengan demikian air dapat berubah menjadi uap yang berfungsi untuk proses produksi (Ginting et al, 2014).

Di dalam *boiler*, energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi panas melalui proses pembakaran dan panas yang dihasilkan sebagian besar diberikan kepada air yang berada di dalam ketel, sehingga air berubah menjadi uap. Air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibanding dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air di dalam *boiler*. Air yang memiliki berat jenis yang lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis yang lebih tinggi akan turun ke dasar. Air panas atau *steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Air merupakan media yang dapat berfungsi dan dapat dijangkau untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Apabila air dididihkan sampai menjadi *steam*, volumenya akan meningkat, menghasilkan tenaga yang besar dan berbahaya yang mudah meledak, sehingga *boiler* merupakan peralatan yang harus dikelola dan dijaga dengan sangat baik.

Untuk meningkatkan pemanfaatan energi secara lebih efisien dan menekan peningkatan biaya produksi terhadap konsumsi bahan bakar suatu industri maka kajian mengenai peningkatan performansi di *boiler* merupakan aspek penting karena berkontribusi terhadap penggunaan bahan bakar.

Operasional *boiler* membutuhkan bahan bakar yang cukup banyak. Sehingga biaya yang dikeluarkan untuk pembelian bahan bakar tersebut menjadi sangat tinggi. Sehingga usaha-usaha penghematan biaya operasional perlu dilakukan untuk meminimalkan pengeluaran.

Penambahan komponen untuk memperbesar efisiensi *boiler* dan penggantian bahan bakar dari *High Speed Diesel* (HSD) menjadi *Liquid Natural Gas* (LNG) telah dilakukan sebagai langkah usaha menghemat biaya pembelian bahan bakar. Perbandingan perhitungan biaya yang diperlukan oleh *boiler* berbahan bakar solar dengan *boiler* bahan bakar gas akan dibahas dengan anggapan memiliki efisiensi yang sama dan menghasilkan *steam output* yang sama (Eflita dan Askhabulyamin, 2012).

Tingkatan kemampuan kerja dari suatu alat dapat dikatakan sebagai efisiensi. Prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja *boiler* yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke atau diserap oleh fluida kerja di dalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar merupakan penjabaran dari efisiensi *boiler*. Pada prinsipnya efisiensi *boiler* berkisar antara 70% hingga 90% (Dewata et al, 2011).

Penelitian ini dilakukan untuk mencari solusi dari berbagai masalah yang sering dijumpai di lapangan atau perusahaan, yaitu banyaknya produksi barang yang menurun disebabkan karena kurangnya sumber daya energi yang menjadi faktor utama saat proses produksi. Hampir keseluruhan energi yang digunakan untuk produksi dihasilkan oleh *boiler*, maka dari itu peralatan *boiler* harus selalu dalam keadaan baik untuk menunjang proses produksi. Apabila *boiler* dalam

keadaan baik, tentu menghasilkan efisiensi yang baik pula. *Boiler* harus sering dilakukan perawatan secara berkala agar tidak terjadi kerusakan pada bagian-bagian yang sangat penting. Dalam penelitian ini, untuk meningkatkan efisiensi *boiler* dilakukan pengamatan terhadap kandungan O₂ pada gas buang yang berada pada *stack*.

Kehilangan kalor (*heat loss*) pada *boiler* sering terjadi karena banyaknya kemungkinan kehilangan panas pembakaran seperti : panas yang terbawa keluar oleh gas buang tanpa uap air (*dry flue gas loss*), panas yang terbawa keluar oleh uap air panas, termasuk panas *sensible* dan *latent*, komponen bahan bakar yang tidak terbakar dan produk pembakaran tidak sempurna termasuk *solid ash combustible* dan CO dalam gas buang kehilangan panas dari dinding *boiler* melalui isolasi (radiasi dan konveksi), panas yang terbawa keluar bersama *blowdown*, kehilangan panas pembakaran tersebut yang disebut dengan rugi-rugi panas.

Turunnya unjuk kerja *boiler* adalah permasalahan serius yang harus di perhatikan bila tidak ingin proses produksi terganggu pemeliharaan. Dengan turunnya unjuk kerja *boiler* akan memberi dampak terhadap penurunan efisiensi keseluruhan unit yang tidak mampu lagi menghasilkan daya sebesar pada saat komisioning. Sebagai contoh, kasus di PT Pertamina RU VI Balongan pada unit *boiler* penurunan efisiensi yang berakibat pada produksi BBM di kilang PT Pertamina RU VI Balongan menjadi turun. Dengan kondisi ini, perlu adanya pengkajian dan penanganan tentang studi dan analisis unjuk kerja *boiler*. Dari hasil analisa yang didapat nantinya diharapkan dapat dilakukan tindak lanjut yang

berdampak pada peningkatan unjuk kerja *boiler* dan otomatis peningkatan keseluruhan unit *boiler*.

Efisiensi *boiler* yang tidak baik dapat mempengaruhi produksi *steam* yang dihasilkan, karena *steam* hasil produksi dari unit *boiler* kemudian akan digunakan untuk hampir keseluruhan unit kerja yang terdapat pada PT Pertamina RU VI Balongan, Indramayu, Jawa Barat. Oleh karena itu meningkatnya efisiensi *boiler* dapat mempengaruhi produksi BBM di kilang PT. Pertamina RU VI Balongan, Indramayu, Jawa Barat.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang terdapat beberapa faktor penyebab penulis melakukan penelitian ini adalah :

1. Menurunnya produksi bahan bakar pada kilang minyak PT Pertamina RU VI Balongan, Indramayu yang disebabkan oleh menurunnya unjuk kerja *boiler*.
2. Semakin mahalnya biaya produksi sehingga harus memunculkan alternatif lain dengan menghemat sumber energi.
3. *Boiler* sebagai peralatan utama yang memasok hampir 90 % energi untuk produksi PT Pertamina RU VI Balongan, Indramayu harus dalam keadaan kondisi baik.
4. Turunnya unjuk kerja *boiler* disebabkan antara lain: buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas, buruknya operasi, kehilangan panas saat dioperasikan dan pemeliharaan.

C. Batasan Masalah

Evaluasi performa *boiler* serta penyelesaian teoritisnya akan mempunyai cakupan yang sangat luas dan kompleks. Oleh karena itu dalam penelitian ini diberikan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Pengkajian hanya membahas analisa performa *boiler* dengan mengurangi *heat loss*.
2. Menentukan langkah-langkah proses untuk meningkatkan efisiensi *boiler*.
3. Dimensi dan geometri *boiler* diambil dari PT PERTAMINA RU VI Balongan, Indramayu, Jawa Barat.
4. *Mass flow rate* gas buang dari *boiler* dan udara sekunder adalah konstan.
5. Analisis penelitian diambil berdasarkan volume O_2 yang terdapat pada *flue gas*.

D. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh kandungan O_2 di dalam *flue gas* terhadap efisiensi *boiler*.
2. Bagaimana pengaruh nilai kehilangan kalor terhadap efisiensi *boiler*.
3. Bagaimana proses pengembangan perhitungan analisis efisiensi *boiler* dengan menggunakan *software sinboiler*.

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh kandungan O_2 di dalam *flue gas* terhadap performa mesin *boiler*.
2. Mengetahui pengaruh nilai kehilangan kalor terhadap efisiensi *boiler*.
3. Membuat dan mengembangkan *software sinboiler* untuk mempermudah perhitungan efisiensi *boiler*.

F. Manfaat Penelitian

1. Untuk memenuhi persyaratan dalam rangka menyelesaikan studi Strata I Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang dan meraih gelar sarjana
2. Dapat memberikan solusi melalui analisa yang tepat tentang efisiensi *boiler* yang efektif dan efisien terkait tentang permasalahan yang ada dalam dunia industri tersebut.
3. Mengetahui penyebab penurunan kinerja *boiler* yang disebabkan oleh kerugian-kerugian yang terjadi.
4. Menghemat biaya operasional produksi bahan bakar dengan meningkatnya unjuk kerja *boiler*.
5. Dapat mempermudah proses perhitungan efisiensi *boiler* dengan menggunakan *software sinboiler*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Pengertian *Boiler*

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berupa tanki/*drum/vessel* tertutup yang terbuat dari baja yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap atau dengan kata lain mentransfer panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar (baik dalam bentuk padat, cair atau gas) sehingga air berubah wujud menjadi uap. Di dalam *boiler*, energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi panas melalui proses pembakaran dan panas yang dihasilkan sebagian besar diberikan kepada air yang berada di dalam ketel, sehingga air berubah menjadi uap. *Boiler* didukung menggunakan peralatan-peralatan khusus seperti *Safety valve*, *Level Glass*, *Block Valve*, *Burner* pembakaran dan alat bantu lainnya (Pertamina, 1993). Pembakaran di dalam ruang bakar dilakukan secara kontinu dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. *Steam* yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai keperluan:

Pada tekanan rendah : Sebagai keperluan media pemanas

Pada tekanan sedang : Sebagai penggerak *steam turbine* pada pompa kompresor, *steam jet ejector*, dan lain-lain.

Pada tekanan tinggi : Sebagai tenaga penggerak *steam turbine* pada pembangkit tenaga listrik (Pertamina, 1993).

Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap *superheat* dengan tekanan dan *temperature* tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam *boiler*. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan *steam* diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan yaitu manometer. Terdapat sistem bahan bakar pada peralatan *boiler* untuk menyediakan bahan bakar yang dapat menghasilkan panas yang dibutuhkan oleh *boiler*. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada *system*. *Boiler* PT Pertamina menggunakan bahan bakar gas sebagai bahan bakar utama saat pembakaran.



Gambar 2.1. *Boiler*

(Sumber : Mechanical engineering, Construction & Maintenance[accessed 26/9/ 2016])

2. Klasifikasi Boiler

Pada dasarnya terdapat dua jenis boiler yaitu :

a. Ketel Uap Pipa Api (*Fire Tube Boiler*)

Fire tube boiler mengalirkan air melalui *shell* dengan menerima panas dari gas pembakaran yang mengalir melalui susunan pipa api. *Fire tube boiler* memiliki tekanan operasi standar yaitu maksimum 250 psi (16 bar) pada umumnya berkapasitas kurang dari 7 ton/jam (Dalimunthe, 2006). Kemudian pada proses perubahan air menjadi *steam* dilakukan didalam *drum* dimana air dipanaskan dengan gas buang dari ruang bakar yang disalurkan melalui bagian dalam pipa api, dengan kata lain bahwa pipa api berupa peralatan transfer panas dan tidak berisi air.



Gambar 2.2. ilustrasi *Fire Tube Boiler*
(Sumber : <http://steamofboiler.blogspot.co.id> accessed 14/8/2016)

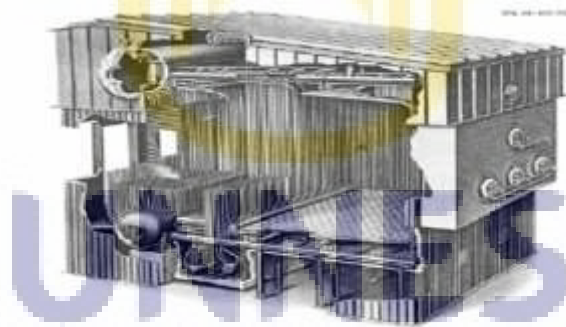
Boiler yang tergolong dalam jenis *fire tube boiler* adalah jenis boiler kecil yang sederhana dan pada umumnya memiliki kapasitas 10 Ton/jam dengan tekanan 16 kg/cm², jadi tergolong ke dalam boiler bertekanan rendah. Sering disebut ketel-ketel tanki, karena tempat air yang akan dipanaskan biasanya berbentuk tanki. Karena kapasitas, tekanan, dan temperature uap yang dihasilkan rendah maka *fire tube boiler* jarang digunakan untuk pengolahan modern. *Fire*

tube boiler memiliki konstruksi yang relatif sederhana, kokoh, dan mudah dijangkau harganya. Kekurangannya adalah lambat dalam mencapai tekanan operasi pada awal operasi, dan keuntungan menggunakan *boiler* ini adalah fleksibel terhadap perubahan beban secara cepat (Dalimunthe, 2006).

b. Ketel Pipa Air (*Water Tube Boiler*)

Ketel pipa air, yaitu ketel uap dengan air atau uap berada di dalam pipa - pipa atau tabung dengan pipa api atau asap berada diluarnya.

Di dalam *water tube boiler*, air umpan *boiler* mengalir melalui pipa-pipa masuk ke dalam drum. *Steam* terbentuk karena sirkulasi air yang dipanaskan oleh gas pembakar yang terjadi di daerah uap di dalam drum. Sebagai ketel yang sudah sangat modern, *water tube boiler* biasanya dirancang dengan tekanan sangat tinggi dan memiliki kapasitas *steam* antara 4.500-12.000 kg/jam (UNEP, 2006).



UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Gambar 2.3. *Water Tube Boiler*

(Sumber : <http://steamofboiler.blogspot.co.id> accessed 14/8/2016)

Umumnya *water tube boiler* terdiri dari beberapa *drum* (biasanya 2 atau 4 buah) dengan *eksternal tubes*. Biasanya ujung-ujung *tubes* disambung atau dihubungkan langsung dengan *drum-drum* dengan cara di *roll* atau di ekspansi, kadang kala sambungan antara *tubes* dengan *drum* selain di *roll* juga diperkuat dengan las atau *seal welded*.

Apabila kapasitas *boiler* lebih besar dari 20 MW atau tekanan operasi *boiler* lebih besar dari 24 bar. Maka *boiler* dianggap cocok untuk produksi uap dalam jumlah besar dengan skala industri dengan uap yang dihasilkan yaitu *superheated* (Dalimunthe, 2006). Penggunaan *water tube boiler* diakui memiliki keuntungan yang lebih karena memiliki reaksi yang cepat terhadap beban, dan kelembapan panas termal yang dapat dikatakan kecil.

Unit pengolahan yang sudah modern banyak menggunakan *water tube boiler* sebagai pilihan, karena dapat menghasilkan uap air dengan kapasitas, temperatur, dan tekanan yang tinggi sesuai kebutuhan.

3. Sistem Boiler

Sistem yang dimiliki *boiler* untuk memenuhi kebutuhan *steam* terbagi menjadi beberapa sistem yaitu sistem air umpan (*feed water system*), sistem *steam* (*steam system*) dan sistem bahan bakar (*fuel system*) (UNEP, 2006).

- a. **Sistem air umpan (*feed water system*)** merupakan sistem yang berguna untuk memenuhi kebutuhan *steam* dengan cara mengalirkan air umpan ke dalam boiler.
- b. **Sistem *steam* (*steam system*)** merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses produksi *steam* dan mengumpulkan berbagai data dalam boiler dengan cara mengalirkan uap ke titik pengguna dengan menggunakan sistem pemipaan.
- c. **Sistem bahan bakar (*fuel system*)** merupakan sistem yang berguna untuk mengontrol proses pembakaran dengan cara mensuplai bahan bakar ke dalam dapur pembakaran untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan.

4. Air Umpan Boiler

Sistem air umpan yang dimiliki boiler untuk menghasilkan steam harus memenuhi spesifikasi dan syarat tertentu sehingga dapat digunakan sebagai umpan boiler. Dengan menggunakan pompa air pengisian ketel atau *Boiler Feed Water Pump* (BFWP) air umpan boiler dipompakan dari luar masuk ke dalam boiler dari tekanan 1 bar hingga mencapai tekanan kerja maksimum di dalam boiler (Djokosetyardjo, 1990).

Air yang disuplai ke boiler untuk dirubah menjadi steam disebut air umpan (*feed water*). Terdapat dua sumber air umpan yaitu :

- a. Steam yang mengembun yang dikembalikan dari proses atau kondensat.
- b. Air baku yang sudah diolah yang harus diumpankan dari luar ruang boiler dan (*plant process*) yang disebut air *make up* (UNEP, 2006).

Batasan-batasan yang direkomendasikan bila *demineralized water* dipakai sebagai *feed water* untuk boiler adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1. Batasan *Feed Water*

No	Item	Unit	Feed water	Boiler Water
1	pH value (at 25°C)	-	8.0 – 9.0	9.2 – 10.8
2	Hardness (as CaCO ₃)	pp	0	-
3	Oil content	pp	Maintain at nearly "0"	-
4	Dissolved O ₂	ppm	<0.03	-
5	M alkanity (as CaCO ₃)	ppm	-	-
6	P alkanity (as CaCO ₃)	ppm	-	-
7	Hydrazine N ₂ H ₄	Ppm	>0.01	-
8	Total Iron Fe	ppm	<0.1	-
9	Total copper Cu	ppm	<0.05	-
10	Total Dissolved Solids	ppm	-	<300
11	Chloride ion Cl	ppm	-	<30
12	Phosphatic acid ion PO _{3/4}	ppm	-	3-10
13	Silica SiO ₂	ppm	<0.2	<5
14	Conductivity	us/cm	<10	<500

(Sumber : Pertamina, 1993)

Selama awal operasi *boiler* baru, diperlukan penambahan frekuensi analisa untuk menentukan dengan cepat jenis *chemical* dan jumlah yang tepat sesuai hasil analisisnya.

Tabel 2.2. *Checking item dan Testing Method*

No	Item	Recomended Testing Method
1	pH value	ASTM D1293 (Test for pH water)
2	Hardness	ASTM D1126 (Test for Hardness in Water)
3	Oil Content	ASTM D2778 (Test for Solvent extraction)
4	Dissolved O ₂	ASTM D 888 (Test for Dissolved Oxygen)
5	M Alkanity	ASTM D1067 (Test for alkanity)
6	P Alkanity	ASTM D1067 (Test for acidity)
7	Hydrazine N ₂ H ₄	ASTM D1385 (Test for hydrazine)
8	Total Iron Fe	ASTM D1068 (Test for iron in water)
9	Total copper Cu	ASTM D1688 (Test for copper)
10	Total Dissolved Solids	ASTM D1888 (Test particulate and dissolved)
11	Chloride Iron Cl	ASTM D 512 (Test for Chloride iron)
12	Phosphatic acid ion PO _{3/4}	ASTM D 515(Test for Phosphrus)
13	Silica SiO ₂	ASTM D 859 (Test for Silica)
14	Conductivity	ASTM D1125 (Test for electrical conductivity)

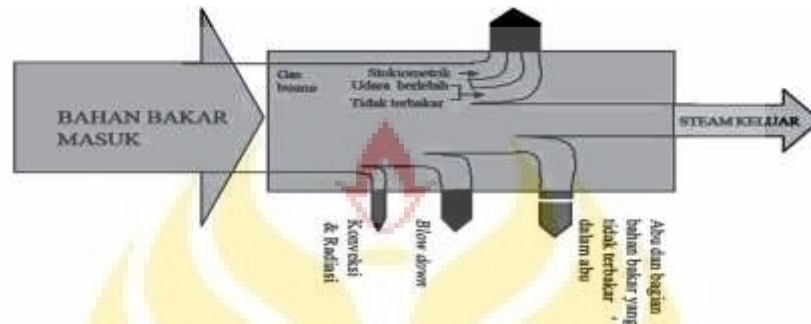
(Sumber : Pertamina.1993)

Kualitas air umpan yang tidak baik (termasuk air *condensate*), air *boiler* akan menyebabkan korosi dan memicu timbulnya kerak atau jelaga pada komponen *boiler*.

5. Neraca Kalor

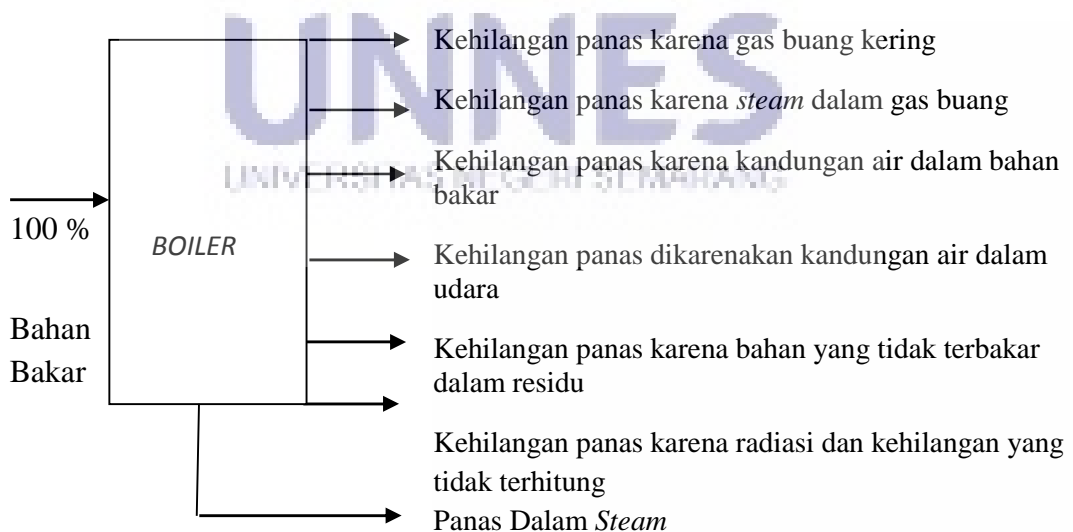
Efisiensi dan rasio penguapan merupakan parameter kinerja *boiler*, seperti, berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi. Untuk membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari menggunakan neraca panas (UNEP, 2006). Diagram alir energi dapat menggambarkan proses pembakaran di dalam *boiler*. Diagram ini

menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi. Jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing ditunjukkan dengan panah tebal (UNEP, 2006).



Gambar 2.4. Diagraf Neraca Energi *Boiler*
(Sumber : UNEP, 2006)

Keseimbangan energi total yang masuk *boiler* terhadap yang meninggalkan *boiler* dalam bentuk yang berbeda disebut neraca panas. Kehilangan panas yang terjadi ditunjukkan dalam gambar berikut ini (UNEP, 2006)

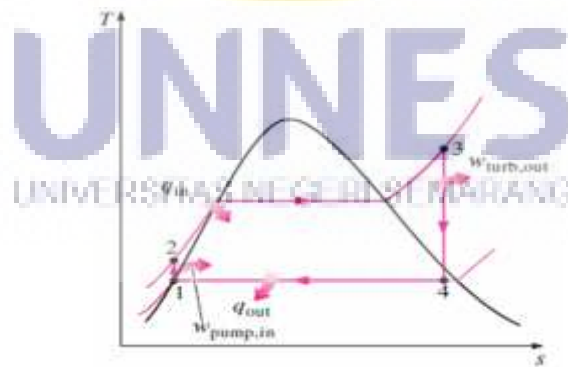


Gambar 2.5. Kehilangan panas pada *boiler*
(Sumber: UNEP, 2006)

6. Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus standard untuk pembangkit daya yang menggunakan tenaga uap. Siklus Rankine nyata yang digunakan dalam instalasi pembangkit daya jauh lebih rumit dibandingkan siklus Rankine ideal asli yang sederhana. Siklus Rankine juga disebut siklus uap-cair, siklus ini biasanya digambarkan pada kedua diagram, yaitu P-V dan T-S dengan garis-garis yang menunjukkan uap jenuh dan cairan jenuh. Fluida kerjanya biasanya adalah H₂O, tetapi tidak harus menggunakan fluida tersebut (El-Wakil, 1985). Siklus Rankine memiliki proses termodinamika sebagai berikut :

- 1-2 = Kompresi secara isentropis (terjadi di pompa)
- 2-3 = Penambahan panas secara isobarik (terjadi di *boiler*)
- 3 - 4 = Ekspansi secara isentropis (terjadi di turbin)
- 4 - 1 = Melepas panas secara isobarik (terjadi di *condenser*) (Cengel dan Boles, 1989).



Gambar 2.6. Bagan diagram alir siklus rankine
(Sumber : Cengel dan Boles, 1989)

Berdasarkan Gambar 2.6 tentang diagram siklus Rankine menunjukkan suatu proses aliran yang sederhana, dimana *steam* yang dihasilkan oleh *boiler*

dibutuhkan oleh turbin untuk menghasilkan usaha. Siklus Rankine bekerja dengan cara mengubah panas menjadi kerja. Panas yang dihasilkan dari luar dengan aliran tertutup. Turbin memproduksi daya yang lebih besar dari yang dibutuhkan oleh pompa dan *output* daya bersih sama dengan selisih antara kecepatan *input* panas dalam *boiler* dan kecepatan penolakan panas dalam kondensor (Asmudi, 2010).

7. Bahan Bakar Boiler

Bahan bakar adalah bahan yang dapat dibakar untuk menghasilkan panas (*kalor*). Proses pembakaran merupakan proses kimia antara bahan bakar, udara dan panas. Proses pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar ketel (*boiler*) bertujuan untuk merubah fasa air menjadi fasa uap (Hasibuan dan Napitupulu, 2013).

Bahan bakar yang digunakan *boiler* digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu: Bentuk padat, bentuk cair, dan bentuk gas, bentuk padat ini ada yang bisa langsung dipakai seperti batu bara. (Maulana dan Sulaksmo, 2014). Pada prinsipnya ketiganya memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing, namun saat ini industri dengan skala besar lebih memilih bahan bakar gas sebagai bahan bakar utama, dikarenakan memiliki efektifitas yang tinggi dan tidak menimbulkan kotor pada permukaan pembakaran. Berikut ini adalah jenis bahan bakar yang digunakan oleh *boiler* :

- a. Bahan bakar padat (batubara)

Batubara merupakan bahan bakar jenis batuan sedimen berwarna coklat kehitaman yang dapat terbakar terdiri dari konsolidasi dan senyawa daripada

tumbuhan yang tumbuh di hutan. Komposisi kimia batubara bervariasi dari satu daerah ke daerah yang lain, tergantung pada vegetasi dari yang dibentuk dan kondisi lingkungan (seperti suhu dan tekanan) yang terkena formasi lingkungan. Batubara memiliki kandungan kimia utama yaitu karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen, batubara juga mengandung air dan kotoran yang abu, merkuri, dan belerang (Oland, 2002).

b. Bahan bakar cair (minyak)

Minyak bumi dan gas alam saling bersaing dan saling melengkapi batubara, sehingga memungkinkan meluasnya industrialisasi sebagaimana yang dapat dilihat saat ini karena batubara merupakan benda yang berat, besar dan kotor, maka batubara terutama mendapatkan pasaran sebagai bahan bakar *stationer*, atau untuk mesin-mesin kecepatan rendah.

Bahan bakar cair tergolong mudah dalam penggunaannya, ditambah dengan efisiensi panas yang tinggi. Selain itu, bahan bakar cair lebih mudah di distribusikan dan mudah dalam penanganan, hal ini membuat bahan bakar cair yaitu minyak bumi sebagai salah satu bahan bakar yang paling sering digunakan khususnya untuk kendaraan bermotor. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik. Bahan bakar cair memiliki nilai kalor pembakaran yang cenderung konstan sehingga memudahkan untuk mengontrol suatu alat pembakaran, dan dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi.

c. Bahan bakar gas

Gas alam merupakan bahan bakar hidrokarbon yang tidak berwarna yang utamanya terdiri dari metana (CH_4) dan etana (C_2H_6), pada prinsipnya dua

komponen yang mudah terbakar. Keduanya biasanya ditemukan di bawah permukaan bumi dalam batu berpori yang formasinya tidak keropos. Ketika mengebor sebuah sumur minyak yang dibor melalui pembentukan gas alam, yang berada di bawah tekanan, mengalir ke permukaan di mana gas tersebut didistribusikan menggunakan jaringan pipa ke fasilitas pengolahan. Hal ini membuat kebanyakan *boiler* menggunakan gas alam dikarenakan dapat disalurkan langsung ke *boiler* dan memiliki efisiensi yang tinggi serta tidak menghasilkan abu pembakaran. Selain kemudahan distribusi, penggunaan *boiler* gas alam membutuhkan ruang *boiler* relatif kecil, sehingga tidak terlalu banyak mengeluarkan material untuk membuatnya. Dengan nilai kalor sekitar 1.000 btu/ft³ dalam kondisi standar dari 60°F pada tekanan atmosfer dan persyaratan berlebih pada udara rendah yang berkontribusi untuk efisiensi tinggi, gas alam mungkin merupakan salah satu bahan bakar yang ideal (Oland, 2002).

Panas (kalor) yang timbul karena pembakaran bahan bakar tersebut disebut hasil pembakaran atau nilai bakar (*heating value*). Nilai kalor (*heating value*) adalah jumlah energi panas yang diperoleh melalui proses pembakaran 1 kg bahan bakar (Hasibuan dan Napitupulu, 2013).

Pembakaran bahan bakar baik bahan bakar padat, cair dan gas memiliki nilai kalor yaitu dengan jumlah panas yang diperoleh bila suatu jumlah bahan bakar terbakar dengan sempurna. Jumlah kilo *Joule* (kJ) yang diperoleh pada pembakaran sempurna suatu bahan bakar tiap kg atau tiap m³ (Bruijn dan Muilwijk, 1982).

Jumlah udara pembakaran yang menurut teori diperlukan untuk membakar secara sempurna suatu bahan bakar, dapat dihitung dari susunan kimia bahan bakar tersebut. Pada umumnya zat yang terkandung dalam sulfur dan zat asam diabaikan.

8. Peralatan *Boiler*

Peralatan ketel uap dapat di kelompokkan menjadi beberapa bagian yaitu :

- a. Peralatan Utama
- b. Peralatan Pengaman
- c. Peralatan Pendukung

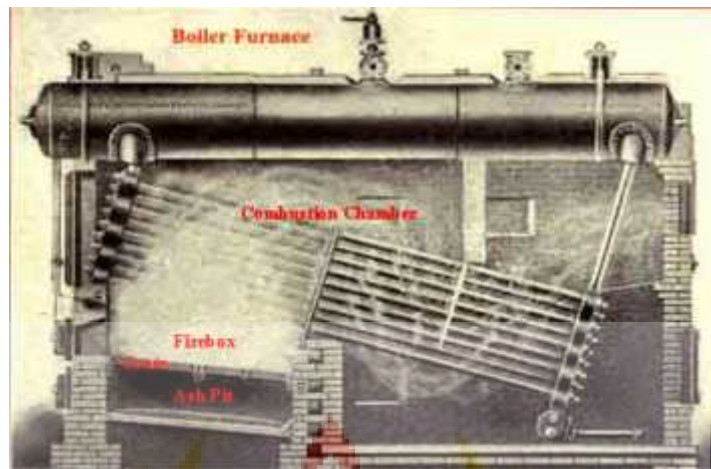
a. Peralatan Utama

Peralatan utama ketel uap terdiri dari :

1) *Furnace*

Furnace adalah suatu ruangan dapur sebagai penerima bahan bakar untuk pembakaran, yang dilengkapi dengan *fire grate* pada bagian bawah di letakkan rangka bakar sebagai alas bahan bakar, dan pada sekelilingnya adalah pipa-pipa air ketel yang menempel pada dinding tembok dapur yang mendapat atau menerima panas dari bahan bakar.

Proses pembakaran terjadi pada *furnace* yang memiliki ruangan cukup besar berukuran 6-10 m. Pada dapur pembakaran terjadi reaksi pembakaran yang dapat diisolasi dan dibatasi sehingga reaksi tetap dapat dikendalikan. Selain itu, untuk proses pembakarannya dapur ditunjang oleh peralatan pembakaran lainnya. (Khan dan Shahabanaz, 2014).



Gambar 2.7. *Furnace*

(Sumber : <http://www.electrical4u.com/steam-boiler-furnace-grate-firebox-combustion-chamber-of-furnace/> accessed 14/9/2016)

Beberapa faktor yang perlu diperhatikan agar proses pembakaran dapat berlangsung sempurna adalah :

- a. Tipe dari alat pembakaran
- b. Sifat bahan bakar yang digunakan
- c. Aliran udara yang digunakan
- d. Penyediaan udara dan derajat pemanasan awal

Dinding dapur bakar terdapat pipa-pipa berisi air yang akan berubah menjadi uap setelah mendapat pemanasan dari proses pembakaran. Pipa-pipa air tersebut merupakan tempat pembentukan uap dan menjaga agar temperature ruang bakar tidak terlalu tinggi. Ruang bakar ini kemudian diisolasi bagian luarnya agar aman jika disentuh, sedangkan pipa-pipa satu dengan yang lainnya dihubungkan dengan plat sehingga merupakan satu kesatuan atau satu rangkaian.

2) *Steam Drum*

Steam Drum adalah suatu silinter tertutup yang terbuat dari baja yang ditempatkan dibagian samping atas dari dapur api (*Fire box*). *Steam Drum* digunakan sebagai tempat pembentukan uap yang dilengkapi dengan sekat-sekat penahan butir-butir air untuk memperkecil kemungkinan air terbawa uap. Fungsi drum uap untuk memisahkan air dari uap yang dihasilkan di dinding tungku dan mengurangi isi padat terlarut dari uap di bawah batas yang ditentukan dari 1 ppm drum terletak di bagian depan atas *boiler* (Khan dan Shahabanaz, 2014).

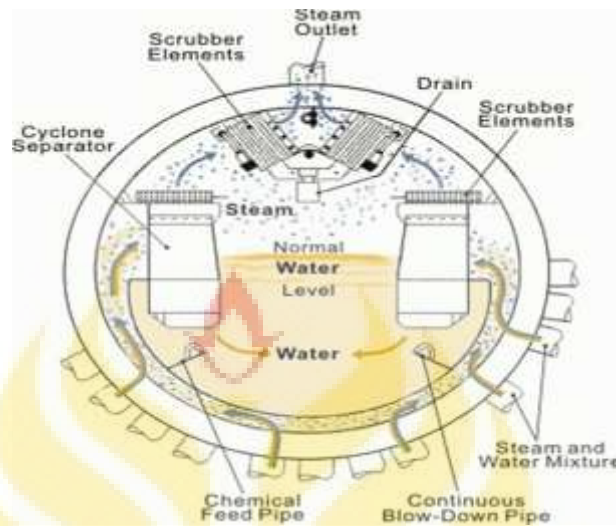


Gambar 2.8. *Steam Drum*
(Sumber : Khan dan Shahabanaz, 2014)

3) *Water Drum*

Drum bawah berfungsi sebagai tempat pemanasan air ketel yang didalamnya dipasang plat-plat pengumpul endapan lumpur untuk memudahkan pembuangan keluar (*Blowdown*). Selain itu, *water drum* juga berfungsi sebagai

tempat pengendapan kotoran-kotoran air dalam ketel, yang tidak menempel pada dinding ketel, melainkan terlarut dan mengendap.



Gambar 2.9. *Water Drum*

(Sumber : <http://pudeb.com/steam-drums-boiler-drum-boiler-steam-drums-dyna-therm-corporation/> accessed 10/8/2016)

4) *Superheater*

Superheater adalah bagian yang cukup penting pada *boiler*, peralatan ini berfungsi untuk memanaskan uap jenuh sampai beberapa derajat di atas temperature saturated *steam* menjadi uap panas lanjut. Untuk *boiler* di kilang minyak RU-VI Balongan temperature superheated *steam* berkisar antara 400-500°C. Uap panas lanjut memiliki *temperature* yang lebih tinggi dibandingkan dengan uap jenuh dengan tekanan yang sama. *Superheater tubes* dipasang ke *headers* dengan cara *expanding*. *Superheater* dipasang diantara *screen tube zone* dan *bank tube zone*. Uap jenuh dari *steam drum* dipanasi lebih lanjut melalui 6 *pass superheater* (Pertamina, 1993). Prinsip kerja *superheater* yaitu pada saat pemanasan, api harus diatur sehingga suhu dari pipa *superheater*

tidak melebihi batas keamanan yang diizinkan. Suhu dari logam pipa pada waktu pemanasan ketel biasanya dijaga agar berada dibawah suhu pipa pada saat ketel berada pada kapasitas penuh. Hal ini dapat dilaksanakan dengan mengatur waktu dari saat pemanasan sampai saat tekanan kerja tercapai, dengan maksud untuk membatasi suhu gas masuk ke *superheater* pada 500°C untuk *superheater* dengan pipa baja biasa.



Gambar 2.10. *Superheater*

(Sumber : <https://en.wikipedia.org/wiki/Superheater> accessed 9/8/2016)

5) *Reheater*

Fungsi *reheater* untuk memanaskan uap yang keluar dari turbin yang memiliki tekanan tinggi dengan suhu 540°C . *Reheater* terdiri dari dua bagian, bagian depan dan bagian belakang (Khan dan Shahabanaz, 2014). Dengan adanya *reheater* memudahkan *boiler* untuk mengendalikan temperatur proses pembakaran. Uap yang keluar dari turbin tidak kehilangan panas yang cukup tinggi karena mendapatkan perlakuan panas dari *reheater*, sehingga panas yang terbuang tidak banyak.



Gambar 2.11. *Reheater*
(Sumber : Khan dan Shahabanaz)

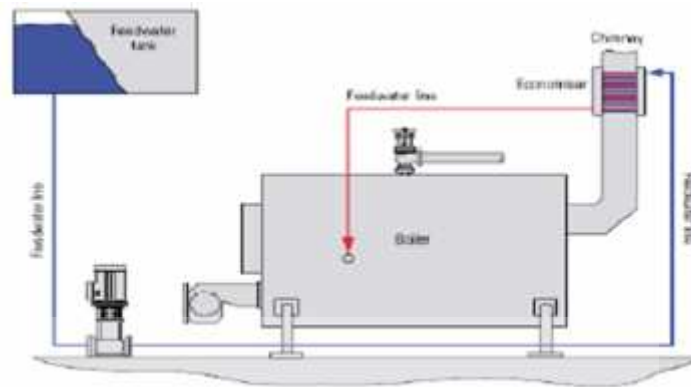
6) *Induce Draft Fan*

Induce Draft Fan adalah tempat pembuangan gas bekas pada ruang pembakaran kedua yang dihisap menggunakan blower melalui saringan abu kemudian dibuang ke udara bebas melalui cerobong asap. Pengaturan tekanan dalam dapur dilakukan pada corong keluar blower (*exhaust*) dengan katup yang diatur secara otomatis oleh alat hidrolis (*Furnace Draft Control*).

7) *Economizer*

Alat ini berfungsi untuk pemanasan awal air pengumpan ketel yang akan masuk pada *drum* ketel. Alat ini digunakan untuk menguapkan air yang membutuhkan panas yang lebih sedikit karena air pengumpan sudah cukup panas.

Economizer terletak di belakang *boiler*, gas hasil proses pembakaran di bawah *superheater horizontal*.



Gambar 2.12. *Economizer*

(Sumber : <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/the-boiler-house/miscellaneous-boiler-types-economisers-and-superheaters.aspx>
accessed 9/8/2016)

8) *Force Draft Fan*

Force draft fan (FDF) adalah alat yang digunakan untuk mensuplai udara yang diperlukan untuk pembakaran *fuel* di dalam *furnace* yang melalui lorong udara sebelum bercampur dengan bahan bakar dan juga untuk membantu aliran *flue gas* keluar melalui cerobong (*stack*).



Gambar 2.13. *Force Draft Fan*

(Sumber : <http://www.gstrading.in/forced-draft-fan.htm>

accessed 2/9/2016)

9) *Primary Air Fan*

Primary Air Fan memiliki pesawat masing-masing dua per unit dengan kapasitas 50% dirancang untuk menangani atmosfer udara hingga suhu 50 °C. *Primary air fan* ini terletak di dekat boiler pada ketinggian tidak sampai 1 m.

10) *Soot Blower*

Soot Blower adalah alat yang berfungsi untuk membersihkan jelaga dan kotoran yang terbentuk dan menempel pada bagian dinding-dinding *tube* dengan menggunakan *steam* bertekanan. Jelaga-jelaga jika tidak dibersihkan akan menghambat transfer panas *fuel gas* ke *steam* atau air yang berarti menurunkan efisiensi.

Berikut terdapat tiga jenis *soot blower* dalam jumlah yang diperlukan :

- a. *Long retractable soot blowers.*
- b. *Wall blower*
- c. *Air heater blower superheated steam*

Proses *soot blowing* tekanan dapat berkurang hingga 31 Kg/cm² pada 330 °C dengan cara mengurangi tekanan pada katup. *Soot blower* digunakan untuk efisiensi pembersihan pada beban tungku, *superheater*, *reheaters* dan regenerator *air heater*. Jelaga yang terbentuk akibat proses pembentukan uap harus dikontrol secara rutin agar tidak menghambat proses transfer panas. Laju perpindahan panas dapat berkurang karena banyaknya kotoran yang menempel pada permukaan pipa pipa penyalur ke titik pengguna.

11) *Burner*

Burner adalah alat yang digunakan dalam proses pembakaran bahan bakar sehingga menghasilkan sumber panas yang diperlukan .

Fungsi utama *burner* yaitu :

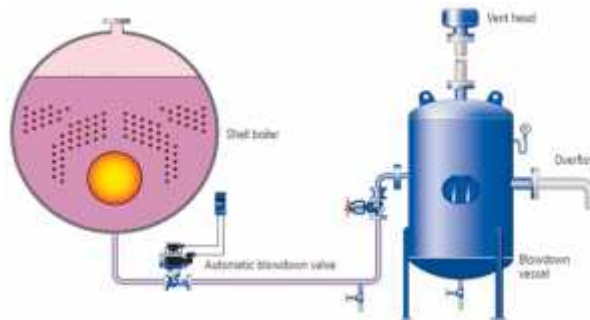
- a. Mensuplai bahan bakar ke ruang bakar.
- b. Mensuplai udara ke ruang pembakaran.
- c. Mencampur udara ke *fuel*.
- d. Memberikan nyala api dan membakar campuran udara *fuel*.
- e. Memberikan hasil pembakaran.



Gambar 2.14. *Burner*
(Sumber : Khan dan Shahabanaz, 2014)

12) *Blowdown Continue*

Blowdown continue adalah pembuangan air ketel yang dilakukan secara terus menerus. Alat ini berfungsi untuk membersihkan pipa-pipa pemasok air, Adapun air ketel yang dibuang tersebut diambilkan dari *steam drum* yaitu pada permukaan air. Blowdown dilakukan secara terus menerus untuk menghilangkan kotoran yang dibawa oleh air umpan maupun bahan bakar, dengan demikian *boiler* akan tetap terjaga kebersihan dan efisien termisnya.



Gambar 2.15. *Blowdown Continue*

(Sumber : <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/the-boiler-house/boiler-fittings-and-mountings.aspx>

accessed 21/8/2016)

13) *Igniter*

Igniter merupakan alat yang terdapat pada *burner* fungsinya sebagai pemancar bahan bakar ataupun pemantik api. Udara diatomisasi dengan kompresor pada 7kg/cm^2 . Terdapat dua jenis *igniter* untuk menyuplai udara pada proses pembakaran minyak yaitu *Eddy Plate Igniter* dan *High Energy Arc Type Ignite* (Khan dan Shahabanaz, 2014).



Gambar 2.16. *Igniter*

(Sumber : Khan dan Shahabanaz, 2014)

14) *Stack*

Stack (cerobong) adalah suatu komponen yang digunakan untuk mengalirkan gas asap keluar dengan kecepatan tertentu. Untuk mengatasi kerugian-kerugian tekan total pada aliran gas maka harus dipasang fan. Cerobong memiliki beberapa fungsi yaitu :

- a. Pembuang gas keluar atmosfer
- b. Mengatasi kerugian tekanan

Panjang struktur *stack* dengan *single* atau *multiple* cerobong (satu cerobong 200 MW per unit). Biasanya tinggi daripada *stack* sangat bervariasi dengan mempertimbangkan lokasi, akan tetapi biasanya memiliki ketinggian antara 150 m hingga 200 m.

b. Peralatan Pengaman

Peralatan pengaman terdiri dari :

1) Gelas Penduga

Alat ini digunakan untuk mengetahui level air dalam *boiler*, prinsip kerja gelas pedoman air ini adalah berdasarkan bejana berhubungan dimana dalam praktek kadang kadang prinsip ini tidak dipenuhi 100% dan ada penyimpangan karena ada pengaruh uap diatas air (*expansi uap*). Sehingga penunjukan umumnya lebih tinggi permukaan air bahwa tinggi permukaan air dalam pesawat uap. Gelas penduga adalah alat yang digunakan untuk melihat ketinggian air di dalam drum atas, untuk memudahkan pengontrolan air dalam *boiler* selama *boiler* sedang dalam kondisi nyala. (Maulana dan Sulaksmo, 2014).

Hal yang utama diperhatikan dalam pemasangan pedoman air adalah bahwa tinggi permukaan air dalam pesawat uapnya harus dapat terlihat dengan jelas sekurang-kurangnya 60 mm diatas dan 40 mm dibawah permukaan air terendah. Untuk itu dibelakang gelas pedoman harus dipasang penerangan yang cukup.

2) Manometer (*pressure indicator*)

Manometer yaitu alat yang digunakan untuk mengukur tekanan uap di dalam *boiler* yang dipasang satu buah untuk mengukur tekanan uap panas lanjut dan satu lainnya untuk uap jenuh (Maulana dan Sulaksmama, 2014). Digunakan untuk mengukur tekanan uap secara langsung didalam bejana, Manometer dipasang pada bagian depan *boiler* atau pada bagian yang lain apabila dipandang perlu.

3) Thermometer

Alat ini biasa dipasang pada bagian-bagian *inlet outlet* dan *economizer*, *outlet main line superheater* dan pada tempat yang perlu untuk pengukuran. Thermometer (*temperature indicator*) digunakan untuk mengukur atau mengetahui seberapa tinggi temperatur uap secara langsung pada lokasi yang diperlakukan untuk pengukuran.

4) Katup Pengaman (*Pressure Safety Valve*)

Katup pengaman digunakan untuk menjamin keamanan ketel uap, bila tekanan di dalam ketel uap melampaui batas tekanan yang diperbolehkan maka katup pengaman tersebut secara otomatis harus dapat mengeluarkan tekanan yang

berasal dari ketel uap. Sehingga ketel uap terjamin keamanannya dari bahaya ledakan akibat kelebihan tekanan (*over pressure*).

5) Alarm

Alat ini berfungsi untuk memberi isyarat berupa suara, apabila terdapat bagian-bagian *boiler* yang tidak bekerja secara sempurna. Misalnya permukaan air di dalam *boiler* sangat rendah, saluran bahan bakar ada yang buntu. Untuk menghasilkan bunyi bel tersebut saklar yang terdapat pada *electric panel board* dipisahkan pada posisi *off*.

c. Peralatan Penunjang

Peralatan penunjang yaitu peralatan yang terdapat pada ketel uap selain dari peralatan utama, dengan tujuan untuk kelancaran operasi *boiler*. Tanpa adanya sarana dan peralatan penunjang, *boiler* tidak dapat bekerja sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan.

Peralatan-peralatan itu antara lain adalah :

- 1) Instrumentasi yang berfungsi mengukur, mengatur dan mengamankan operasi sebagai pengontrol kestabilan proses operasi *boiler*.
- 2) *Feed water pump* yang berfungsi untuk memompakan air penambah ke *boiler* dari *deaerator*.
- 3) *Chemical Pump* yang berfungsi untuk memompakan bahan kimia ke dalam proses pengolahan air umpan *boiler*.
- 4) *Demin Plant* yang berfungsi untuk menghilangkan mineral-mineral yang terkandung dalam air.

- 5) Kompresor yang berfungsi untuk memproduksi udara bertekanan sebagai kebutuhan alat instrument *boiler*.

9. Prinsip Kerja *Boiler*

Hot Condensate dari unit proses dimasukkan ke *header* yang selanjutnya dikirim ke *heat exchanger*. Pada *heat exchanger* ini terjadi pertukaran panas antara *hot condensate* yang bertemperatur $\pm 80^{\circ}\text{C}$ dengan *cold condensate* yang bertemperatur $\pm 40^{\circ}\text{C}$, maka akan didapat temperatur $\pm 40^{\circ}\text{C}$ pada keduanya.

Hot condensate keluar dari *heat exchanger* akan ditampung pada tangki, kemudian akan dipompakan ke *Deaerator* dan bercampur dengan *cold condensate*. *Deaerator* juga mendapat *make-up* dari (*demineralizer plant*) dan mendapat pemanas dengan menggunakan *low press (LP) steam*. Fungsi *Deaerator* itu sendiri adalah untuk menghilangkan oksigen yang terlarut dalam air umpan dengan cara:

- a. Pemanasan (dengan bantuan *low pressure steam*)
- b. Injeksi bahan kimia (*amine* dan *hydrazine*)

Sistem pemanasan menggunakan *Low Pressure (LP) steam* dengan tekanan $3,5 \text{ kg/cm}^2$ yang diinjeksikan ke dalam *deaerator* sehingga akan terjadi kontak antara uap dari bawah dengan air di atas. Dengan naiknya temperatur maka kelarutan gas-gas dalam air akan turun sehingga kandungan-kandungan gas akan terlepas dengan sendirinya dan dibuang ke udara luar melalui saluran buang (*venting*).

Untuk menghindari masih adanya oksigen yang tersisa maka diinjeksikan *hydrazine*, sedangkan untuk mengontrol pH agar tetap di atas 8 maka diinjeksikan *chemical amine*. BFW (*Boiler Feed Water*) dari *deaerator* kemudian dipompakan ke *boiler*. Dalam normal operasi cukup menggunakan 3 unit pompa dan 2 unit pompa lainnya diposisikan *stand by*.

BFW dengan tekanan $\pm 65 \text{ kg/cm}^2$ dan temperatur $\pm 140^\circ\text{C}$ akan diumpankan ke *boiler* melewati dan tekanan diturunkan menjadi $\pm 45 \text{ kg/cm}^2$. Dengan tekanan 45 kg/cm^2 dan temperatur 140°C akan masuk ke dalam *economizer* yang bertujuan untuk memanfaatkan panas *fuel gas* yang terbuang menuju *stack*. setelah melewati *economizer* maka temperatur BFW akan naik menjadi $\pm 190^\circ\text{C}$ - 200°C kemudian akan masuk ke dalam *steam drum*.

Steam drum ini akan dipisahkan secara alami tergantung berat jenis antara uap basah (*saturated*) dengan *liquid*. Yang masih berbentuk *liquid* akan turun ke bawah menuju *water drum* melalui *downcomer* dan akan dipanaskan melalui pemanasan dapur *boiler*. Setelah dipanaskan melalui dapur *boiler* maka *boiler water* yang masih berbentuk uap akan naik melalui *raiser* dan akan menjadi uap basah *saturated steam*. Uap yang masih basah kemudian akan dilewatkan di *superheater* yang bertujuan untuk mengeringkan uap basah dengan memanfaatkan panas *flue gas* buangan dari dapur. Setelah melalui *superheater* maka uap akan menjadi kering dengan temperatur $\pm 450^\circ\text{C}$ (*superheater steam*).

Temperatur *steam* membutuhkan $\pm 380^\circ\text{C}$ maka *superheated steam* akan diatur temperaturnya dengan menginjeksikan BFW di *desuperheater* melalui

control valve. Dengan demikian temperatur produk *steam* yang masuk ke dalam *header high press* (HP) akan terjaga dengan spesifikasinya.

Cara untuk mendapatkan kualitas *steam* yang terjaga dengan baik, maka perlu dilakukan *internal treatment* yaitu dengan menginjeksikan larutan *phosphate* pada *steam drum* yang bertujuan untuk melunakkan garam-garam mineral yang masih terdapat dalam air dan mengendapkannya menjadi lumpur untuk selanjutnya akan dibuang melalui *intermitten blowdown*. Injeksi *phosphate* juga berguna untuk menaikkan nilai pH (9,4-10,5) dan dapat pula membuat lapisan film pada *tube-tube boiler* (Pertamina, 1993).

Internal treatment saja belum cukup untuk menjaga kualitas *steam* dimana impuritis-impuritis yang melayang dalam air tidak dapat terendapkan seperti *silica* (SIO), maka dilakukan *continous blowdown* yang bertujuan untuk mencegah terjadinya *foaming*, *priming* dan *carry over*.

10. Efisiensi Boiler

Efisiensi adalah unjuk kerja suatu kemampuan alat utilitas. Disamping itu, definisi efisiensi *boiler* adalah tingkat kemampuan kerja *boiler* atau ketel uap yang didapat melalui perbandingan antara energi yang berpindah tempat atau diserap oleh fluida kerja didalam ketel dengan masukan energi kimia dari bahan bakar.

Air merupakan fluida kerja *boiler* yang memiliki kombinasi antara sistem-sistem peralatan yang dipakai untuk terjadinya perpindahan panas radiasi dan konveksi energi termal gas-gas hasil pembakaran (Asmudi, 2010).

Berikut ini adalah faktor kunci untuk memahami perhitungan efisiensi *boiler* :

a. Temperatur *Stack*

Temperatur *stack* adalah temperatur gas pembakaran yang meninggalkan *boiler* (Noviyanto, 2014). *Stack* digunakan untuk membuang gas buang pembakaran yang sudah tidak dapat terpakai kembali. Temperatur *stack* adalah salah satu factor yang dapat mempengaruhi efisiensi *boiler* secara tinggi.

b. Kandungan panas dari bahan bakar

Kandungan panas bahan bakar adalah karbon untuk rasio hidrogen, apakah panas laten (panas yang dibutuhkan untuk mengubah air menjadi uap) ataupun bukan (Noviyanto, 2014). Bahan bakar memiliki nilai kalor yang dapat mempengaruhi efisiensi. Kandungan panas yang ada di dalamnya apabila tidak di perhatikan akan terbangun dan otomatis peluang adanya kehilangan kalor semakin besar.

c. *Excess Air*

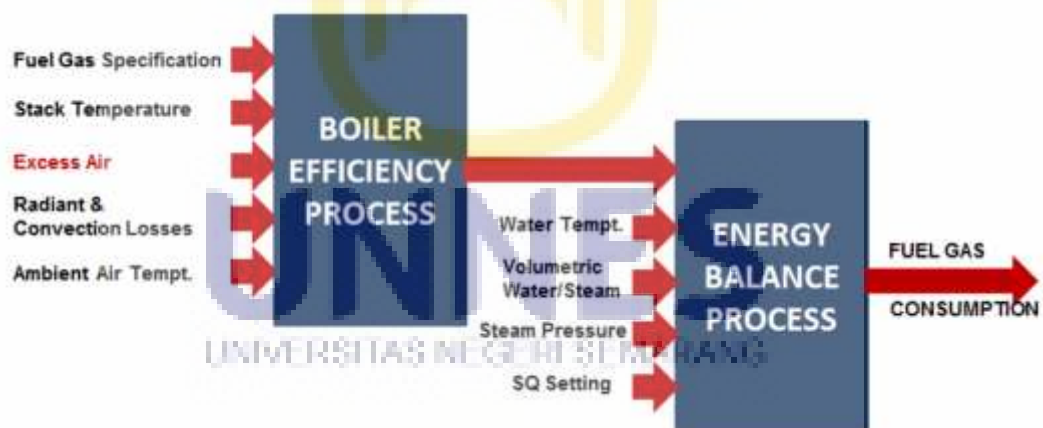
Kandungan udara berlebih pada *boiler* diyakini menimbulkan efek yang tidak baik bagi efisiensi *boiler*. Udara berlebih diatur dengan cara mengendalikan kandungan O₂ dengan melalui proses *trimming*.

d. Kerugian yang diakibatkan karena *temperature ambient* atau lingkungan

Temperatur lingkungan sangat berperan dalam proses operasi *boiler* karena *boiler bergantung* pada tinggi rendahnya temperature, sedangkan faktor tersebut dipengaruhi oleh cuaca disekitar ruangan *boiler*.

e. Kerugian akibat radiasi dan konveksi

Kehilangan kalor yang disebabkan karena radiasi dan konveksi dapat mengurangi kehilangan kalor dalam jumlah banyak. Dalam hal ini, permukaan-permukaan material pendukung *boiler* harus dalam keadaan layak operasi, supaya tidak mengganggu proses selama *boiler* beroperasi yang akan menyebabkan kehilangan kalor semakin banyak. Sebuah *boiler* dengan *shell* terisolasi akan memiliki suhu permukaan yang lebih rendah, dan memiliki kerugian yang lebih banyak karena lebih rendah permukaannya (Noviyanto, 2014). Apabila jumlah kerugian panas yang disebabkan karena radiasi dan konveksi tidak dapat dihindari, dampaknya akan meluas. Semua komponen akan terjadi kerusakan dan tidak dapat menghantarkan panas secara sempurna. Dengan demikian akan sangat mengurangi efisiensi *boiler*.



Gambar 2.17. Kerangka Konseptual Bahan Bakar Model Konsumsi Gas
(Sumber : Noviyanto, 2014)

Cara menyatakan efisiensi *boiler* ada 3 macam yaitu :

- a. Berdasarkan uap yang dihasilkan

$$= \frac{m (H - h)}{m \cdot F} \quad (2.1)$$

Keterangan :

M_s = Massa *steam* (lb/jam)

H = Enthalpy (btu/lb)

H_f = Enthalpy air umpan *boiler* (btu/lb)

m_f = Jumlah bahan bakar (lb/jam)

F = Nilai bahan bakar (btu/lb)

- b. Berdasarkan kerugian panas

$$= 100\% - (\text{jumlah kerugian panas}) \quad (2.2)$$

- c. Berdasarkan Neraca panas

$$= \frac{K_o}{K_i} \times 100\% \quad (2.3)$$

- d. Metode API 560

$$= \left(\frac{(L + H + H + H) - (Q + Q)}{L + H + H + H} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

(API Standard 560, 2001).

11. Inefisiensi Pada *Boiler*

Inefisiensi *boiler* adalah kerugian-kerugian yang terjadi yang disebabkan karena faktor internal maupun eksternal yang dapat mempengaruhi kehilangan panas dalam jumlah banyak. Faktor tersebut dapat menghambat efisiensi pada

boiler untuk tetap tinggi, oleh karena itu harus dilakukan pengamatan serius agar tidak terjadi kehilangan panas yang berarti. Usaha untuk menghambat kehilangan panas harus dilakukan, contohnya dengan melakukan pernaikan pada system yang ada secara rutin.

Kehilangan panas pada *boiler* dapat terjadi di dalam ruang bakar boiler yaitu disebabkan karena faktor berikut ini :

- a. Kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering

$$Q_{\text{gas buang}} = m_{\text{gas buang}} \cdot C_p_{\text{gas buang}} \cdot (T_{\text{gas buang}} - T_{\text{ambient}}) \quad (2.5)$$

(Syukran dan Suryadi, 2007).

- b. Kehilangan panas yang diakibatkan oleh konveksi dan radiasi dinding

$$Q_{(conv/rad)} = \dot{m}_{\text{fuel}} \cdot \text{LHV}_{\text{fuel}} \quad (2.6)$$

(Syukran dan Suryadi, 2007).

- c. Kehilangan panas akibat adanya abu di dalam bahan bakar

$$Q_{\text{gas buang}} = m_{\text{abu}} \cdot C_p_{\text{abu}} \cdot (T_{\text{abu,out}} - T_{\text{abu,in}}) \quad (2.7)$$

(Syukran dan Suryadi, 2007).

- d. Kehilangan panas akibat adanya blowdown uap (Syukran dan Suryadi, 2007).

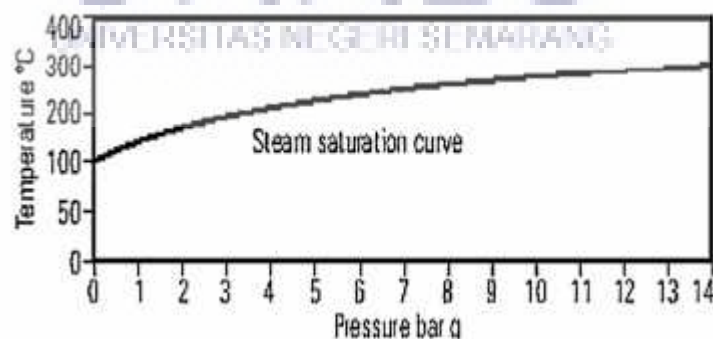
12. Proses Pembentukan Uap Pada *Boiler*

Bahan baku yang digunakan untuk membuat *steam* adalah air bersih. Air dari waduk salam darma yang telah diproses dialirkan menggunakan pompa ke tangki deaerator hingga pada level yang ditentukan. Pemanasan dalam deaerator adalah menggunakan *steam* sisa yang berasal dari hasil pemutaran

turbin. Sisa *steam* tersebut langsung mengalir dikarenakan perbedaan tekanan dan massa jenis air dan *steam*, karena perbedaan massa jenis itulah *steam* cenderung menuju ke massa jenis yang lebih besar yaitu air. Kemudian terjadi proses pendinginan mengakibatkan *steam* berubah kembali menjadi air lalu dialirkan ke *Low Pressure Heater* untuk dipanaskan kembali dan setelah itu menuju ke *High Pressure Heater*.

Dengan meningkatnya suhu dan air mendekati kondisi didihnya, beberapa molekul mendapatkan energi kinetik yang cukup untuk mencapai kecepatan yang membuatnya sewaktu-waktu lepas dari cairan ke ruang di atas permukaan, sebelum jatuh kembali ke cairan. Pemanasan lebih lanjut menyebabkan eksitasi lebih besar dan sejumlah molekul dengan energi cukup untuk meninggalkan cairan jadi meningkat.

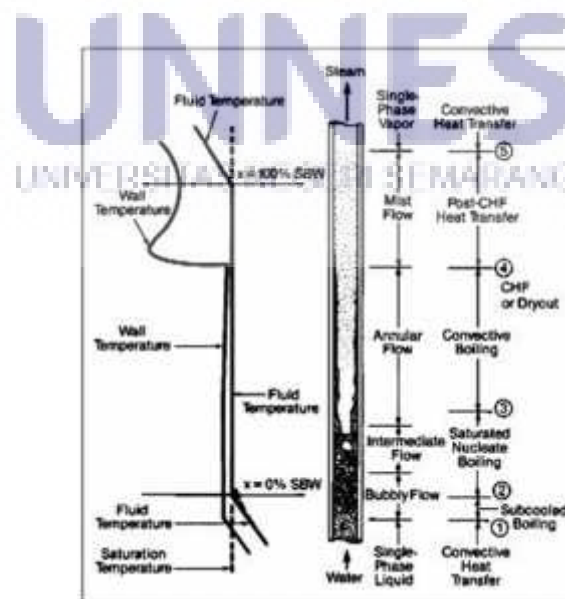
Air dapat menguap dengan bebas jika jumlah molekul yang meninggalkan permukaan cairan lebih besar dari yang masuk kembali. Kemudian pada titik tersebut air mencapai titik didihnya atau suhu jenuhnya, yang dijenuhkan oleh energi panas (Sihombing, 2010).



Gambar 2.18. Kurva *steam* jenuh (Sihombing, 2010)

Air dan *steam* dapat berada secara bersamaan pada berbagai tekanan pada kurva tersebut, keduanya akan berada pada suhu jenuh. *Steam* pada kondisi diatas kurva jenuh disebut *superheated steam/steam* lewat jenuh. Kemudian *steam* tersebut diumpankan kepada *Steam Turbin Generator* untuk menghasilkan daya sebagai pembangkit listrik maupun operasional peralatan lain sebagai penopang proses produksi.

Pada *boiler* pipa air sumber panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar di dalam *furnace*. Energi panas ini sebagian akan terpancar secara radiasi ke pipa-pipa *evaporator* sehingga memanaskan pipa-pipa tersebut. Panas yang terserap oleh permukaan pipa akan secara konduksi berpindah ke sisi permukaan dalam pipa. Di dalam pipa, mengalir air yang terus-menerus menyerap panas tersebut. Proses penyebaran panas antar molekul air di dalam aliran ini terjadi secara konveksi. Perpindahan panas konveksi antar molekul air, seakan-akan menciptakan aliran fluida tersendiri terlepas dengan aliran air di dalam pipa-pipa *boiler*.



Gambar 2.19. Pembentukan uap air pada *boiler*

(Sumber: <http://artikel-teknologi.com/perpindahan-panas-dan-pembentukan-uap-air-pada-boiler/> accessed 12/9/2016)

Gas hasil pembakaran yang mengandung energi panas akan terus mengalir mengikuti bentuk *boiler* hingga ke sisi keluaran. Di sepanjang perjalanan, panas yang terkandung di dalam gas buang akan diserap oleh permukaan *tubing boiler* dan diteruskan secara konduksi ke air di dalam pipa. Secara bertahap, air akan berubah fase menjadi uap basah (*saturated steam*) dan dapat berlanjut hingga menjadi uap kering (*superheated steam*).

13. Perpindahan Panas Pada Boiler

Panas yang dihasilkan karena pembakaran bahan bakar dan udara yang berupa api dan gas dipindahkan ke air, uap ataupun udara melalui bidang yang dipanaskan atau *heating surface* pada suatu instalasi *boiler* dengan cara yaitu :

a. Pancaran (radiasi)

Definisi perpindahan panas secara radiasi adalah perpindahan panas dari benda satu ke benda lainnya yang terjadi melalui gelombang-gelombang elektromagnetik dan tidak tergantung terhadap media perantara benda yang terkena pancaran panas secara langsung (Asmudi, 2010). Sejatinya api memiliki molekul yang didapat dari proses pembakaran bahan bakar dan udara yang berdampak pada terjadinya gangguan keseimbangan elektromagnetis terhadap suatu media yang sering dikatakan dengan materi bayangan tanpa bobot yang mengisi celah ruangan. Panas yang ditimbulkan adalah hasil dari pembakaran yang diteruskan oleh perantara *aether* kemudian ke dinding pipa pada *boiler*.

Adapun rumus yang digunakan untuk menghilangkan banyaknya panas yang diterima secara pancaran berdasarkan rumus Stephan-Boltzman adalah :

$$Q_r = C_z \times F \times (T_{\text{api}} : 100)^4 - (T_{\text{benda}} : 100)^4 \text{ (kJ/jam)} \quad (2.9)$$

Keterangan :

C_z = Konstanta radiasi stephan- boltzman ($6,75 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}^4$)

F = Luas bidang yang dipanasi api (m^2)

T = Temperatur (K)

b. Aliran (Konveksi)

Definisi perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang dilakukan oleh molekul-molekul suatu fluida (cair maupun gas) (Asmudi, 2010). Pada prosesnya molekul fluida tersebut dalam memiliki gerakan yang berputar-putar kesana kemari membawa sejumlah panas. Pada saat molekul fluida tersebut menyentuh dinding atau pipa ketel maka panasnya dibagikan sebagian kepada dinding atau pipa ketel, sedangkan sebagian lagi dibawa molekul pergi.

Jika gerakan tersebut disebabkan karena perbedaan temperatur di dalam fluida itu sendiri, maka perpindahan panasnya disebut konveksi bebas (*free convection*) atau konveksi alami (*natural convection*). Jika gerakan tersebut sebagai akibat dari kekuatan mekanis karena dipompa atau dihembus dengan fan, maka perpindahan panasnya disebut konveksi paksa (*forced convection*).

$$Q_k = h \times F \times (T_{\text{api}} - T_{\text{dinding}}) \text{ (kJ/jam)} \quad (2.10)$$

Keterangan :

h : Koefisien perpindahan panas dari api ke dinding ketel ($\text{kJ/m}^2 \cdot \text{jam} \cdot \text{K}$)

F : Luas bidang yang dipanaskan api (m^2)

T : Temperatur (K)

c. Perambatan (Konduksi)

Definisi perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dari bagian benda padat ke bagian benda padat yang disebabkan karena adanya kontak atau bersinggungan tanpa diikuti perpindahan molekul-molekul dari benda padat tersebut (Asmudi, 2010). Dinding-dinding sebelah dalam yang memiliki molekul akan merambatkan panas yang berbatasan dengan api menuju ke dinding sebelah luar yang memiliki molekul berbatasan dengan air maupun media lainnya. Proses perpindahan panas secara konveksi dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$Q_p = \frac{q}{s} \times F \times (T_{d1} - T_{d2}) \text{ (kJ/jam)} \quad (2.11)$$

Keterangan :

$\frac{q}{s}$: Koefisien perpindahan panas dari api ke dinding ketel (Kj/m².jam.k)

S : Tebal dinding (m)

F : Luas dinding ketel yang merambatkan panas (m²)

T_{d1} : Tempertur dinding ketel yang berbatasan dengan dinding api (K)

T_{d2} : Temperatur dinding ketel yang berbatasan dengan api dan udara (K)

14. Prinsip Pembakaran

Reaksi kimia antara oksigen (O_2) yang terkandung dari udara dengan bahan bakar disebut proses pembakaran. Proses pembakaran menghasilkan CO_2 , H_2O , dan disertai energi panas. Sedangkan karbonmonoksida (CO), abu (*ash*), NO_x atau SO_x hasil pembakaran yang tergantung pada jenis bahan bakarnya (Dalimunthe, 2006).

Reaksi eksotermik yang berlangsung sangat cepat, yang membebaskan energi substansial berupa panas dan nyala api (*flame*) merupakan proses pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar. (Gunawan dan Cordova, 2010).

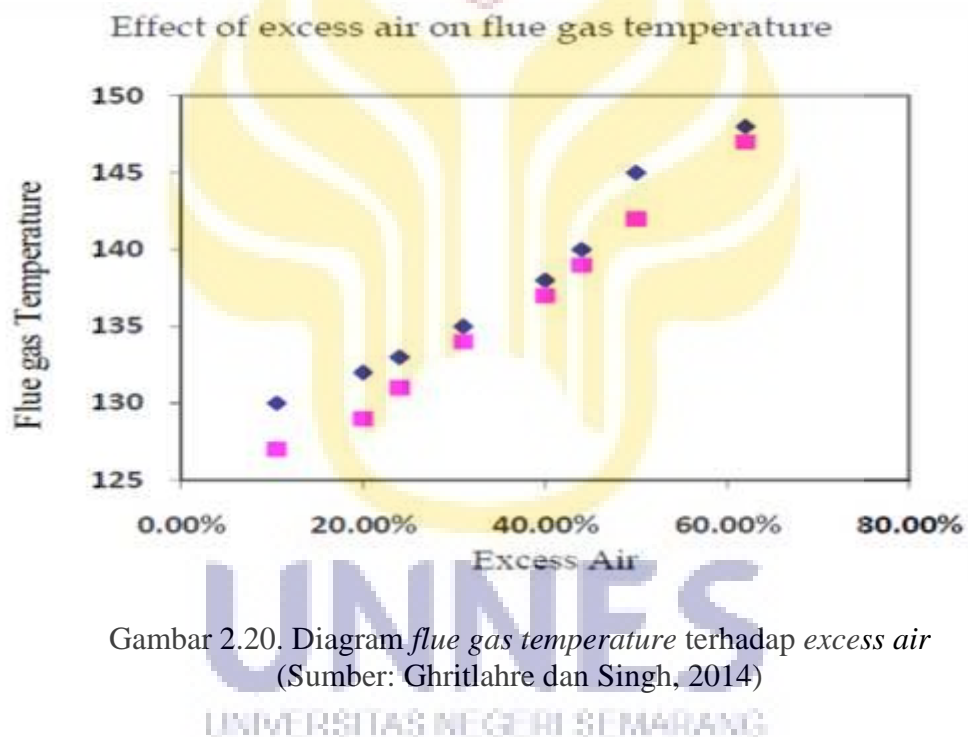
Proses pembakaran yang sempurna dapat mengubah seluruh energi yang memungkinkan pada bahan bakar. Namun, pada proses pembakaran sempurna dengan efisiensi 100% sulit untuk tercapai, kerugian pada instrument pendukung, yaitu jenis bahan bakar, temperatur gas buang dan konsentrasi O_2 dan CO_2 (Gunawan dan Cordova, 2010).

Kandungan O_2 atau CO_2 dalam gas buang (persen volume basis kering) melalui pengukuran dengan alat *oxygen analyzer* digunakan untuk mengetahui jumlah udara aktual, sedangkan stokiometrik digunakan untuk menghitung udara teoritis (Dalimunthe, 2006)

$$\text{Rasio udara} = \frac{(J_b \quad h_u \quad p_t \quad a)}{(J_b \quad h_u \quad p_t \quad t)} \quad (2.12)$$

Excess air dapat mengurangi efisiensi *boiler* dengan menyerap panas yang akan dipindahkan ke air sebagai medianya di dalam *boiler* dan kemudian membawanya ke *stack*. *Excees air* dapat diukur dengan analisa gas buang (Ghritlahre dan Singh, 2014).

Bahan bakar yang digunakan adalah harus yang memiliki kandungan sulfur untuk mengurangi resiko korosi. Korosi yang disebabkan karena sulfur dalam bahan bakar juga bisa diminimalkan dengan membuat baja paduan khusus untuk pembangunan *boiler* (Ghritlahre dan Singh, 2014). Temperatur Gas buang harus dikurangi untuk meningkatkan efisiensi *boiler* untuk menghemat bahan bakar. Dengan demikian, permasalahan yang membelenggu *boiler* dapat teratasi dan proses produksi akan tetap berjalan sebagaimana mestinya.



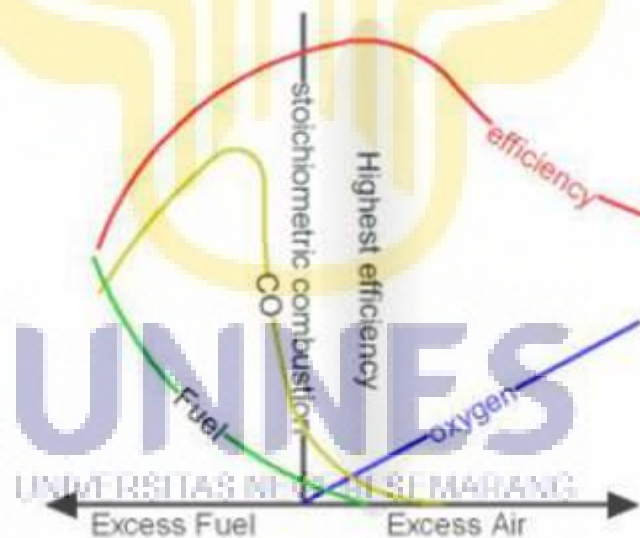
Gambar 2.20. Diagram *flue gas temperature* terhadap *excess air* (Sumber: Ghritlahre dan Singh, 2014)

15. Kehilangan Gas Buang Kering (Dry Flue Gas)

Efisiensi *boiler* merupakan suatu aspek yang memiliki ketergantungan terhadap perubahan temperatur maupun kehilangan panas. Kehilangan panas dapat terlihat dari beberapa permasalahan yang ada di lapangan, salah satu faktor utama yang menyebabkan kerugian ini adalah jumlah udara berlebih yang

digunakan dan suhu gas akhir. Gas buang kering harus dijaga jika ingin mendapatkan efisiensi yang tinggi. Hilangnya gas buang kering dapat dihitung dengan mengetahui berapa banyak udara berlebih yang digunakan, seperti yang ditunjukkan oleh persentase oksigen dalam gas buang dan temperatur gas keluar buang (Ghritlahre dan Singh, 2014).

Efisiensi pembakaran akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah excess air, hingga pada nilai tertentu, yaitu saat nilai kalor yang terbuang pada gas buang lebih besar dari pada kalor yang dapat disuplai oleh pembakaran yang optimal. Ilustrasi mengenai efisiensi pembakaran terhadap nilai excess air diperhatikan pada gambar berikut ini :



Gambar 2.21. Grafik hubungan efisiensi pembakaran dengan *excess air*
(Sumber : Ghritlahre dan Singh, 2014)

B. Penelitian yang Relevan

Penelitian yang dilakukan oleh Asmudi, yang meneliti tentang Analisa Unjuk Kerja *Boiler* Terhadap Penurunan Daya Pada PLTU P.T. Indonesia Power UBP Perak menyimpulkan bahwa Berdasarkan data dan analisa maka diketahui penurunan unjuk kerja *boiler* sebesar 14,15%, dari 87,35% pada saat komisioning menjadi 73,20% pada kondisi sekarang. Untuk menghasilkan daya listrik yang sama (37,25 MW), pada kondisi sekarang telah mengalami kenaikan: bahan bakar, udara pembakaran, dan air umpan, dengan masing-masing kenaikan sebesar 4,28%, 4,97%, dan 11,53%. Adanya pengaruh pengotoran baik yang timbul dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi *boiler*, ini dapat dilihat dari indikator naiknya gas buang dari 11.25% menjadi 14.85%

Penelitian yang dilakukan oleh Hendaryati (2012) yang meneliti tentang Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap di Pabrik Gula Kebonagung Malang menyimpulkan bahwa Kerugian-kerugian akibat panas yang hilang berpengaruh pada kinerja ketel uap, kerugian-kerugian ini berarti kehilangan energi yang terjadi pada ketel uap, kondisi ini dapat mengakibatkan efisiensi ketel menurun. Kerugian energi ini sebenarnya dapat dihindari dengan mengoptimalkan perawatan ketel uap. efisiensi termal rata-rata dari Ketel uap Yoshimine H-2700 adalah 74,8 % dan Ketel Uap Yoshimine H-3500 adalah 73,99 %. Dan berdasarkan Diagram Sankey jumlah panas yang masuk ketel uap untuk kedua ketel adalah 1713,194 Kkal/kg bb. Panas yang hilang untuk Ketel Uap Yoshimine H-2700 adalah 425,915 Kkal/kg bb, sehingga panas yang digunakan adalah 1287,279 Kkal/kg bb. Sedangkan panas yang hilang untuk Ketel Uap Yoshimine

H-3500 adalah 445,653 Kkal/kg bb, sehingga panas yang digunakan adalah 1267,541 Kkal/kg bb.

Penelitian yang dilakukan oleh Ginting et al (2014) yang meneliti tentang Analisa Efisiensi Exergi *Boiler* Di PLTU Unit 3 P.T. Indonesia Power Semarang-Jawa Tengah menyimpulkan bahwa Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi total, efisiensi energi total dan laju destruksi total dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam* dan daya *output* generator. Kemudian nilai rata-rata efisiensi energi total lebih besar dibandingkan nilai rata - rata efisiensi exergi total dimana masing-masing bernilai 72.40% dan 71.84%. Kemudian Tinggi atau rendahnya nilai efisiensi exergi dan laju destruksi exergi *heat exchanger* dipengaruhi oleh laju aliran massa *steam*, temperatur *flue gas*, sistem insulasi, kebersihan *tubes* dan jumlah *feedwater* yang terbuang di sistem *blowdown*.

Penelitian yang dilakukan oleh Eflita Yohana dan Askhabulyamin (2012) yang meneliti tentang perhitungan Efisiensi dan Konversi dari Bahan Bakar Solar ke Gas pada Boiler Ebara HKL 1800 ka, dalam penelitian tersebut ini dibahas perbandingan perhitungan biaya yang diperlukan oleh boiler berbahan bakar solar dengan boiler berbahan bakar gas untuk menghasilkan steam output yang sama. dari perhitungan, kebutuhan bahan bakar yang dikeluarkan untuk boiler dan lng masing-masing adalah 260,79 kg/jam = 0,265 m³/jam dan 21 m³/jam.

C. Kerangka Pikir Penelitian

Parameter kinerja *boiler*, seperti efisiensi dan rasio penguapan, berkurang terhadap waktu disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar

panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Bahkan untuk *boiler* yang baru sekalipun, alasan seperti buruknya kualitas bahan bakar dan kualitas air dapat mengakibatkan buruknya kinerja *boiler*. Neraca panas dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Kehilangan panas pada *boiler* dapat kita lihat dari beberapa faktor berikut yaitu, karena gas buang kering, *steam* dalam gas buang, kandungan air dalam bahan bakar, kandungan air dalam udara, dan adanya radiasi panas.

D. Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah dan kajian teori penelitian, peneliti mengemukakan hipotesis penelitian adalah sebagai berikut :

- 1) Meningkatnya kandungan O_2 di dalam *flue gas* akan menurunkan efisiensi *boiler*.
- 2) Semakin tinggi nilai kehilangan kalor, maka semakin rendah efisiensi *boiler*.
- 3) Penggunaan *software* *sinboiler* untuk menghitung nilai efisiensi *boiler* dapat mempermudah analisis.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

Water Tube Boiler pada Unit *Boiler* di PT Pertamina RU VI Balongan mengalami penurunan efisiensi sebesar 5,5 %. Dari kondisi komisioning dengan beban tinggi 200 MW sebesar 93% menjadi 87,50 % pada saat kondisi sekarang (operasi) dengan beban tinggi 188 MW.

1. Jumlah kandungan O₂ pada gas buang masih relatif rendah untuk ukuran *boiler* sehingga tidak terlalu berpengaruh pada efisiensi *boiler*.
2. Jumlah kehilangan panas yang terjadi di dalam *boiler* belum sepenuhnya mempengaruhi efisiensi *boiler* secara signifikan karena masih berada dalam batas yang ditentukan.
3. Telah dikembangkan *software* untuk analisis efisiensi *boiler* agar proses saat menganalisis efisiensi *boiler* dapat dilakukan lebih efektif.

B. Saran

Usaha penghematan energi dapat ditekan dengan meningkatkan efisiensi *boiler*. Untuk meningkatkan efisiensi dari *boiler* dapat dilakukan adalah dengan cara mengurangi faktor-faktor kehilangan panas yang terjadi pada gas buang di cerobong, yaitu memanfaatkan gas tersebut sebagai pemanas udara. Hal ini sudah

diterapkan, tetapi perlu dilakukan usaha untuk menurunkan rasio kebocoran pada pemanas udara dengan cara mengganti material pada *economizer* secara berkala sehingga tidak ada panas yang hilang disebabkan karena kebocoran material pada proses pembakaran. Dengan demikian efisiensi *boiler* akan tetap tinggi. Selain itu perlu dilakukan pengkajian lebih terhadap *software* untuk mengetahui efisiensi *boiler* yang terjadi sehingga dapat diterapkan pada instansi atau perusahaan terkait yang membutuhkan *boiler* sebagai proses produksinya, agar kendala saat menganalisis kerusakan atau turunnya efisiensi *boiler* dapat diketahui secepat mungkin sehingga kerugian yang disebabkan tidak terlalu berdampak negatif pada kelangsungan proses produksi. Perlu dibuat alat untuk uji performa *boiler* dalam skala laboratorium.



DAFTAR PUSTAKA

- API Standard 560. 2001. *Fired Heaters For General Refinery Services*. API Standard 560 Third Edition. Washington, D.C.
- Artikel Teknologi. *Perpindahan Panas Dan Pembentukan Uap Air Pada Boiler*. <http://artikel-teknologi.com/perpindahan-panas-dan-pembentukan-uap-air-pada-boiler/>. [accessed 12/9/2016]
- Asmudi. 2010. *Analisa Unjuk Kerja Boiler Terhadap Penurunan Daya Pada Pltu Pt. Indonesia Power Ubp Perak*. Jurnal Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, ITS Surabaya.
- Bruijn dan L. Mulwijk. 1982. *Ketel Uap*. Jakarta : Bhratara Kara Aksara.
- Cengel, Y dan M. Boles. 1989. *Thermodynamic An Engineering Approach*. Fifth edition. McGraw-Hill Book. New York
- Dalimunthe, D. 2006. *Konservasi Energi di Kilang Gas Alam Cair/LNG Melalui Peningkatan Efisiensi Pembakaran pada Boiler*. Jurnal Teknologi Proses ISSN 1412-7814. USU Medan.
- Dewata et al. 2011. *Analisa Teknis Evaluasi Kinerja Boiler Type Ihi Fw Sr Single Drum Akibat Kehilangan Panas Di Pltu Pt. Pjb Unit Pembangkitan Gresik*. Jurnal Jurusan Teknik Sistem Perkapalan-Fakultas Teknologi Kelautan-Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Djokosetyoarjo, M.J. 1990. *Pembahasan Lebih Lanjut Tentang Ketel Uap*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Eflita, Y. dan Askhabulyamin. 2012. *Perhitungan Efisiensi Dan Konversi Dari Bahan Bakar Solar Ke Gas Pada Boiler Ebara Hkl 1800 Ka*. Jurnal Rotasi – Vol. 14, No. 2, April 2012: 7–10.
- eHow.com. *The Importance of Boiler Drum Level Controls*. <http://pudeb.com/steam-drums-boiler-drum-boiler-steam-drums-dyna-therm-coporation/>. [accessed 10/8/2016]
- Electrical4u.com. *Steam Boiler Furnace Grate Firebox Combustion Chamber of Furnace*. <http://www.electrical4u.com/steam-boiler-furnace-grate-firebox-combustion-chamber-of-furnace/> [accessed 16/9/2016]
- El-wakil. 1985. *PowerPlant Technology*. International Edition. Singapore : McGraw-Hill.
- Ghritlahre, H dan Singh. 2014. *Effect of Excess Air on 30 TPH AFBC Boiler on Dry Flue Gas Losses and its Efficiency*. International Journal of Research in Advent Technology, Vol.2, No.6, June 2014 E-ISSN: 2321-9637.

- Ginting, M.H et al. 2014. *Analisa Efisiensi Exergi Boiler Di Pltu Unit 3 Pt. Indonesia Power Semarang – Jawa Tengah*. Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 2, No. 1, Tahun 2014.
- Gs Trading. *Forced Draft Fan*. <http://www.gstrading.in/forced-draft-fan.htm> [accessed 2/9/2016]
- Gunawan, T dan Cordova, H. 2010. *Desain AFRC (Air To Fuel Ratio Control) Berbasis Optimasi Kandungan O₂ Pada Gas Buang di PT. Pertamina Refinery Unit IV Cilacap Dengan Menggunakan Sistem Fuzzy*. Jurnal Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh November
- Hasibuan, C.H dan Farel, H.N. 2013. *Analisa Pemakaian Bahan Bakar Dengan Melakukan Pengujian Nilai Kalor Terhadap Performansi Ketel Uap Tipe Pipa Air Dengan Kapasitas Uap 60 Ton/Jam*. Jurnal e-Dinamis, Volume 4, No.4 Maret 2013 ISSN 2338-1035.
- Hendaryati, H.2012. *Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap Di Pabrik Gula Kebonagung Malang*. Jurnal Gamma, Volume 8, Nomor 1, September 2012: 148 – 153.
- Khan, S dan Shahabaz Khan. 2014. *Boiler and Its Tangential Fuel Firing System*. International Journal of Automation and Control Engineering (IJACE) Volume 3 Issue 3, August 2014. www.seipub.org/ijace.
- Maulana.R.S dan M. Sulaksmo. 2014. *Kelengkapan Pemenuhan Syarat Operator Ketel Uap Dengan Upaya Pengoperasian Dan Pemeliharaan Di Pt Pupuk Kaltim (Studi Pada Operator Di Industri Kimia*. The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health, Vol. 3, No. 2 Jul-Des 2014: 201–211.
- Mechanical engineering- Construction & Maintenance. *Types of Boiler*. <http://mechanicalfieldexperience.blogspot.co.id/2016/02/types-of-boilers.html> [accessed 26/9/2016]
- Noviyanto, I.D. 2014. *Thermal Efficiency Improvement Through Fuel Gas Rate And Excess Oxygen Control*. School of Business and Management Institute of Technology Bandung. ICTOM 04–The 4th International Conference on Technology and Operations Management. 435-443.
- Oland, C.B. 2002. *Guide To Low-Emission Boiler And Combustion Equipment Selection*. ORNL/TM-2002/19. USA : Oak Ridge National Laboratory.
- Pertamina. 1993. *Pedoman Operasi EXOR-1 Balongan Fasilitas Utility Unit 52 , JGC Corporation Dan Foster Wheeler (Indonesia) Limited*. Pertamina UP-VI Balongan.
- Sihombing, H. 2010. *Mekanisme Proses Pembakaran di Dalam Boiler Dengan Mempergunakan Heater Tambahan Untuk Efisiensi Pembakaran*. Karya Akhir Program Diploma-IV Teknologi Instrumentasi Pabrik Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.

- Singh, O. 2009. *Applied Thermodynamics*. ISBN (13) : 978-81-224-2916-9 Third Edition. New Delhi-India : New Age International.
- Spirax Sarco. *Miscellaneous Boiler Types, Economisers and Superheaters*. <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/the-boiler-house/miscellaneous-boiler-types-economisers-and-superheaters.aspx>. [accessed 9/8/2016]
- Steam Boiler. *All of About Steam Boiler, Heat Exchanger, Energy and Power Generation*. http://steamofboiler.blogspot.co.id/2011/02/classification-steam-boiler-based-on_14.html. [accessed_14/8/2016]
- Suryo, T.U. dan Eko Siswanto.2015. *Analisa Efisiensi Exergi Boiler Wanson Iii Pada Unit Kilang Di Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Minyak Dan Gas Bumi (Pusdiklat Migas)Cepu*. Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 3, No. 2, Tahun 2015.
- Syukran dan Suryadi, D. 2007. *Estimasi Penghematan Biaya Operasi PLTU dengan Cara Penggantian Bahan Bakar*. Jurnal Teknik Mesin Vol. 9, No. 2, Oktober 2007: 59 – 66.
- United Nations Environment Programme. 2006. *Boiler & Pemanas Fluida Termis*. Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia.
- Wikipedia. Superheater. <https://en.wikipedia.org/wiki/Superheater>[accessed 9/8/2016]