



# ANALISIS PELUANG PENGHEMATAN ENERGI PADA BOILER DENGAN KAPASITAS 40 TON/JAM DI PKS AEK LOBA PT. SOCFIN INDONESIA

Kamali Saidah<sup>a</sup>, Daniel S. Barus.<sup>b</sup>, Abdul Razak<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Medan, Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota medan, Sumatera Utara, 20155, Indonesia

<sup>b</sup>Industri PKS Aek Loba PT Socfin Indonesia, Aek Kuasan, Kec. Asahan, Sumatera Utara, 21273

E-mail: [kamalisaidah@students.polmed.ac.id](mailto:kamalisaidah@students.polmed.ac.id)

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 16 Februari 2022

Direvisi pada 15 Maret 2022

Disetujui pada 22 Maret 2022

Tersedia daring pada 05 April 2022

### Kata kunci:

Boiler, Audit Energi, Efisiensi

### Keywords:

Boiler, Energy Audit, Efficiency

## ABSTRAK

*Boiler* adalah bagian dari suatu pembangkit uap yang berbentuk seperti bejana tertutup yang dapat mengubah air jenuh menjadi uap (*steam*) jenuh dengan bantuan panas dari proses pembakaran bahan bakar. Berbagai usaha dapat dilakukan untuk menghemat biaya produksi uap diantaranya dengan melakukan audit energi pada sistem pembangkit uap (*boiler*). Audit energi didefinisikan sebagai proses evaluasi pemanfaatan energi dan indentifikasi peluang dan penggunaan sumber energi dalam rangka konservasi energi. Audit *boiler* bertujuan untuk mengidentifikasi adanya peluang penghematan energi, yang bisa diketahui dari parameter efisiensi. Ada beberapa acuan untuk mengevaluasi kinerja *boiler*, yaitu dengan melakukan perhitungan terhadap efisiensi *boiler* biasanya menggunakan metode langsung (*direct efficiency*) dan metode tak langsung (*indirect efficiency*). *Boiler* yang akan diaudit adalah *water tube boiler* berbahan bakar cangkang dan serabut dengan kapasitas 40 ton/jam di PKS Aek Loba, PT Socfin Indonesia. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan efisiensi dengan metode langsung sebesar 75%, potensi penghematan dengan mengendalikan rasio udara dari 1,5 menjadi 1,3 yang berdampak pada berkurangnya kadar oksigen pada gas buang. Hasilnya adalah penghematan bahan bakar sebesar 5%. Adapun parameter untuk menjaga stabilitas kinerja *boiler* adalah manajemen kualitas air umpan dan manajemen pembakaran.

## ABSTRACT

*A boiler is a part of the steam generator shaped like a closed vessel that transforms saturated water into saturated steam using heat from the fuel combustion process. Various measures can be applied to save the steam production cost such as performing an energy audit on the steam generator system (boiler). An energy audit is defined as a process of energy utilization evaluation and energy resource opportunity and utilization identification to conserve energy. A boiler audit aims to identify energy-saving measures from the efficiency parameter. There are several references in evaluating boiler performance such as calculating the boiler efficiency with direct (direct efficiency) and indirect (indirect efficiency) methods. The audited boiler was used a water tube boiler with shells and fibres as the fuel with a 40 ton/hour capacity at PKS Aek Loba, PT Socfin Indonesia. The calculation result revealed an indirect efficiency of 75% with a saving potential by controlling the air ratio from 1.5 to 1.3, leading to oxygen concentration reduction in the exhaust gas. It resulted in a fuel saving of 2%. The parameters to maintain boiler performance are feed water quality management and combustion management.*

## 1. PENGANTAR

Energi merupakan suatu kebutuhan pokok yang tak terpisahkan dari semua kegiatan manusia. Terutama dalam bidang industri, energi digunakan sebagai modal yang berbentuk sumber energi untuk membantu proses produksi. Dari mulai energi bahan bakar untuk menjalankan mesin produksi industri, dan energi listrik untuk membantu menjalankan mesin dan membantu penerangan pada waktu proses produksi industri (Sanjaya.W.D., 2018). Namun dalam proses produksi sering terjadi pemborosan energi yang disebabkan oleh penggunaan listrik yang berlebihan dan tidak sesuai waktu. Selebihnya adalah faktor teknis pada peralatan yang digunakan. Akibatnya biaya produksi semakin tinggi, oleh karena itu penting melakukan penghematan energi dalam bidang industri (Ariyanto, 2019). Penghematan energi di bidang industri yaitu melalui audit energi. Audit energi adalah proses evaluasi pemanfaatan energi guna mengidentifikasi peluang penghematan energi untuk meningkatkan efisiensi suatu perusahaan. Audit energi merupakan salah satu langkah dalam upaya manajemen energi, yang diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 70 Tahun 2009 tentang Konservasi Energi dimana audit energi didefinisikan sebagai proses evaluasi pemanfaatan energi dan indentifikasi peluang dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energi (Balai besar teknologi energi, 2015). Dalam bidang industri, audit energi dapat dilakukan pada beberapa sistem yaitu sistem kelistrikan, sistem pembangkitan uap (*boiler*), sistem diesel-generator, sistem distribusi uap, sistem integrasi proses, sistem *chiller*, sistem pompa, sistem manajemen energi (Balai Besar Teknologi Energi, 2015).

*Boiler* merupakan suatu bejana tertutup yang bertekanan yang dirancang sedemikian rupa untuk mengubah air jenuh menjadi uap jenuh, uap jenuh yang keluar dari *boiler* sampai ke tingkat uap superpanas yang dengan sifat dan kondisi tertentu uap digunakan untuk menggerakkan turbin agar menghasilkan listrik. Produksi uap dalam boiler dihasilkan dari pemanasan air menjadi uap, sehingga pada akhirnya akan bertekanan dan bertemperatur tinggi. Disamping tekanan dan panasnya sifat uap juga memiliki kecepatan yang sangat tinggi dengan menggunakan prinsip beda tekanan dari tekanan tinggi ke tekanan yang rendah (Muin Syamsir, 2010). *Boiler* merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkit karena akan mempengaruhi kinerja sistem pembangkit itu sendiri dan pengkonsumsi energi terbesar. Pengkajian kinerja *boiler* perlu dilakukan untuk melihat efisien atau tidaknya *boiler* beroperasi. Konservasi energi di *boiler* dirasa perlu dilakukan untuk menunjang penghematan energi (Kholid Hermawan, 2020).

### 1.1. Pengertian Boiler

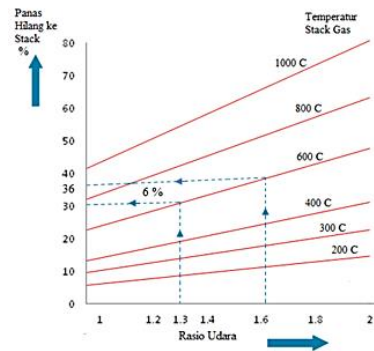
*Boiler* adalah bagian dari suatu pembangkit uap yang berbentuk seperti bejana tertutup yang dapat mengubah air jenuh menjadi uap (*steam*) jenuh dengan bantuan panas dari proses pembakaran bahan bakar (Pudjanarsa dan Nursuhud, 2008). Komponen utama *boiler* biasanya terdiri dari atas pipa *evaporator/boiling*, alat pembakar, pompa, *blower*, air umpan, drum air dan drum uap (Balai Besar Teknologi Energi, 2015). Umumnya *boiler* mempunyai dua proses utama, yaitu proses pembakaran dan pelepasan panas serta proses perpindahan panas dan pembangkitan uap dari air umpan. Sedangkan bahan bakar untuk *boiler* bermacam-macam, yaitu batu bara, minyak, gas, biomassa, dan panas limbah (Djokosetyardjo, 2016). Sistem *boiler* terdiri atas sistem pengumpan air, sistem uap air, dan sistem bahan bakar. Sistem pengumpan air menyediakan air kepada *boiler* dan mengaturnya secara otomatis untuk memenuhi kebutuhan uap air. Sistem uap air mengumpulkan dan mengendalikan produksi uap air di dalam *boiler*. Pada seluruh sistem, tekanan uap air diatur menggunakan katup dan diukur dengan alat pengukur tekanan uap air dimana sistem bahan bakar meliputi semua peralatan yang digunakan untuk menyuplai bahan bakar guna menghasilkan panas yang diperlukan dan tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan (Muin Syamsir, 2010). Air umpan (*feed water*) adalah air yang dialirkan ke dalam *boiler* yang akan diubah menjadi uap air. Dua sumber air umpan adalah uap air yang dikondensasikan kembali dari proses (kondensat) dan air baku yang diolah (*make up water*) yang harus didatangkan dari luar ruang *boiler* dan bagian proses. Untuk menaikkan efisiensi *boiler*, digunakan *economizer* untuk pemanasan awal air menggunakan panas dari gas buang (Djokosetyardjo, 2016, Muin Syamsir, 2010).

### 1.2. Identifikasi potensi penghematan

Tahapan audit energi pada *boiler* selanjutnya adalah dengan menjelaskan potensi penghematan atau disebut juga penjagaan stabilitas efisiensi (konservasi energi pada *boiler*). Dengan menjaga dua parameter konservasi energi pada *boiler*, yaitu (Balai Besar Teknologi Energi, 2015):

#### 1. Manajemen Pembakaran

Manajemen pembakaran dimaksudkan untuk mendapatkan kondisi pembakaran suatu bahan bakar yang *boiler* optimum. Penurunan kapasitas produksi uap dapat disebabkan kekurangan dan mutu bahan bakar. Sering terjadi perubahan keseimbangan antara bahan bakar dengan rasio udara yakni jumlah bahan bakar yang terlalu banyak dan volume udara yang menurun akibat ruang bakar yang semakin sempit dan menimbulkan pembakaran tidak efisien. Kegoncangan tekanan *boiler* yang menyebabkan proses pengisian bahan bakar tidak merata dan pembakaran yang tidak efisien, hal seperti ini sering dialami pada saat-saat *boiler* kekurangan bahan bakar. Efisiensi *boiler* akan turun dan dapat menyebabkan produksi uap turun dan akan mempengaruhi kapasitas olah PKS. Kondisi *boiler* yang lebih stabil dapat mencegah terjadinya *priming* yang dapat merusak pipa *superheater* dan pipa distribusi uap. Pembakaran sempurna dapat terjadi jika jumlah udara pembakaran yang dipasok ke ruang bakar berlebih dari kebutuhan teoritis (stoikiometri) Namun apabila udara lebih (*excess air*) tersebut dibuat terlalu banyak maka jumlah gas buang (*exhaust gas*) hasil pembakaran menjadi besar dan akibatnya energi hilang ke cerobong dalam jumlah yang besar. Energi pada suatu sistem pembakaran dapat dihemat dengan cara mengurangi persentase udara lebih (Ponten Naibaho, 2016). Udara lebih atau *excess air* sering dinyatakan dengan rasio udara. Bila temperatur *stack gas* keluar dari *boiler* dapat dibuat rendah dan persentase *excess air* pada udara pembakaran dibuat sesedikit mungkin, berarti kita berhasil mengurangi rugi-rugi energi melalui gas buang seperti pada Gambar 1.



Gambar 1: Panas hilang ke cerobong vs rasio udara (Keenan and Keyes, 2017)

Semakin rendah temperatur gas pembakaran semakin sedikit energi terbuang, demikian juga rasio udara, semakin rendah persentase rasio udara semakin sedikit energi yang terbuang, atau dengan kata lain efisiensi pembakaran semakin meningkat. Secara teoritis penghematan maksimal terjadi pada rasio udara sama dengan 1, tetapi dalam praktek, apabila rasio udara dibuat 1, maka bahan bakar cenderung tidak terbakar sempurna yang ditandai dengan munculnya CO dan atau asap hitam dalam gas buang seperti tampak pada grafik di atas. Penurunan rasio udara yang terlalu banyak akan berakibat menurunkan efisiensi dan disamping itu juga cenderung menimbulkan munculnya gas CO pada gas buang yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia. *Burner* sebagai tempat terjadinya proses pembakaran atau tempat bercampurnya udara dan bahan bakar sehingga terjadi pembakaran *burner* yang baik akan membentuk campuran bahan bakar dari udara pembakaran dengan kelebihan udara minimum. *Burner* juga harus beroperasi sesuai dengan beban yang ditentukan. Jika kapasitas pembakaran tidak sesuai dengan beban *boiler*, maka yang akan terjadi adalah pembakaran akan melebihi kebutuhan yang artinya kerugian karena panas yang dibawa *flue gas* akan meningkat, sedangkan jika pembakaran kurang dari kebutuhan beban, maka yang terjadi adalah kerugian karena radiasi dan konveksi meningkat. Beban *boiler* yang berada dalam interval efisiensi terbaik yaitu 70% - 90% beban maksimum. Hal yang timbul jika kurangnya pemeliharaan pada *burner* adalah terjadinya pembakaran yang tidak sempurna. Kerak dan deposit akan terbentuk di dalam *boiler*. Kerak ketel yang disebabkan garam-garam sadah yang mengendap pada permukaan pipa akibat pengaruh panas penguapan dan deposit ketel yaitu timbulnya penggumpalan bahan padatan pada permukaan *boiler*. Kerak dan deposit akan menyebabkan berkurangnya panas yang dipindahkan dari dapur ke air yang terdapat dalam *boiler*, yang mengakibatkan meningkatnya temperatur di sekitar dapur dan menurunnya efisiensi *boiler*. Fenomena ini dapat dicegah dengan melakukan perubahan pada *water treatment* agar dapat menghindarkan pembentukan kerak pada *boiler*. Deposit ketel dapat dibersihkan dengan uap bertekanan tinggi. *Soot blowing* dengan menggunakan uap dilakukan secara regular paling tidak sekali setiap *shift*. Dengan pembersihan teratur permukaan bidang pemanas *boiler*, maka pemanfaatan temperatur *flue gas* dapat meningkat (Balai Besar Teknologi Energi, 2015, Ponten Naibaho, 2016).

## 2. Manajemen Kualitas Air Umpan

Manajemen air umpan pada *boiler* dimaksudkan untuk mendapatkan performansi yang lebih baik dalam jangka waktu yang panjang. Semakin tinggi temperatur air umpan sebelum masuk ke *boiler*, maka semakin sedikit pula usaha *burner* untuk memanaskan air mencapai titik uap saturasinya. Semakin sedikit bahan bakar yang diperlukan sehingga proses kerja menjadi lebih hemat. Menjaga temperatur air umpan artinya memanfaatkan panas sebaik-baiknya dengan memanfaatkan air kondensat dengan optimal atau memanfaatkan sisa panas gas buang dengan menggunakan ekonomiser (Ponten Naibaho, 2016). Air umpan *boiler* umumnya diolah terlebih dahulu di *water treatment plant*, sebelum digunakan sebagai air umpan untuk *boiler*. Hal ini dikarenakan adanya zat-zat yang terkandung dalam air (Ponten Naibaho, 2016):

- Total Dissolved Solid* (TDS), adalah zat padatan yang terlarut dalam air. Contoh: *Silica* ( $\text{SiO}_2$ ), Besi (Fe) dan *Chloride* (Cl).
- Total Suspended Solid* (TSS), adalah zat padatan yang tidak terlarut dalam air. Contoh: Lumpur, pasir, tanah dan zat organik.
- Total Dissolved Gas* (TDG), adalah gas-gas yang terlarut dalam air. Contoh: Oksigen ( $\text{O}_2$ ), Karbon Dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan Hidrogen Sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Tingginya konsentrasi TDS, TSS dan TDG menyebabkan permukaan pipa pemanas maupun drum *boiler* cenderung terbentuk kerak dan bagian bawah drum *boiler* akan muncul endapan berupa lumpur pada sisi air pipa *boiler*. Bila keadaan ini berlangsung lama, maka jumlah kerak dan lumpur semakin bertambah sehingga menghalangi proses perpindahan panas dari gas pembakaran ke air atau uap. Jika kondisi ini terjadi meskipun manajemen pembakaran sudah berhasil diterapkan, maka efisiensi energi optimal pada *boiler* tidak dapat terealisasi. Semakin tebal kerak maka semakin besar konsumsi bahan bakar. Untuk itu pemeliharaan/pembersihan pada sisi air *boiler* perlu dilakukan misalnya dengan cara mekanis maupun zat kimia (Balai Besar Teknologi Energi, 2015). Selain proses pemurnian air dari *water treatment plant*, *boiler* sendiri mempunyai sistem untuk menjaga tingkat kejenuhan atau konsentrasi kotoran yang semakin tinggi, yaitu dengan pengurasan atau *blowdown* (Ponten Naibaho, 2016). *Blowdown* adalah tindakan pengurasan kotoran/endapan dari dalam *boiler*, tetapi pengurasan ini hendaknya dilakukan sesuai keperluan, karena bila jumlah *blowdown* berlebih maka energi hilang akan bertambah melalui *blowdown*. Jumlah *blowdown* diketahui dari kualitas air umpan dan air *boiler*, oleh karena itu air *boiler* harus dianalisa secara periodik. Kesalahan dalam pengelolaan air *boiler* dapat berakibat fatal (Balai Besar Teknologi Energi, 2015, Sonden Winarto, 2019).

## 2. METODE

### 2.1. Efisiensi Boiler

Ada beberapa acuan untuk mengevaluasi kinerja *boiler*, misalnya *British Standard* (BS 845: 1987) dan *USA Standard* (ASME PTC-4-1 *Power Test Code Steam Generating Units*). Pengukuran ini dilakukan pada beberapa beban dengan variasi 100%, 75%, 50% setiap 15 menit selama 2 jam, dengan asumsi beban uap dalam kondisi stabil (Balai Besar Teknologi Energi, 2015).

#### 1. Perhitungan efisiensi dengan metode langsung (*Direct efficiency*)

Perhitungan *boiler* dengan metode langsung merupakan perhitungan efisiensi yang menggunakan perbandingan antara fluida kerja (air dan uap) dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar. Adapun persamaan 1 yang digunakan untuk menghitung efisiensi *boiler* dengan metode langsung (*direct*) sebagai berikut (Balai Besar Teknologi Energi, 2015):

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi boiler} &= \frac{\text{jumlah panas uap yang dibangkitkan}}{\text{jumlah panas pembakaran bahan bakar}} \times 100\% \\ \text{Efisiensi boiler } (\eta) &= \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\dot{m}_{bb} \cdot LHV} \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

Keterangan:

$\dot{m}_u$  = kapasitas produksi laju uap (kg/jam)

$\dot{m}_{bb}$  = Laju konsumsi bahan bakar (kg/jam)

$h_a$  = Entalpi air umpan (kJ/kg)

$h_u$  = Entalpi uap jenuh (kJ/kg)

LHV = *Low heating value* (nilai kalor bahan bakar, Kkal/kg)

#### 2. Perhitungan efisiensi dengan metode tidak langsung (*Indirect Efficiency*)

Merupakan pendekatan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai efisiensi dengan mengukur jumlah potensial panas bahan bakar dan mengurangnya dengan *losses* yang terdapat pada *boiler*. Adapun persamaan 2 untuk menghitung efisiensi *boiler* dengan metode tak langsung adalah sebagai berikut (Kholid Hermawan, 2020):

Efisiensi *boiler*

$$E (\%) = 100\% - (\% L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8) \quad (2)$$

Keterangan:

L1 = Rugi-rugi gas buang kering (panas-sensibel)

L2 = Rugi-rugi steam dalam panas bahan bakar ( $H_2$ )

L3 = Rugi-rugi kandungan air bahan bakar ( $H_2O$ )

L4 = Rugi-rugi kandungan air di udara pembakaran ( $H_2O$ )

L5 = Rugi-rugi pembakaran tidak sempurna (CO)

L6 = Rugi-rugi radiasi permukaan, konveksi,

L7 = Rugi-rugi karena *ash fly*

L8 = Rugi-rugi karena *bottom ash*

Tahapan dalam menghitung efisiensi boiler dengan metode tidak langsung dapat digambarkan dalam tahapan berikut:

#### Tahap – 1. Kebutuhan udara teoritis

Udara teoritis untuk pembakaran sempurna pada persamaan 3 adalah

$$\frac{(11,6 \times C) + \left(34,8 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right)\right) + (4,35 \times S)}{100} \quad (3)$$

#### Tahap – 2. Teoritis CO<sub>2</sub>% pembakaran sempurna pada persamaan 4

$$\% \text{ CO pada} = \frac{\text{moles of C}}{\text{moles N}_2 + \text{moles of C}} \quad (4)$$

Dimana:

$$\text{Moles N}_2 = \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in theoretical air}}{\text{mol.Wt of N}_2} + \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in fuel}}{\text{mol.Wt of N}_2}$$

#### Tahap – 3. Persen kelebihan udara yang dipasok (EA)

$$\% \text{ suplai udara berlebih} = \frac{7900 \times [(CO_2\%)t - (CO_2\%)a]}{(CO_2\%)a \times [(100 - (CO_2\%)t)]}$$

#### Tahap – 4. Massa udara sebenarnya yang dipasok (AAS)

$$\text{Massa sebenarnya} = \left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times \text{udara teoritis}$$

#### Tahap – 5. Massa aktual gas buang kering

$$\text{Massa gas buang kering} = \text{mass of CO}_2 + \text{mass of N}_2 \text{ content in fuel} + \text{mass of N}_2 \text{ in the combustion air supplied} + \text{mass of oxygen in flue gas}$$

#### Tahap – 6. *Losses* yang terjadi pada *boiler*

*Heat loss* karena gas buang kering (L1) merupakan kehilangan terbesar yang dapat dihitung dengan persamaan 5 berikut:

$$L1 = \frac{m \times Cp \times (Tf - Ta)}{GCV \text{ batu bara}} \times 100 \quad (5)$$

Keterangan:

$m$  = massa *dry flue gas* (kg/kg batu bara)  
 $Cp$  = panas spesifik *flue gas* = 0,23 kCal/kg°C  
 $Tf$  = temperatur *flue gas* (°C)  
 $GCV$  = nilai kalor atas bahan bakar (kkal/kg)

a) *Heat loss* karena steam dalam gas buang (L2)

Pembakaran hidrogen menyebabkan hilangnya panas karena produk dari pembakaran adalah air. Air ini akan diubah menjadi uap dan akan membawa panas pergi dalam bentuk panas laten pada persamaan 6 (Kholid Hermawan, 2020).

$$L2 = \frac{9 \times H_2 \times \{548 + Cp (Tf - Ta)\}}{GCV \text{ batu bara mo}} \times 100 \quad (6)$$

Keterangan:

$H_2$  = persen massa hidrogen dalam 1 kg bahan bakar (kg)  
 $Cp$  = panas spesifik *superheater* = 0,45 kCal/kg°C  
 $Tf$  = temperatur *flue gas* (°C)  
 $Ta$  = temperatur *ambient* (°C)  
 $GCV$  = nilai kalor atas bahan bakar (H<sub>2</sub>O)

b) *Heat loss* karena kandungan air bahan bakar (H<sub>2</sub>O) (L3)

Hilangnya kelembapan ini karena panas sensibel yang membawa uap air pada titik pemanasan, panas laten dari penguapan air yang mendidih, dan panas *superheat* yang diperlukan dalam membawa uap ini dengan temperatur dari gas buang. Kerugian ini dapat dihitung dengan rumus persamaan 7 sebagai berikut (Kholid Hermawan, 2020):

$$L3 = \frac{M \times \{584 + Cp (Tf - Ta)\}}{GCV \text{ batu bara}} \times 100 \quad (7)$$

Keterangan:

$M$  = massa embun dalam bahan bakar 1 kg basis (kg)  
 $Cp$  = panas spesifik *superheater* = 0,45 kCal/kg (°C)  
 $Tf$  = temperatur *flue gas* (°C)  
 $Ta$  = temperatur *ambient* (°C)  
 $GCV$  = nilai kalor atas bahan bakar (kkal/kg)

c) *Heat loss* karena kandungan air di udara H<sub>2</sub>O (L4)

Uap yang terbentuk karena kelembapan udara yang masuk merupakan *superheat* saat melewati *boiler*. Karena panas ini melewati cerobong, maka ini merupakan suatu losses pada *boiler*. Untuk menghubungkan kerugian ini dengan massa batubara yang dibakar, kandungan kelembapan udara pembakaran dan jumlah udara yang dipasok per satuan massa batubara yang dibakar harus diketahui persamaan 8 (Kholid Hermawan, 2020).

$$L4 = \frac{AAS \times \text{humidity factor} \times Cp \times (Tf - Ta)}{GCV \text{ batubara}} \times 100 \quad (8)$$

Keterangan:

$AAS$  = massa udara actual yang disuplai (kg)  
 $Cp$  = panas spesifik *superheater* (kkal/kg°C)  
 $Tf$  = temperatur *flue gas* (°C)  
 $Ta$  = temperatur *ambient* (°C)  
 $GCV$  = nilai kalor atas bahan bakar (kkal/kg)  
*Humidity factor* = massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering (kg)

d) *Heat loss* karena pembakaran tidak sempurna (L5)

Rugi-rugi ini disebabkan oleh bahan yang tidak terbakar dalam residu. Hasil pembentukan dari pembakaran yang tidak sempurna bisa dicampur dengan oksigen dan dibakar kembali dengan keluaran lebih lanjut dari energi seperti gas buang *boiler* seperti pada persamaan 9. Produk *boiler* termasuk CO, H<sub>2</sub> dan berbagai hidrokarbon merupakan satu-satunya gas hasil konsentrasi yang dapat ditentukan dalam suatu tes pabrik *boiler* (Kholid Hermawan, 2020).

$$L5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{GCV \text{ batubara}} \times 100 \quad (9)$$

Ketika CO dalam ppm selama analisis gas buang menggunakan persamaan 10

$$L5 = CO \text{ (in ppm)} \times 10 - 6 \times Mf \times 28 \times 5744 \quad (10)$$

Keterangan:

- CO = volume CO di *flue gas* yang meninggalkan ekonomizer  
 CO<sub>2</sub> = volume CO<sub>2</sub> aktual di *flue gas*  
 C = kandungan karbon dalam kg batubara (kg)  
 GCV = nilai kalor atas bahan bakar (kCal/kg)  
 M<sub>f</sub> = konsumsi bahan bakar (kg/h)

e) *Heat loss* karena radiasi permukaan, konveksi dan yang tak terhitung (L6)

Jika area permukaan *boiler* dan suhu permukaan *boiler* diketahui, maka kita dapat menggunakan persamaan 11 seperti berikut (Kholid Hermawan, 2020):

$$L6 = 0,548 \times \left[ \left( \frac{TS}{55,55} \right)^4 - \left( \frac{TA}{55,55} \right) \right] + 1,957 \times (Ts-Ta)^{1,25} \times \text{sqrt of} \left[ \frac{196,85 Vm + 68,9}{68,9} \right] \quad (11)$$

f) *Heat loss* karena *fly ash* dan *bottom ash*

Rugi-rugi karena abu terbang (*fly ash*) (%) persamaan 12 dan persamaan 13

$$L7 = \frac{\text{total abu per kg bahan bakar terbakar } t \times \text{GCV of fly ash}}{\text{GCV batu bara}} \times 100 \quad (12)$$

Rugi-rugi karena abu dasar (*bottom ash*) %

$$L8 = \frac{\text{total abu per kg bahan bakar terbakar } t \times \text{GCV of bottom ash}}{\text{GCV batu bara}} \times 100 \quad (13)$$

## 2.2. Data Boiler

*Boiler* yang digunakan di PKS Aek Loba PT Socfin Indonesia dengan spesifikasi sesuai dengan *name plate* yang ada pada ketel itu sendiri adalah sebagai berikut:

Merk	: Atmindo
Tipe	: SFMW Boiler
Kapasitas Uap	: 40 ton/jam
Temperatur Uap	: 250 °C
Tekanan	: 20 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatur Air Umpan	: 90 °C
Temperatur Udara	: 30 °C
Temperatur Gas Buang	: 355 °C
Jenis Bahan Bakar	: Cangkang dan serabut dengan perbandingan 1:5

Bahan bakar yang digunakan di PKS Aek Loba adalah cangkang dan serabut dengan komposisi yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan komposisi udara pembakaran.

**Tabel 1:** Komposisi Bahan Bakar

Unsur	Cangkang	Serabut
Carbon (C)	61,34	40,00
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	3,25	4,25
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	2,45	22,29
Oksigen (O <sub>2</sub> )	31,16	30,29
Abu	1,80	3,17
Total	100	100

**Tabel 2:** Komposisi Udara Pembakaran

Komposisi	Massa (%)	Volume (%)
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	77	79
Oksigen (O <sub>2</sub> )	23	21

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Analisis Nilai Kalor Bahan Bakar

Berdasarkan dari data bahan bakar yang menguraikan kandungan unsur kelapa sawit pada Tabel 15, maka komposisi 1 kg bahan bakar cangkang dan serabut sawit adalah seperti pada persamaan 15 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{1}{6}(0,6134) + \frac{5}{6}(0,4) = 0,4355 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \\
 H_2 &= \frac{1}{6}(0,0325) + \frac{5}{6}(0,0425) = 0,0408 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \\
 N_2 &= \frac{1}{6}(0,0245) + \frac{5}{6}(0,2229) = 0,1898 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \\
 O_2 &= \frac{1}{6}(0,3116) + \frac{5}{6}(0,3029) = 0,30435 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \\
 \text{Abu} &= \frac{1}{6}(0,018) + \frac{5}{6}(0,0317) = 0,02941 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \\
 \hline
 \text{Jumlah} &= 1 \text{ [kg/kg bahan bakar]}
 \end{aligned} \quad (15)$$

Maka dapat diperoleh nilai kalor atas (HHV) dan nilai kalor bawah (LHV) dari persamaan 16 dan 17 berikut:

$$\begin{aligned} \text{HHV} &= 33950 C + 144200 \left( H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400 S \\ &= 33950 (0,4355) + 144200 \left( 0,0408 - \frac{0,30435}{8} \right) + 9400 (0) \\ &= 14785,225 + 223,825077 \\ &= 15009,05 \text{ [kJ/kg]} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{LHV} &= \text{HHV} - 2400 (9.H_2) \\ &= 15009,05 - 2400 (9 \cdot 0,0408) \\ &= 14127,77 \text{ [kJ/kg]} \end{aligned} \quad (17)$$

### 3.2. Analisis konsumsi bahan bakar

Berdasarkan data spesifikasi, maka jumlah laju pemakaian bahan bakar yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan 18 sebagai berikut:

$$\dot{m}_{bb} = \frac{\dot{m}_u (h_u - h_a)}{\eta_b \cdot \text{LHV}} \quad (18)$$

Dimana:

Tu: 250 °C

Pu: 20 bar

T = 90 °C; h<sub>a</sub> = 376,94 kJ/kg

T = 250; h = 2902,5 kJ/kg

$\dot{m}_u$  = 40 ton/jam

Maka kebutuhan bahan bakar berdasarkan spesifikasi alat dapat dilihat pada persamaan 19:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{bb} &= \frac{40000 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} (2902,5 - 376,94) \text{ kJ/kg}}{0,75 \times 14127,77 \text{ kJ/kg}} \\ &= \frac{116099623,06}{10595,8275} \text{ kg/jam} \\ &= 10957,10 \text{ kg/jam} \\ &= 10,957 \text{ ton/jam} \end{aligned} \quad (19)$$

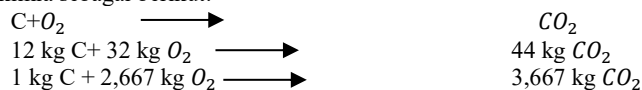
Hasil diatas adalah 40 ton/jam uap dengan tekanan 20 bar dan temperatur akhir 250 °C dengan efisiensi 75% membutuhkan bahan bakar 10,957 ton/jam.

### 3.4. Analisis kebutuhan udara pembakaran

Dalam menentukan kebutuhan udara pembakaran yang terdapat pada Tabel 2. Komposisi bahan bakar dan perbandingan cangkang dan serabut yaitu 1:5 dimana perbandingan ini merupakan penggunaan cangkang 16,67% dan serabut 83,3%:

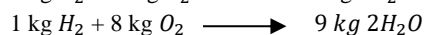
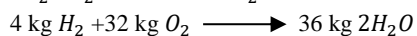
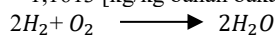
C	= 43,55%
H <sub>2</sub>	= 4,08%
N <sub>2</sub>	= 18,98%
O <sub>2</sub>	= 30,435%
Abu	= 2,941%
Jumlah	= 100%

Pada bahan bakar cangkang dan serabut, komposisi kimia yang bereaksi dengan O<sub>2</sub> pada pembakaran sempurna adalah C dan H<sub>2</sub> dengan reaksi kimia sebagai berikut:



Sehingga untuk setiap pembakaran 1 kg C membutuhkan sebanyak  $\frac{32}{12}$  kg O<sub>2</sub> dan pembakaran 0,4355 kg C sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= 0,4355 \times \frac{32}{12} \\ &= 1,1613 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \end{aligned}$$



Sehingga untuk setiap pembakaran 1 kg H<sub>2</sub> membutuhkan 8 kg O<sub>2</sub> dan pembakaran 0,0408 kg H<sub>2</sub> sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= 0,0408 \times 8 \\ &= 0,3264 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \end{aligned}$$

Sedangkan jumlah oksigen (O<sub>2</sub>) yang terkandung di dalam bahan bakar cangkang dan serabut sebanyak 0,30435 kg. Oleh karena itu, jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran 1 kg bahan bakar cangkang dan serabut pada proses stoikiometri yaitu:

$$\begin{aligned} m_{O_2} &= 1,1613 + 0,3264 - 0,30435 \\ &= 1,18335 \text{ [kg/kg bahan bakar]} \end{aligned}$$

Jumlah massa udara yang dibutuhkan untuk pembakaran 1 kg bahan bakar cangkang dan serabut pada proses stoikiometri yaitu:

$$(m_{ud})_{\text{teo}} = \frac{100}{23} \times 1,18335 \text{ kg}$$

$$= 5,145 \text{ [kg udara/kg bahan bakar]}$$

Agar terjadi proses pembakaran sempurna maka ditambahkan *Excess Air* (EA) 50% maka massa udara secara aktual adalah

$$(m_{ud})_{act} = (m_{ud})_{teo} \times (1 + EA)$$

$$= 5,145 \times (1 + 0,5)$$

$$= 7,7175 \text{ [kg/kg bahan bakar]}$$

$$m_{ud \text{ excess}} = (m_{ud})_{act} - (m_{ud})_{teo}$$

$$= 7,7175 - 5,145 = 2,5725 \text{ [kg udara/kg bahan bakar]}$$

Sehingga jumlah udara pembakaran yang dibutuhkan untuk setiap jam di dalam ruang bakar dapat ditentukan dalam persamaan 20 sebagai berikut:

$$(m_{ud})_{act \text{ total}} = (m_{ud})_{act} \times \dot{m}_{bb} \quad (20)$$

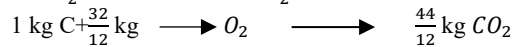
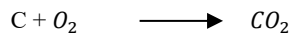
$$= 7,7175 \times 10957,10 \text{ kg/jam}$$

$$= 84561,41 \text{ [kg udara/jam]}$$

$$= 84,56141 \text{ ton/jam}$$

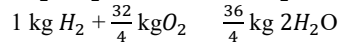
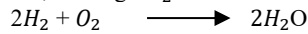
### 3.5. Analisis gas asap pembakaran

Dari reaksi proses pembakaran sebagai berikut:



Sehingga untuk 0,4355 kg C menghasilkan =  $\frac{44}{12} \text{ kg } CO_2 \times 0,4355$

$$= 1,5968 \text{ kg } CO_2$$



Sehingga untuk 0,0408 kg  $H_2$  menghasilkan =  $9 \text{ kg } 2H_2O \times 0,0408$

$$= 0,3672 \text{ kg } 2H_2O$$

Jumlah massa oksigen bebas dalam gas asap adalah:

$$\text{Massa } O_2 \text{ excess} = \frac{23}{100} \times (m_{ud})_{act} \quad (21)$$

$$= \frac{23}{100} \times 7,7175$$

$$= 1,775 \text{ kg } O_2$$

Jumlah massa nitrogen bebas dalam gas asap adalah:

$$\text{Massa } N_2 \text{ excess} = \frac{77}{100} \times (m_{ud})_{act} + N_2 \text{ dalam bahan bakar}$$

$$= \frac{77}{100} \times 7,7175 + 0,1898$$

$$= 6,1322 \text{ kg } N_2$$

Jadi total gas asap yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar dengan basis 1 kg adalah seperti pada persamaan 21 berikut:

$$m_{g(akt)} = 1,5968 + 0,3672 + 1,775 + 6,1322$$

(21)

$$= 9,8712 \text{ [kg gas asap/kg bahan bakar]}$$

Maka jumlah gas asap yang dihasilkan dari bahan bakar cangkang dan serabut adalah sebesar:

$$m_g = m_g \times \dot{m}_{bb}$$

$$= 9,8712 \times 10957,10$$

$$= 108159,72 \text{ kg gas asap/jam}$$

### 3.6. Analisis efisiensi

Berikut perhitungan efisiensi *boiler* sebagai berikut:

Air umpan *boiler* : - Temperatur = 90 [°C]

Uap yang dihasilkan : - Temperatur = 250 [°C]

: - Tekanan = 20 [bar]

: -  $\dot{m}_u$  = 40 [bar]

Bahan bakar : - Nilai Kalor (LHV) = 14127,77 [kJ/kg]

: -  $\dot{m}_{bb}$  = 10957,10 [kg/jam]

$$T = 90 \text{ } ^\circ\text{C } \text{Ch}_a = 376,94 \text{ kJ/kg}$$



Entalpi uap ( $h_u$ ) pada  $T_u = 250\text{ }^\circ\text{C}$  dan  $P_u = 20\text{ bar}$ :  $T = 250$ ;  $h = 2902,5\text{ kJ/kg}$

Maka didapat efisiensi boiler dengan menggunakan persamaan 22 sebesar:

$$\begin{aligned} \eta_b &= \frac{Q_{in} (\text{Heat Output})}{Q_{out} (\text{Heat Input})} \times 100\% \\ &= \frac{\dot{m}_b (h_u - h_a)}{\dot{m}_{bb} \cdot LHV} \times 100\% \\ &= \frac{40000 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} (2902,5 - 376,94) \text{kJ}}{10957,10 \cdot 14127,77 \frac{\text{kJ}}{\text{jam}}} \times 100\% \\ &= \frac{116099623,06}{154799388,667} \\ &= 75\% \end{aligned} \tag{22}$$

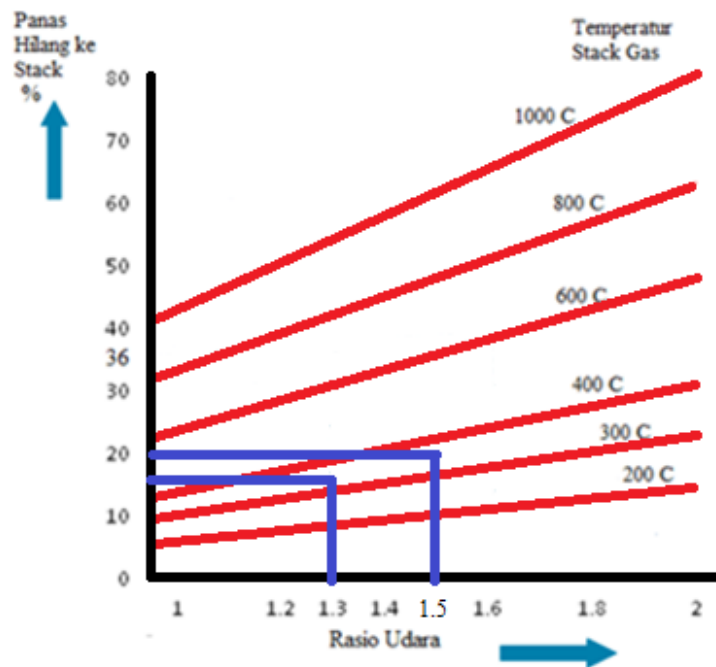
### 3.7. Identifikasi potensi penghematan

Kinerja boiler menunjukkan efisiensi 75% dengan melakukan perhitungan rasio udara sebagai bagian dari audit boiler maka didapatkan.

Rasio Udara = Udara Pembakaran Aktual / Udara Pembakaran Teoritis

$$\begin{aligned} &= \frac{7,7175 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}}{5,145 \frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}}} \\ &= 1,5 \end{aligned}$$

Temperatur gas buang pada boiler menunjukkan  $355\text{ }^\circ\text{C}$  dan hasil pengukuran komposisi gas buang menghasilkan rasio udara adalah 1,5 dari Gambar 2. panas hilang ke cerobong, energi sensibel yang terdapat pada gas buang kecerobong sebesar 20% dari energi input



Gambar 2: Panas Hilang Cerobong vs Rasio Udara

Jika rasio udara diturunkan misalnya dari 1,5 menjadi 1,3 maka jumlah energi hilang melalui gas buang akan turun dari 20% menjadi 15%. Ini berarti dengan hanya pengurangan rasio udara dari 1,5 menjadi 1,3 mengakibatkan energi terbuang melalui cerobong berkurang sebesar (20-15) % atau sama dengan 5%. Berkurangnya rugi-rugi energi melalui cerobong berarti penghematan bahan bakar pada boiler sebesar  $\frac{5}{0,75} = 6,6\%$ , angka 0,75 adalah efisiensi boiler

Rata-rata penggunaan bahan bakar adalah : [ton/jam]  
 Setelah dilakukan penghematan : 10,957 – 6,667%  
 : 10,226 [ton/jam]

Pada Gambar 2 disebutkan bahwa semakin rendah temperatur gas pembakaran semakin sedikit energi terbuang, demikian juga rasio udara, semakin rendah persentase rasio udara semakin sedikit energi yang terbuang, atau dengan kata lain efisiensi pembakaran semakin meningkat. Secara teoritis penghematan maksimal terjadi pada rasio udara sama dengan 1, tetapi jika dalam praktek rasio udara dibuat 1, maka bahan bakar cenderung tidak terbakar dengan sempurna yang ditandai dengan munculnya CO atau asap hitam dalam gas buang. Penurunan rasio udara yang terlalu banyak akan berakibat menurunkan efisiensi dan simping itu juga cenderung menimbulkan munculnya gas CO pada gas buang yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia.

### 3.8. Pembahasan

*Boiler* yang digunakan adalah *water tube boiler* dengan kapasitas sesuai spesifikasi 40 ton/jam; efisiensi 70%; bahan bakar tipe kalori rendah dengan kebutuhan bakar teoritis 10,957 ton/jam. Kebutuhan udara pembakaran teoritis sesuai dengan komposisi unsur dalam bahan bakar adalah 5,145 kg udara/kg bahan bakar dengan *excess air supplied* sebesar 2,5725 kg udara/kg bahan bakar sehingga kebutuhan udara aktualnya 7,7175 kg udara/kg bahan bakar. Peningkatan efisiensi ataupun penghematan dapat diperoleh dengan jalan pengendalian rasio udara dan bahan bakar. Pengendalian ini akan menurunkan rasio udara dari 1,5 menjadi 1,3. Hal ini akan mengurangi rugi-rugi gas buang dari 20% menjadi 15%, sehingga terjadi penghematan bahan bakar sebesar 5%. Peluang penghematan pada *boiler* berbahan bakar cangkang dan serabut dengan kapasitas 20 Ton/Jam di PKS Pagar Merbau mendapatkan efisiensi *boiler* adalah 70,10% dimana potensi penghematan rasio udara pembakaran dari 1,5 menjadi 1,3 yang dapat menghemat bahan bakar sebesar 2% (Dhea gultom, 2019). Melihat perbandingan tersebut menyatakan peningkatan efisiensi dan penghematan energi pada *boiler* dapat diperoleh dengan jalan pengendalian rasio udara dan bahan bakar. Apabila temperatur *stack gas* keluar dari *boiler* dapat dibuat rendah dan persentase *excess air* pada udara dibuat sesedikit mungkin, ini artinya mengurangi rugi-rugi energi pada gas buang, dengan kata lain efisiensi pembakaran meningkat menjadi optimal.

## 4. KESIMPULAN

Proses audit energi (pengukuran, analisa data dan perhitungan) dapat melakukan penghematan bahan bakar sebesar 5%, sehingga kerja *boiler* agar tekanan stabil pada angka 20 bar dan hal ini terjadi akibat kekurangan bahan bakar. Untuk menjaga parameter kinerja *boiler*, seperti efisiensi dan rasio penguapan berkurang disebabkan buruknya pembakaran, kotornya permukaan penukar panas dan buruknya operasi dan pemeliharaan. Manajemen pembakaran dan manajemen air umpan merupakan parameter konservasi energi yang perlu dijaga untuk mempertahankan *lifetime boiler* yang lebih lama. Manajemen pembakaran dimaksudkan untuk mendapatkan kondisi pembakaran suatu bahan bakar yang *boiler* optimum dan menjaga agar pembakaran selalu berada pada rasio udara rendah. Sedangkan manajemen air umpan pada *boiler* dimaksudkan untuk mendapatkan performansi yang lebih baik dalam jangka waktu yang panjang.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur karena berkat dan rahmat yang maha kuasa penulis dapat menyelesaikan artikel ini, serta terima kasih yang sedalamnya karena dukungan finansial yang diberikan oleh Direktorat Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui Pusat Penelitian Pengabdian Masyarakat, Politeknik Negeri Medan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ariyanto. (2009). Perancangan Sistem Pengendalian Level *Deaerator* menggunakan *Fuzzy Gain Scheduling*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Balai Besar Teknologi Energi. (2015). Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri. Jakarta. Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian ESDM.
- Daryanto. (2015). Teknik Pesawat Tenaga. Jakarta. Bumi Aksara Jakarta.
- Djokosetyardjo, M.J. (2016). Ketel Uap. Jakarta. CV Pelita Kasih.
- Hermawan, K., (2020). Peluang Penghematan Energi Pada Boiler di PT Indo Barat Rayon. *Jurnal Teknik Energi* 10, 19-23.
- Syamsir, M. (2010). Pesawat-Pesawat Konversi I (Ketel Uap). Jakarta. CV Rajawali.
- Naibaho, P. (2016). Teknologi Pengolahan Kelapa Sawit. Medan. Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Pudjanarsa, A., Narsunud, D. (2008). Mesin Konvesi Energi. Yogyakarta. CV Andi Offset.
- Sanjaya, W.D. (2018). Analisis Pengaruh Penggunaan Energi Terhadap Output Produksi Industri. Semarang. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Winarto, S. (2019). Penghematan Energi Pada Sistem Boiler. *Swara Patra* 2, 35-42.