

Peningkatan Efisiensi Boiler Dalam Penghematan Energi dan Pengurangan Emisi Gas Buang : Teknikal Review

FAYZA YULIA, GARY SINAGA, MIFTAH DARIS, KATO RA'IF, ZAKY DZAR, IBNU TEGAR, FIKRI ASHARI, FITRI WAHYUNI, REDA RIZAL

ABSTRACT

Boiler adalah suatu komponen yang secara luas digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau Industri, dengan tujuan mengubah energi panas menjadi energi gerak melalui proses pembakaran yang nantinya akan menghasilkan uap bertekanan. Nyatanya, dalam lingkungan *power plant*, Boiler merupakan komponen penghasil *energy/exergy destruction* terbesar. Hal ini menandakan, tingkat *heat losses* pada Boiler sangatlah tinggi. Sehingga, peningkatan efisiensi pada Boiler, baik kecil maupun besar, sangat diperlukan untuk menghemat bahan bakar yang digunakan dan memperkecil jumlah emisi gas buang yang dihasilkan. Semakin tingginya harga bahan bakar di dunia juga membuat banyak perusahaan mencari cara untuk menekan atau mengurangi penggunaan energi masukan tanpa harus mengganggu proses produksinya. Tujuan dari review artikel ini adalah mengetahui faktor-faktor yang dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi dari Boiler. Faktor-faktor yang dirangkum, dibagi menjadi dua, yaitu perangkat instalasi pendukung dan bahan bakar. Kedua faktor ini berpotensi untuk meminimalisasi biaya keluar dan memaksimalkan produksi. Perangkat instalasi pendukung yang dapat digunakan antara lain, *Flash Tank* untuk pemulihan energi akibat *Blowdown*, *Air Preheaters* untuk memanfaatkan *heat losses* pada emisi gas buang, kontrol variasi ukuran diameter Pipa Api, dan *Soot Blower* untuk mengurangi efek *Fouling*. Adapun strategi peningkatan efisiensi pada bahan bakar antara lain, *Blending Coal* dan proses emulsi pada bahan bakar yang dapat mengurangi emisi gas buang. Di luar faktor tersebut, proses pemeliharaan (*maintenance*) secara berkala juga merupakan kunci utama agar Boiler berada pada tingkat efisiensi tertinggi.

Keywords: Boiler, efisiensi, energi, *power plant*, emisi, bahan bakar

PENDAHULUAN

Peningkatan populasi manusia di seluruh dunia berakibat langsung pada peningkatan konsumsi energi yang lebih besar, terutama pada kebutuhan pasokan energi listrik. Menurut EIA (Energy Information Administration), konsumsi energi listrik di seluruh dunia, meningkat dari 549 kuadriliun Btu (2012) menjadi 629 kuadriliun Btu pada tahun 2020 atau meningkat sebesar 14,57%. Permasalahan peningkatan kebutuhan energi listrik tentunya tidak berhenti sampai disitu saja. Namun, akan berpengaruh pada berbagai aspek yang terkandung di dalamnya. Contohnya saja, masalah bahan baku dan *power plant* untuk memproduksi energi listrik.

Dalam menghadapi kebutuhan energi listrik yang semakin besar, dunia termasuk Indonesia ternyata memiliki masalah tersendiri dalam memenuhi kebutuhan energi listrik dalam negeri, terutama dalam masalah pemanfaatan bahan baku yang tepat guna untuk memperoleh energi keluaran yang lebih efektif. Menurut Pamungkas dan Irawan (2020), Indonesia merupakan salah satu Negara yang mayoritas pembangkit listriknya masih menggunakan PLTU dan keberadaannya tersebar merata diseluruh wilayah.

Di Indonesia sendiri, penggunaan bahan baku yang paling banyak digunakan sebagai bahan bakar *power plant* adalah Batu Bara. Pembangkit listrik tenaga Batu Bara di Indonesia meningkat signifikan dari 117 TWh (2015)

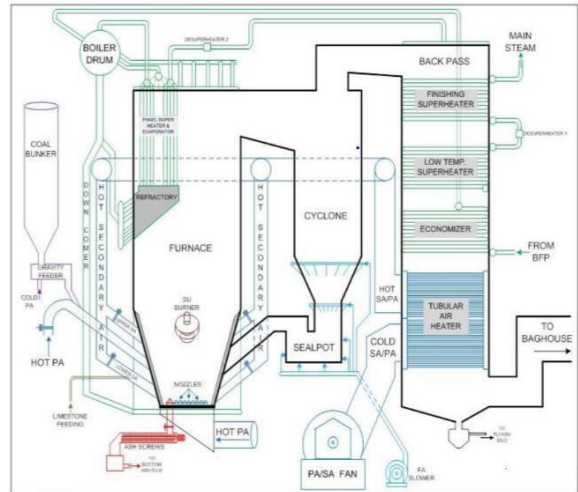
menjadi 168 TWh pada tahun 2019 atau meningkat sebesar 43,6% (terbesar di antara seluruh negara G20). Dengan demikian Indonesia sah menjadi salah satu negara terbesar dalam sektor pembangkit listrik tenaga Batu Bara dan akan mengalami kesulitan dalam melakukan transisi untuk meninggalkan Batu Bara sebagai bahan bakar *power plant* untuk menghasilkan energi listrik.

Dari permasalahan tersebut, akan membutuhkan waktu yang lama bagi Indonesia untuk mengurangi penggunaan Batu Bara sebagai bahan bakar *power plant* di Indonesia. Maka dari itu, Indonesia harus mengoptimalkan sisa waktu penggunaan Batu Bara sembari melakukan transisi secara perlahan dalam mengganti Batu Bara sebagai sumber utama bahan bakar. Seperti yang kita tahu, jenis komponen pada *power plant* yang bersinggungan langsung dengan Batu Bara sebagai bahan bakar, adalah Boiler.

Boiler merupakan salah satu mesin yang dipakai untuk menghasilkan energi listrik yang pemakaiannya sudah melebihi angka 50% di seluruh dunia. Sehingga akan sangat banyak faktor-faktor pengoptimalan yang dapat dilakukan. Hal ini dikarenakan banyaknya penelitian yang telah dilakukan mengenai pengoptimalan fungsi Boiler.

1. Boiler

Menurut Syahputra et al. (2018), boiler adalah bejana tertutup yang menyediakan sarana untuk panas pembakaran ditransfer ke air sampai terbentuk air panas atau uap (steam). Air atau steam tersebut digunakan pada tekanan tertentu untuk mengalirkan panas ke suatu proses, biasanya digunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti turbin uap, mesin uap, dan pemanas. Panas yang diberikan untuk air di dalam boiler berasal dari proses pembakaran dengan berbagai macam jenis bahan bakar yang dapat digunakan, seperti solar/minyak bumi, dan gas. Boiler umumnya terbuat menggunakan bahan baja dengan spesifikasi tertentu.



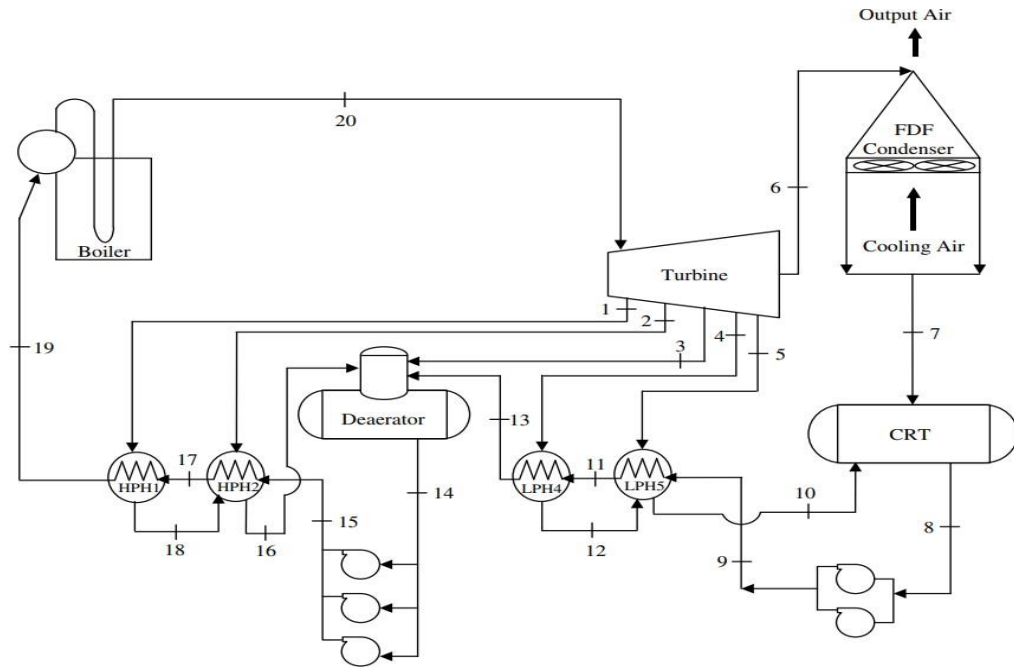
GAMBAR 1. Contoh bagian pada boiler (PLTU Nagan Raya) (Pamungkas et al. 2021)

2. Efisiensi

Efisiensi merupakan cara untuk meminimalisirkan atau menghilangkan segala penggunaan bahan dan tenaga kerja secara berlebihan yang dapat menyebabkan kerugian serta mencapai suatu tujuan yang optimal (cepat dan tepat) dan memaksimalkan sumber daya tersebut. Dapat disimpulkan bahwa efisiensi adalah bekerja dengan sumber daya yang sesuai

Pengoptimalan atau peningkatan efisiensi dari boiler, merupakan salah satu solusi dalam menghadapi permasalahan listrik di Indonesia. Serta hal ini juga dapat memaksimalkan penggunaan batu bara yang saat ini menjadi bahan bakar utama di sebagian besar *power plant* di Indonesia. Untuk melakukan peningkatan efisiensi pada Boiler akan dibutuhkan suatu strategi yang dapat meminimalisasi penggunaan bahan baku, serta dapat memaksimalkan keluaran listrik yang dapat dihasilkan. Strategi tersebut dapat dilakukan pada komponen pokok sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Uap, yaitu Boiler.

Peneliti dapat melakukan peningkatan efisiensi pada alat tersebut, dengan mengetahui apa saja faktor-faktor pendukung dan penghambat efisiensi, serta teknis pengaplikasiannya pada alat tersebut. Maka dari itu, pada jurnal ini, penulis berusaha untuk melakukan analisis terhadap jurnal-jurnal terdahulu dalam rangka mengkombinasikan dan menghasilkan cara terbaik untuk meningkatkan efisiensi Boiler.



GAMBAR 2. Diagram Skematik PLTU (Jordan power plant) (Aljundi et al. 2009)

BOILER DALAM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap panas untuk memutar turbin yang nantinya akan diubah menjadi energi listrik.

PLTU memiliki beberapa bagian penting dalam sistem produksinya, yaitu boiler, turbin dan generator. Boiler adalah sebuah *vessel* tertutup yang digunakan pada PLTU untuk merubah air menjadi uap yang bertekanan dengan cara melakukan atau mentransfer panas dari proses pembakaran. Sistem boiler terdiri atas sistem air umpan (*feedwater*), sistem uap (*steam*), dan sistem bahan bakar (*fuel*). Sistem *feedwater* menyediakan air umpan untuk boiler sesuai dengan kebutuhan uap yang telah ditentukan. Sistem *steam* mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Pada sistem *steam*, tekanan uap diatur menggunakan keran dan dan diawasi dengan alat pemantau tekanan. Sistem *fuel* merupakan semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan boiler (Karaeng et al. 2013)

Nyatanya, menurut Saidur et al. (2009), para peneliti menemukan bahwa boiler merupakan komponen yang memiliki kontribusi terbesar terhadap kerugian *exergy* dalam setiap sistem pembangkit listrik tenaga uap, terutama

dalam ruang pembakaran. Hal ini tentunya menjadikan boiler sebagai komponen yang memiliki tingkat resiko kerusakan tertinggi juga. Maka dari itu, sangat dibutuhkan suatu usulan berupa strategi pengurangan risiko kerusakan khususnya pada komponen-komponen kritis bagian boiler agar dapat mengurangi kerusakan di masa depan (Pamungkas & Irawan, 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Flash tank untuk pemulihan energi akibat *blowdown*

1.1 Boiler *blowdown*

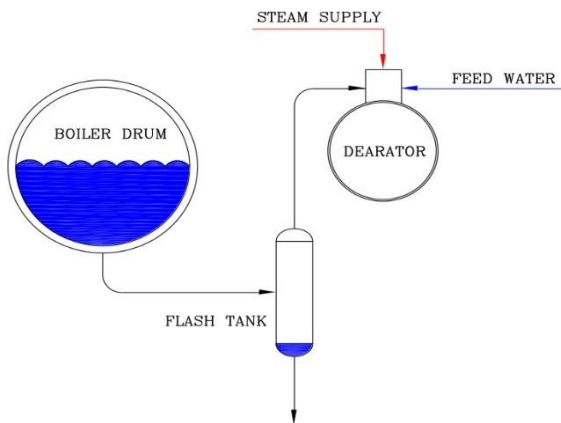
Pada mesin boiler, *feedwater* memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan tingkat keoptimalan dari kerja (uap) yang dihasilkan dalam satu siklus mesin boiler. *Feedwater* pada dasarnya, akan membawa materi pengotor yang biasa disebut dengan Total Dissolved Solids (TDS). Siklus dari suatu boiler yang digunakan secara terus-menerus mengakibatkan terakumulasinya nilai TDS di dalam boiler (Vandani et al. 2015). Jika akumulasi dari TDS terus-menerus dibiarkan, maka akan timbul masalah-masalah baru, seperti penyumbatan, *overheating*, sampai dengan korosi pada komponen-komponen yang ada di dalam Boiler.

Untuk menanggulangi masalah tersebut, dilakukanlah proses *blowdown*, yang dilakukan

untuk mengeluarkan dan menghilangkan materi TDS yang terlarut di dalam feedwater dengan cara mengeluarkan feedwater secara berkala atau dalam jangka waktu tertentu dari Boiler.

Namun, dilakukannya proses *blowdown* Feedwater, ternyata telah menimbulkan masalah baru. Masalah tersebut muncul Ketika, feedwater yang dibuang tidak sepenuhnya limbah yang tidak bisa digunakan kembali. Terdapat sejumlah panas yang terkandung dalam feedwater sebelum dilakukan proses *blowdown*. Sehingga, secara tidak langsung, melakukan proses *blowdown* Feedwater merupakan pemborosan karena sama saja dengan membuang panas yang dihasilkan tungku pembakaran (furnance).

1.2 Flash Tank

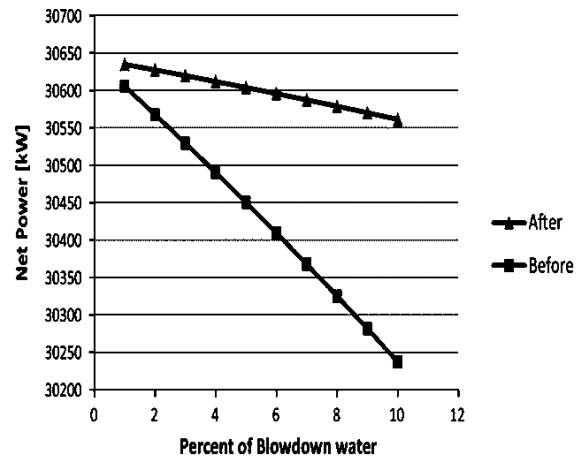


GAMBAR 3. Diagram skematik instalasi flash tank pada boiler (Vandani et al. 2015)

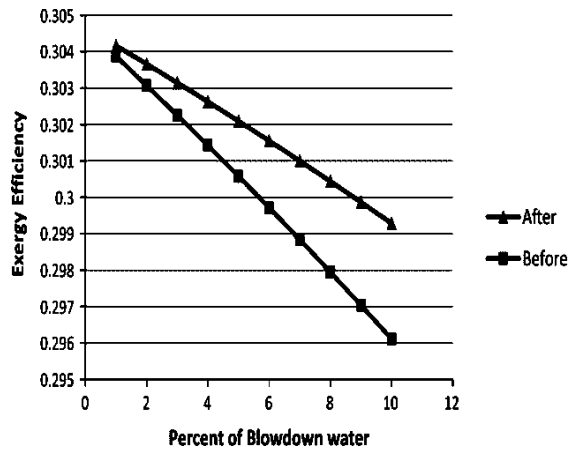
Menurut Vandani et al. (2015), dengan menggunakan Flash Tank, peneliti dapat merecover sejumlah energi yang terbuang begitu saja bersama dengan feedwater pada proses *blowdown*. Dalam sistem Flash Tank, *blowdown* feedwater yang biasanya dibuang begitu saja, dapat dimanfaatkan kembali dengan menghubungkan saluran *blowdown*, masuk ke dalam instalasi Flash Tank. Sejumlah panas (kalor) yang terdapat di dalam feedwater kemudian akan diubah menjadi uap bertekanan rendah oleh Flash Tank. Lalu, uap bertekanan rendah akan diubah menjadi uap dengan suhu tinggi dan dapat digunakan sebagai pemanas awal pada makeup water pada Deaerator, sedangkan kondensat panas yang dihasilkan dari *blowdown* dialirkan menuju Drain kembali.

Dengan demikian, kalor yang terbuang pada proses *blowdown* secara tidak langsung dapat dialirkan kembali menuju siklus awal dari Boiler. Sehingga dapat mengurangi Energi atau

kalor yang dibutuhkan untuk memulai kembali siklus Boiler.



GAMBAR 4. Grafik daya keluaran terhadap persentase *blowdown* (Vandani et al. 2015)



GAMBAR 5. Grafik exergy efficiency terhadap persentase *blowdown* (Vandani et al. 2015)

Dari jurnal yang diacu, diketahui parameter efisiensi yang didapat adalah :

- Kenaikan efisiensi energi sistem yang semula 22% menjadi 33% (naik 1%).
- Peningkatan daya keluaran power plant sebesar 0,72%.
- Penghematan total 25.444,47 m³ feedwater setiap tahunnya.

2. Pemanfaatan heat-losses dari emisi gas buang menggunakan air pre-heaters

2.1 Flue gas

Boiler merupakan salah satu mesin yang cara kerjanya dapat kita ibaratkan sebagai “mesin kalor”. Dimana, sudah pasti panas masuk yang diberikan pada satu siklus tidak 100 persen dikonversikan menjadi usaha atau kerja atau dengan kata lain panas/kalor yang masuk

menghasilkan usaha/kerja ditambah dengan panas/kalor yang keluar.

$$Q_{in} = W_{out} + Q_{out} \quad (1)$$

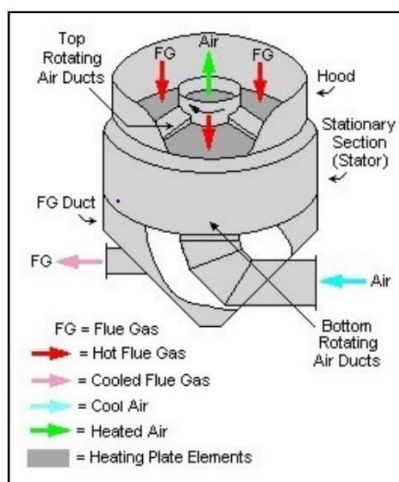
Dari pernyataan di atas para *engineer* berusaha untuk memanfaatkan kembali Q_{out} yang dapat disebut sebagai Flue Gas yang pada prinsip dasar Boiler merupakan Gas Buang Akhir yang akan langsung dilepas ke lingkungan begitu saja. Karena Flue Gas merupakan gas sisa pembakaran, sudah pasti suhu dari gas buang tersebut akan lebih tinggi dari suhu ambient, sehingga dapat dimanfaatkan kembali untuk memanaskan udara pembakaran baru yang akan memasuki satu siklus awal dari Boiler (Pachaiyappan dan Prakash, 2015).

2.2 Air pre-heaters

Air Preheater pada dasarnya menerapkan prinsip konservasi energi dimana:

$$Q_{lepas} = Q_{terima} \quad (2)$$

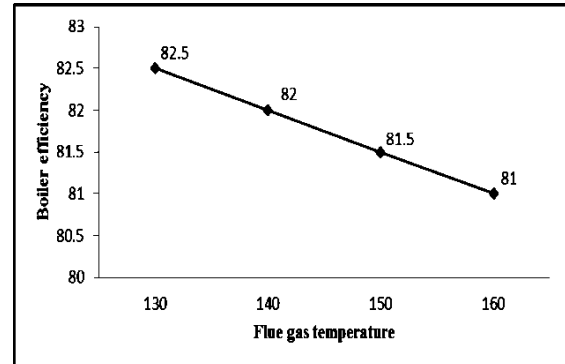
Dimana Q_{lepas} merupakan kalor/panas dari Flue Gas dan Q_{terima} adalah udara pembakaran (Air Combustion) baru yang hendak memasuki satu siklus baru dari boiler. Cara kerjanya adalah, kalor berpindah secara langsung dari panas gas buang (flue gas) ke udara yang melintas pada permukaan penukar kalor, biasanya berbentuk tabung, walaupun ada yang berbentuk plat. Unit model tabung biasanya berupa penukar kalor selongsong dan tabung aliran berlawanan arah, dimana gas mengalir di dalam tabung-tabung lurus vertikal dan horizontal seperti pada Gambar 6.



GAMBAR 6. Air pre-heaters (Pachaiyappan dan Prakash, 2015)

Sehingga nantinya kalor akan berpindah dari suhu tinggi ke suhu rendah (Hukum Termodinamika Kedua), dimana suhu tinggi merupakan Flue Gas dan suhu rendahnya adalah

udara pembakaran baru (new Air Combustion). Dengan demikian, dapat diperoleh kembali kalor dari Q_{out} yang terbuang percuma dan dialirkan masuk kembali menuju satu siklus baru di dalam boiler (Pachaiyappan dan Prakash, 2015).



GAMBAR 7. Grafik perbandingan kenaikan suhu terhadap efisiensi boiler (Pachaiyappan dan Prakash, 2015)

Dari jurnal yang diacu, penelitian yang dilakukan menghasilkan data dimana setiap kenaikan suhu 22°C dapat meningkatkan efisiensi boiler sebesar 1%

3. Modifikasi atau kontrol variasi ukuran diameter pipa api (fire tube)

3.1 Peningkatan daya uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit listrik yang menggunakan uap panas untuk memutar turbin. Uap panas yang digunakan dapat berasal dari proses penguapan air melalui boiler. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar batu bara maupun bahan bakar minyak untuk memanaskan air. Artinya, makin tinggi daya uap yang dihasilkan, turbin akan berputar dengan maksimal, dan tujuan maksimal akan tercapai, yaitu produksi listrik yang makin besar (Fadli dan Fahrudin, 2021).

3.2 Pipa api (fire tube)

Menurut Fadli dan Fahrudin (2021), pipa api adalah komponen di dalam tabung boiler yang berfungsi sebagai jalan perambatan panas dari hasil pembakaran bahan bakar menuju air, sehingga menghasilkan uap air yang memiliki tekanan. Modifikasi dilakukan dengan menggunakan *Mini boiler*. Dengan melakukan modifikasi atau variasi diameter pipa api, tentu saja nilai output energi yang dihasilkan akan berbeda-beda.

Debit uap dan daya uap (W)

$$V = \frac{\text{Volume Suntikan (mL)}}{\text{Kecepatan Aliran Uap (s)}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ mL}} \quad (3)$$

dengan $V = \text{debit uap } (m^3/s)$

Setelah menemukan hasil dari perhitungan debit uap (3), selanjutnya dilakukan perhitungan daya uap (4).

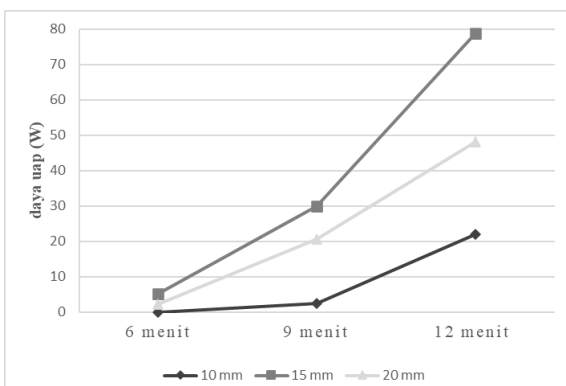
$$Pu = P \text{ keran} \times \frac{10^5 Pa}{1 \text{ bar}} \cdot V \quad (4)$$

dengan $Pu = \text{daya uap } (W)$

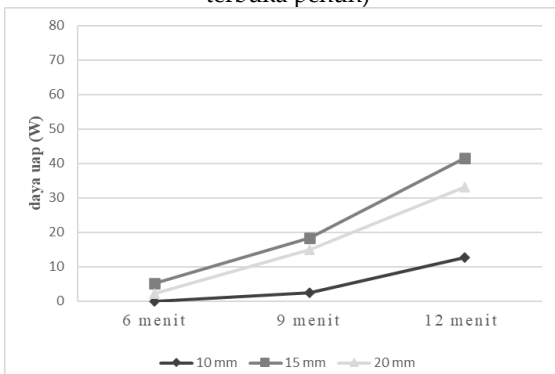
Daya bahan bakar dan Efisiensi boiler (%)

$$Pbb = \frac{Pu (W)}{\text{Daya Bahan Bakar } (W)} \cdot 100\% \quad (5)$$

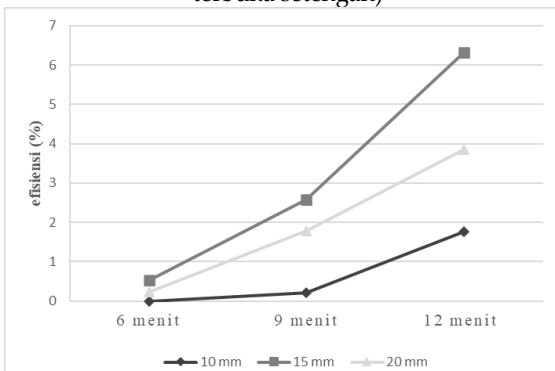
dengan $Pbb = \text{daya bahan bakar } (W)$. Setiap unit satuan yang digunakan telah disesuaikan dan mengacu kepada SI.



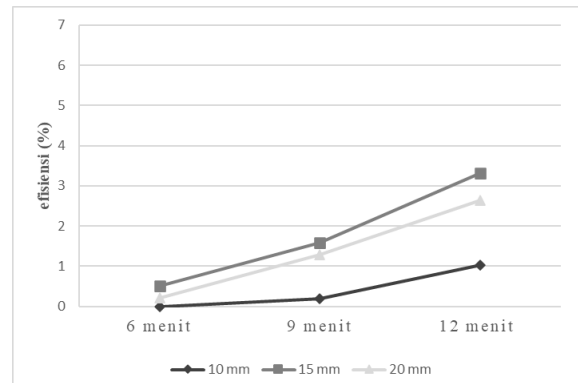
GAMBAR 8. Grafik perbandingan daya uap (keran terbuka penuh)



GAMBAR 9. Grafik perbandingan daya uap (keran terbuka setengah)



GAMBAR 10. Grafik perbandingan efisiensi (keran terbuka penuh)



GAMBAR 11. Grafik perbandingan efisiensi (keran terbuka penuh)

Dari jurnal yang diacu, diketahui parameter efisiensi yang didapat adalah :

- Efisiensi tertinggi terdapat pada variasi pipa api berdiameter 15 mm saat keran terbuka penuh. Berturut-turut selama waktu (6, 9, dan 12)menit adalah (0,526%, 2,574%, dan 6,319)%.
- Efisiensi tertinggi terdapat pada variasi pipa api berdiameter 15 mm saat keran terbuka setengah. Berturut-turut selama waktu 6, 9, dan 12 menit adalah (0,516, 1,579, dan 3,321)%.
- Daya uap tertinggi yang dihasilkan terdapat pada variasi pipa api berdiameter 15 mm saat keran terbuka setengah. Berturut-turut selama waktu (6, 9, dan 12)menit daya uap yang dihasilkan adalah (5,26, 30, 78,9)Watt.
- Efisiensi tertinggi terdapat pada variasi pipa api berdiameter 15 mm saat keran terbuka setengah. Berturut-turut pada selama waktu (6, 9, dan 12)menit adalah (5,16, 18,41, 41,47)Watt.

4. Mengurangi efek fouling dengan instalasi soot blower

4.1 Fouling

Menurut Babji et al. (2017), Fouling merupakan menempelnya dan menumpuknya abu pada dinding pernghantar panas yang dipasang pada bagian belakang furnace. Fouling dapat berupa organisme yang hidup dan tidak hidup. Hal ini dapat mengganggu performa boiler serta menurunkan efisiensi. Fouling dapat menimbulkan masalah seperti masalah penghantar panas, penurunan efisiensi boiler, serta kerusakan pada pipa.

4.2 Soot blower

Dalam upaya untuk melakukan pembersihan pada boiler tanpa melakukan

pemhatian pada boiler, dipasangkanlah soot blower pada boiler tersebut. Dengan pemasangan soot blower, kehilangan panas akibat fouling dapat dikurangi dan meningkatkan performa boiler. Soot blower merupakan alat pembersih yang dipasang sekaligus alat pendukung. Soot blower juga berfungsi untuk membantu mempertahankan efisiensi boiler. Soot blower yang dimodifikasi akan menutupi 0,9 m² area pada pemasangan. Hal ini juga mengurangi erosi tabung yang biasanya terjadi pada soot blower (Babji et al. 2017).

5. Pengaruh kualitas batu bara terhadap tingkat efisiensi boiler

Batubara adalah batuan berupa sedimen organik bahan bakar hidrokarbon padat yang terbentuk dari tumbuh-tumbuhan yang telah mengalami pembusukan secara biokimia, kimia, dan fisika dalam kondisi bebas oksigen yang berlangsung pada tekanan serta temperatur tertentu pada kurun waktu yang sangat lama. Batu bara dijadikan salah satu sumber bahan bakar terbesar bagi boiler pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Kualitas batubara memiliki tingkatan yang mengikuti harga jualnya.

Menurut Supriyanto et al. (2021), melakukan blending coal atau pencampuran batubara antara kualitas tinggi, medium, dan rendah dapat menurunkan biaya untuk bahan bakar boiler. Dengan melakukan pendekatan ini, akan ditemukan titik tengah antara efisiensi biaya pengeluaran dengan efisiensi output boiler dan PLTU.

6. Penerapan water-in-oil emulsion pada bahan bakar boiler untuk mengurangi emisi NO_x

6.1 Efisiensi bahan bakar

Efisiensi bahan bakar, dalam arti dasar, adalah sama dengan efisiensi termal, berarti efisiensi proses yang mengubah energi potensial kimia yang terkandung dalam bahan bakar pembawa ke energi kinetik atau bekerja. Sedangkan emisi merupakan zat-zat pembuangan yang beracun dan dapat membahayakan makhluk hidup serta mencemari lingkungan.

6.2 HFO emulsion

Menurut Hsuan et al. (2019), sistem eksperimental untuk mengamati karakteristik *drop vaporization* dan *microexplosion* dari droplet teremulsi di lingkungan bersuhu tinggi

dilakukan untuk menganalisis pengaruh suhu lingkungan, ukuran droplet, dan kadar air terhadap perilaku droplet yang telah teremulsi.

Dengan menggunakan HFO teremulsi dengan volume kadar air 20%, efisiensi boiler dapat ditingkatkan sebesar 2%, dan pengurangan emisi NO_x sebesar 35 ppm (sesuai dengan tingkat pengurangan NO_x sebesar 18%) tercapai. Keuntungan ini adalah karena terjadinya ledakan mikro selama pembakaran tetesan emulsi. Pengurangan 19/jam dalam tingkat konsumsi bahan bakar (HFO) dicapai saat menggunakan emulsi air dalam minyak, sesuai dengan penghematan bahan bakar sebesar 7% (Hsuan et al. 2019).

KESIMPULAN

Boiler telah digunakan secara luas sebagai alat penghasil uap bertekanan di banyak sektor industri. Tidak hanya secara nasional, boiler juga digunakan secara luas di lingkungan internasional. Sebagian besar konsumsi energi di dunia, terutama energi listrik (pasokan), disadari merupakan hasil dari sistem operasi boiler. Namun, kebanyakan industri yang menggunakan boiler sebagai penghasil uap, menyatakan bahwa sistem boiler tetap menjadi komponen yang memiliki nilai *energy/exergy destruction* yang paling besar jika dibandingkan dengan komponen yang lain. Maka dari itu, untuk mengevaluasi tingkat efisiensi boiler dan sejumlah energi yang terbuang sia-sia, peneliti telah melakukan analisis melalui sejumlah sumber terkait.

Dari hasil analisis yang terdapat pada artikel ini, peneliti menyimpulkan beberapa faktor yang diyakini dapat meningkatkan efisiensi guna menghemat energi dari bahan bakar dan mengurangi emisi gas buang. Faktor tersebut dibagi menjadi dua, yaitu faktor instalasi pendukung dan faktor bahan bakar.

Hal yang dapat disimpulkan untuk meningkatkan efisiensi boiler antara lain :

1. Instalasi Flash tank untuk pemulihan energi akibat blowdown dapat meningkatkan efisiensi energi sistem sebesar 1% (persen), meningkatkan daya keluaran *power plant* (total) sebesar 0,72%, dan menghemat total 25.444,47 m³ *feedwater* setiap tahunnya.
2. Pemanfaatan heat-losses dari emisi gas buang menggunakan air pre-heaters. Kalor

bepindah secara langsung dari panas gas buang (*flue gas*) ke udara yang melintas pada permukaan penukar kalor, yang berbentuk tabung. Dengan demikian, hal ini dapat menyerap sejumlah panas pada *flue gas* sehingga dapat mengurangi emisi gas buang.

3. Modifikasi atau kontrol variasi ukuran diameter pipa api (*fire tube*) dapat meningkatkan daya uap keluaran boiler dan efisiensi boiler. Pada jurnal yang diacu, pipa api dengan diameter 15 mm merupakan ukuran yang paling ideal dan dapat menghasilkan daya uap terbesar dan efisiensi tertinggi pada boiler.
4. Instalasi *Soot blower* yang digunakan untuk pembersihan boiler tanpa melakukan pematian mesin utama sehingga dapat mengurangi efek *fouling* dan mengurangi erosi tabung-tabung pada boiler.
5. Memodifikasi spesifikasi dari bahan bakar boiler dengan melakukan *blending coal* atau pencampuran batubara berkualitas tinggi, medium, dan rendah. Dengan melakukan hal tersebut akan ditemukan formula dari komposisi bahan bakar yang sesuai, sehingga dapat menekan biaya penggunaan bahan bakar
6. Penerapan water-in-oil emulsion pada bahan bakar boiler dapat dilakukan dengan mengemulsi bahan bakar boiler dengan kadar air dan minyak pada presentase tertentu. Hal ini dapat menurunkan nilai konsumsi HFO. Dari analisis yang dilakukan, dengan menggunakan 20% kadar air pada proses emulsi, dapat menghemat energi (bahan bakar) sebesar 7% (persen)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dana dari Kementerian Pendidikan dengan hibah Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi (PTUPT) dengan nomor kontrak 132/E5/PG.02.00.PT/2022.

DAFTAR PUSTAKA

Aljundi, I. H. J. A. t. e. (2009). Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *29*(2-3), 324-328.

- Bakirov, F., & Ibragimov, E. (2021). *Efficiency of Installation of an Additional Gas-Air Heat Exchanger When Operating a Steam Boiler on Gas and Liquid Fuel*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Barma, M., Saidur, R., Rahman, S., Allouhi, A., Akash, B., Sait, S. M. J. R., & Reviews, S. E. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *79*, 970-983.
- Byers, L., Friedrich, J., Hennig, R., Kressig, A., Li, X., McCormick, C., & Valeri, L. M. J. W. R. I., Washington, DC, available at: <https://www.wri.org/publication/global-database-power-plants>. (2019). A global database of power plants.
- Durkin, T. H. J. A. J. (2006). Boiler System Efficiency. *48*(7), 51-57.
- Fadli, M. V. J. P. o. E., & Science, L. (2021). The Effect of Mini Boiler Fire Pipe Diameter Variations on Steam Power and Efficiency. *1*(1).
- Fang, J., Li, G., Aunan, K., Vennemo, H., Seip, H. M., Oye, K. A., & Beér, J. M. J. A. e. (2002). A proposed industrial-boiler efficiency program in Shanxi: potential CO₂-mitigation, health benefits and associated costs. *71*(4), 275-285.
- Hsuan, C.-Y., Hou, S.-S., Wang, Y.-L., & Lin, T.-H. J. E. (2019). Water-In-Oil emulsion as boiler fuel for Reduced NO_x emissions and improved energy saving. *12*(6), 1002.
- Junga, R., Pospolita, J., Niemiec, P., & Dudek, M. J. J. o. t. E. I. (2019). The assessment of the fuel additive impact on moving grate boiler efficiency. *92*(6), 1807-1820.
- Karaeng, C. T., Iswandi, I., Firman, F., & Nuzul, M. J. J. T. M. S. (2019). Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa. *11*(1), 74-85.
- Kong, L., Hasanbeigi, A., & Price, L. J. J. o. C. P. (2016). Assessment of emerging energy-efficiency technologies for the pulp and paper industry: a technical review. *122*, 5-28.
- Lekshmi, K. R., & Jose, V. Enhancing the Efficiency of an Industrial Steam Boiler by Optimizing Air Preheaters.
- Li, Y.-Y., Hou, S.-S., & Sheu, W.-J. J. F. (2014). Investigation on boiler efficiency and pollutant emissions of water/heavy oil emulsions using edge-tone resonant homogenizer. *119*, 240-251.

- Lv, T., Yu, L., & Song, J. J. E. P. (2012). A research of simplified method in boiler efficiency test. *17*, 1007-1013.
- Lyubov, V., Popov, A., Popova, E., & Belesov, A. (2021). *Energy producing effectiveness study: larch and poplar chips, wood pellets*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Ngoc, H. D., Xuan, L. H., Minh, T. N., Quoc, D. N. H., Quang, H. N., Nguyen, H. T., & Snasel, V. (2014). Optimizing Boiler Efficiency by Data Mining Teciques: A Case Study.
- Pamungkas, I., Irawan, H. T., Pandria, T. A. J. V. V. E., & Journal, T. (2021). Implementasi Preventive Maintenance untuk Meningkatkan Keandalan pada Komponen Kritis Boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *2(2)*, 73-79.
- Pamungkas, I., & Irawan, H. T. J. J. O. (2020). Strategi Pengurangan Risiko Kerusakan Pada Komponen Kritis Boiler di Industri Pembangkit Listrik. *6(1)*, 86-95.
- Saidur, R., Ahamed, J. U., & Masjuki, H. H. J. E. p. (2010). Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *38(5)*, 2188-2197.
- Shah, S., & Adhyaru, D. (2011). *Boiler efficiency analysis using direct method*. Paper presented at the 2011 Nirma university international conference on engineering.
- Song, Z., & Kusiak, A. J. I. T. o. I. I. (2007). Constraint-based control of boiler efficiency: A data-mining approach. *3(1)*, 73-83.
- St Bahrudin, I., & Xiv, T. C. A. (2014). Peningkatan efisiensi boiler dengan menggunakan economizer.
- Suntivarakorn, R., & Treedet, W. J. E. P. (2016). Improvement of boiler's efficiency using heat recovery and automatic combustion control system. *100*, 193-197.
- Supriyanto, E., Cahyo, N., Sitanggang, R., Triani, M., & Bakti, D. (2021). *Performance and boiler efficiency using low-grade coal on 400 MWe coal-fired power plant: case study of Suralaya Power Plant Unit 2*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- Syahputra, Y. A. (2018). Analisa Water tube boiler menggunakan thermocouple tipe k pt 100 sebagai sensor temperature dan defferential pressure dalam proses efesiensi bahan bakar.
- Trajanovski, G. (2000). Boiler efficiency increase by building-in the additional heating surfaces (heat utilizer).
- Velukumar, V., Sathishkumar, R., Dinesh, S., Dineshkumar, S., & Dinesh, A. J. E. r. (2019). Improving the performance of boiler by reducing heat loss using soot blower. *2(1)*, 57-61.
- YIN, L., Byers, L., Valeri, L. M., & Friedrich, J. (2020). Estimating Power Plant Generation in the Global Power Plant Database.
- Zhou, J., Deng, S., Turner, W., Claridge, D., & Haberl, J. (2002). Improving boiler efficiency modeling based on ambient air temperature.

PENULIS:

Fayza Yulia

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Universitas Pertamina, Jakarta Selatan, 12220, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta, 12450, Indonesia
Email: fayza.yulia@universitaspertamina.ac.id

Gary Sinaga, Miftah Daris, Kato Ra'if, Zaky Dzar, Ibnu Tegar, Fikri Ashari, Fitri Wahyuni

Department of Mechanical Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta, 12450, Indonesia
Email: garygeraldussinaga@gmail.com

Reda Rizal

Department of Industrial Engineering, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Jakarta, 12450, Indonesia