

## Studi Kasus Proyek *Co-Benefit* Peningkatan Efisiensi Boiler Batubara di Industri Kertas

Syamsudin<sup>1\*</sup>, Katsushige Takami<sup>2</sup>, Shoji Kita<sup>2</sup>, Mukharomah Nur Aini<sup>1</sup>,  
Yusup Setiawan<sup>1</sup>, Reza Bastari Imran Wattimena<sup>1</sup>, Andri Taufick Rizaluddin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Balai Besar Pulp dan Kertas, Jl. Raya Dayeuhkolot No. 132, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Mitsubishi UFJ Research and Consulting Co., Ltd., Jepang

Diterima : 1 April 2020, Revisi akhir : 5 Juni 2020, Disetujui terbit : 30 Juni 2020

### *Case Study of Co-Benefit Project Improvement of Coal Boiler Efficiency in The Paper Industry*

#### **Abstract**

*Industrial rapid growth has caused greenhouse gas emissions problems. Co-benefit activities to improve the efficiency of coal boilers have been carried out in paper industry in the project of “Co-benefit Indonesia FY 2018” from the Japan Ministry of Environment aimed at identifying required steps to save energy and reduction of pollutant emission from the coal-fired industrial boilers and how to achieve it. Identification include analysis of boiler thermal efficiency, coal moisture content measurement, boiler feed water, blowdown water and condensate quality measurement, heat insulation examination, combustion air ratio management, and control of multiple boiler operations. Various heat losses have been analyzed and some recommendations have been proposed to be implemented by factory management to improve boiler efficiency. There are several issues that need to be addressed for energy conservation, namely: high water content coal utilization, high combustion air ratio, high conductivity feed water which causes high blowdown ratios, no insulation on relatively old production machines, and operational of several low efficiency boilers. The results of the co-benefit identification indicated that the potential for corrective action by adjusting the coal water content, improving the combustion air ratio, optimizing the blowdown ratio, recovering condensate water, installing insulation, and controlling multiple boilers theoretically can result coal consumption reduction of 16,445 tons/year or 48.63%, and CO<sub>2</sub> reduction of 19,589 tCO<sub>2</sub>/year with an estimated cost savings of Rp 12 billion/year.*

*Keywords: co-benefit, paper industry, boiler, coal, emission*

#### **Abstrak**

Pertumbuhan industri yang pesat menyebabkan masalah emisi gas rumah kaca. Kegiatan *co-benefit* peningkatan efisiensi boiler batubara telah dilakukan di industri kertas dalam proyek “*Co-benefit* Indonesia Tahun 2018” dari Kementerian Lingkungan Hidup Jepang dengan tujuan melakukan identifikasi langkah-langkah yang terkait dengan konservasi energi dan penurunan polutan emisi boiler industri berbahan bakar batubara dan cara melakukannya. Identifikasi meliputi analisis efisiensi termal boiler, pengukuran kadar air batubara, pengukuran kualitas air umpan boiler, air *blowdown*, dan kondensat, pemeriksaan insulasi panas, pengaturan rasio udara pembakaran, dan pengendalian operasi multi boiler. Berbagai kehilangan panas dianalisis dan beberapa rekomendasi diberikan untuk implementasi di pabrik sehingga efisiensi boiler dapat ditingkatkan. Beberapa masalah yang perlu diperbaiki untuk konservasi energi meliputi penggunaan batubara dengan kadar air tinggi, rasio udara pembakaran tinggi, konduktivitas air umpan tinggi menyebabkan rasio *blowdown* tinggi, tidak dilakukan insulasi pada mesin produksi yang relatif tua, dan pengoperasian beberapa boiler dengan efisiensi rendah. Potensi perbaikan melalui penyesuaian kadar air batubara, perbaikan rasio udara pembakaran, optimalisasi rasio *blowdown*, pemulihan air kondensat, pemasangan insulasi, dan kontrol multi boiler secara teori menghasilkan reduksi konsumsi batubara 16.445 ton/tahun atau 48,63%, dan reduksi CO<sub>2</sub> sebesar 19.589 tCO<sub>2</sub>/tahun dengan estimasi penghematan biaya Rp 12 milyar/tahun.

Kata kunci: *co-benefit*, industri kertas, boiler, batubara, emisi

## Pendahuluan

Sejalan dengan pertumbuhan industri yang semakin pesat, maka perlu adanya upaya penanganan penurunan pencemaran udara (Wang *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2015). Bertolak atas kondisi seperti ini, maka perlu promosi tindakan mereduksi gas rumah kaca dan pencemaran lingkungan dalam waktu yang bersamaan sebagai alat kebijakan penting berupa pendekatan *co-benefit*. Kementerian Lingkungan Hidup Jepang bekerjasama dengan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia telah melaksanakan proyek “Co-benefit Indonesia Tahun 2018” yang difokuskan pada boiler batubara di industri kertas. Pendekatan *co-benefit* dalam studi ini adalah penurunan gas efek rumah kaca (GRK) dan penurunan polutan emisi udara melalui perbaikan pengoperasian boiler yang berfokus pada konservasi energi (MUFG, 2019). Konsumsi bahan bakar fosil berhubungan langsung dengan emisi CO<sub>2</sub>. Peraturan perlindungan lingkungan berupaya mengurangi emisi CO<sub>2</sub> karena gas ini berkontribusi signifikan terhadap efek rumah kaca (Barma *et al.*, 2017). Tindakan konservasi energi untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> juga mengurangi polutan udara lain seperti SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> dan partikulat, membawa manfaat tambahan untuk kualitas udara (Yang and Teng, 2018). Pendekatan *co-benefit* dalam studi ini dapat menghasilkan tiga keluaran dalam waktu bersamaan karena penanggulangan yang dilakukan berkontribusi juga kepada penurunan biaya energi untuk industri.

Beberapa kontrol pembakaran dalam pengoperasian boiler batubara umumnya dilakukan secara otomatis untuk mendapatkan efisiensi pembakaran batubara, yaitu input batubara, laju alir udara pembakaran, konsentrasi oksigen dalam gas buang, tekanan *steam*, kualitas air umpan, dan laju dan kualitas air *blowdown* (MUFG, 2019). Berbagai kehilangan panas yang terjadi di dalam boiler dapat disebabkan antara lain oleh kehilangan panas karena karbon yang tidak terbakar, gas buang panas, kelembaban bahan bakar, uap air dari pembakaran hidrogen, pembentukan karbon monoksida, panas sensibel pada abu dasar, radiasi dan konveksi, dan *blowdown* (Gupta, Ghai and Jain, 2011). Identifikasi sumber utama pemborosan energi dan pemulihan energi yang terbuang diperlukan untuk menjalankan boiler

pada efisiensi maksimum. Peningkatan efisiensi boiler akan membantu menghemat sejumlah besar bahan bakar fosil dan mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, sehingga penting untuk memanfaatkan energi batubara secara efisien (Song *et al.*, 2015). Studi ini bertujuan melakukan identifikasi langkah-langkah konservasi energi dan pengurangan emisi boiler industri berbahan bakar batubara dan cara melakukannya.

## Metode

### Bahan

Bahan bakar yang digunakan boiler berupa batubara lignit. Karakteristik batubara ditampilkan dalam **Tabel 1**.

### Alat

Boiler yang menjadi objek identifikasi hemat energi ini adalah jenis boiler unggun terfluidakan media pasir yang menggunakan bahan bakar batubara yang memiliki kapasitas 20 ton/jam dan 15 ton/jam di sebuah industri kertas. Peralatan yang digunakan dalam kegiatan ini meliputi *flue gas analyzer* merk Testo, *conductivity meter* merk Sato Tech, *time lapse camera* merk Brinno, *thermography camera* merk FLIR, dan *thermochron type-SL* merk KN Laboratories.

**Tabel 1.** Karakteristik Batubara

Parameter		Nilai
Kadar air total (ar)	%	25,8
Kadar air (adb)	%	11,9
Abu (adb)	%	9,8
Zat terbang (adb)	%	41,9
Karbon padat (adb)	%	36,4
Sulfur (adb)	%	0,86
Karbon (adb)	%	54,43
Hidrogen (adb)	%	5,41
Nitrogen (adb)	%	1,07
Oksigen ( <i>by difference</i> ) (adb)	%	28,43
Gross calorific value (adb)	kcal/kg	5.232
Harga batubara (ar)	Rp/kg	730

Keterangan:

ar = *as received basis*

adb = *air dried basis*

## Metode Analisis

Pengukuran dilakukan terhadap kadar air batubara, konduktivitas air umpan boiler, konduktivitas air *blow down*, konduktivitas air *softener*, konduktivitas air kondensat, suhu permukaan pipa *steam*, suhu permukaan saluran gas buang, suhu ruangan mesin kertas, dan emisi gas buang di cerobong boiler. Parameter yang diamati meliputi pengaruh kadar air batubara, rasio udara pembakaran, rasio *blowdown*, sistem pemulihan kondensat, sistem insulasi, dan kontrol multi boiler terhadap reduksi konsumsi batubara, reduksi CO<sub>2</sub>, dan reduksi biaya.

Efisiensi termal boiler ( $\eta_{\text{boiler}}$ ) dihitung menggunakan metode langsung atau *input-output method* (Tirumala Srinivas, 2017), yaitu:

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{F_S \times (\Delta H_S - \Delta H_{fw})}{F_C \times \text{HHV}_C} \times 100\% \dots (1)$$

- $F_S$  = laju produksi steam (ton/tahun)
- $\Delta H_S$  = entalpi spesifik *steam* (kcal/kg)
- $\Delta H_{fw}$  = entalpi spesifik air umpan (kcal/kg)
- $F_C$  = laju konsumsi batubara (ton/tahun)
- $\text{HHV}_C$  = nilai kalor batubara (kcal/kg)

Nilai kalor tinggi (HHV) dikoreksi terhadap kadar air (MUFG, 2019):

$$\text{HHV}_b = \frac{100 - b}{100 - a} \times \text{HHV}_a \dots (2)$$

dengan:

- $\text{HHV}_a$  = HHV batubara dengan kadar air a% (kcal/kg)
- $\text{HHV}_b$  = HHV batubara dengan kadar air b% (kcal/kg).

Nilai kalor rendah (LHV) ditentukan dengan mengurangi panas penguapan uap air dari nilai kalor tinggi (HHV) (Mahapatra, 2016). Hubungan HHV dan LHV dihitung menggunakan:

$$\text{LHV}_a = \text{HHV}_a - (\lambda_{\text{H}_2\text{O}} \times w_{\text{H}_2\text{O}}) \dots (3)$$

dengan:

- $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$  = panas laten air (kcal/kg)
- $w_{\text{H}_2\text{O}}$  = kandungan air (kg/kg).

Rasio udara pembakaran ( $R_U$ ) dihitung menggunakan:

$$R_U = \frac{21}{21 - O_2} \dots (4)$$

dengan:

- $O_2$  = konsentrasi oksigen dalam gas buang (%).

Volume teoritis udara pembakaran ( $V_{\text{teoritis}}$ ) (MUFG, 2019):

$$V_{\text{teoritis}} = 8,89 \cdot \frac{C}{100} + 26,7 \cdot \left( \frac{H - O/8}{100} \right) + 3,33 \cdot \frac{S}{100} \dots (5)$$

dengan:

- $V_{\text{teoritis}}$  = volume teoritis udara pembakaran (Nm<sup>3</sup>/kg)
- $C$  = kadar karbon (%adb)
- $H$  = kadar hidrogen (%adb)
- $O$  = kadar oksigen (%adb)
- $S$  = kadar sulfur (%adb).

Volume aktual udara pembakaran ( $V_{\text{aktual}}$ ) (MUFG, 2019):

$$V_{\text{aktual}} = V_{\text{teoritis}} \times R_U \dots (6)$$

Volume udara berlebih ( $V_{\text{excess}}$ ):

$$V_{\text{excess}} = V_{\text{aktual}} - V_{\text{teoritis}} \dots (7)$$

Rugi-rugi panas gas buang ( $Q_{\text{loss,FG}}$ ):

$$Q_{\text{loss,FG}} = [0,307 \cdot (T_{FG} - T_U) + 2,92 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{FG}^2 - T_U^2)] \times V_{\text{excess}} \dots (8)$$

dengan:

- $Q_{\text{loss,FG}}$  = rugi-rugi panas gas buang (kcal/kg)
- $T_{FG}$  = suhu gas buang (°C)
- $T_U$  = suhu udara atmosferik (°C).

Rasio rugi-rugi panas (%) dinyatakan dengan:

$$R_{\text{loss}} = \frac{Q_{\text{loss}}}{F_C \times \text{HHV}_C} \times 100\% \dots (9)$$

- $R_{\text{loss}}$  = rasio rugi-rugi panas (%)
- $Q_{\text{loss}}$  = rugi-rugi panas (kcal/jam).

Rasio *blowdown* ( $R_B$ ) dihitung menggunakan (MUFG, 2019):

$$R_B = \frac{EC_{fw}}{EC_b} \times 100\% = \frac{L_B}{L_S} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

dengan:

- $R_B$  = rasio *blowdown*
- $EC_b$  = konduktivitas air *blowdown* ( $\mu S$ )
- $EC_{fw}$  = konduktivitas air umpan ( $\mu S$ )
- $L_B$  = laju *blowdown* (ton/jam)
- $L_S$  = laju produksi steam (ton/jam).

Pemulihan air kondensat (CW) dihitung menggunakan (MUFG, 2019):

$$CW = \frac{EC_s - EC_{fw}}{EC_s - EC_c} \times 100\% \dots\dots\dots(11)$$

dengan:

- CW = pemulihan air kondensat (%)
- $EC_s$  = konduktivitas air *softner* ( $\mu S$ )
- $EC_c$  = konduktivitas air kondensat ( $\mu S$ ).

Faktor beban boiler (LF) dihitung menggunakan:

$$LF = \frac{F_{S,actual}}{F_{S,design}} \times 100\% \dots\dots\dots(12)$$

dengan:

- $F_{S,actual}$  = laju produksi *steam* aktual (ton/jam)
- $F_{S,design}$  = kapasitas boiler sesuai desain (ton/jam).

Reduksi batubara tahunan ( $A_{CR}$ ), Rasio reduksi batubara ( $R_{RB}$ ), dan Reduksi biaya ( $R_{Rp}$ ) dihitung menggunakan:

$$A_{CR} = A_{CC1} - A_{CC2} \dots\dots\dots(13)$$

$$R_{RB} = \frac{A_{CR}}{A_{CC1}} \dots\dots\dots(14)$$

$$R_{Rp} = A_{CR} \times C_{Rp} \dots\dots\dots(15)$$

dengan:

- $A_{CR}$  = reduksi batubara tahunan (ton/tahun)
- $R_{RB}$  = rasio reduksi batubara
- $R_{Rp}$  = reduksi biaya tahunan (Rp/tahun)
- $A_{CC1}$  = konsumsi batubara tahunan sebelum perbaikan (ton/tahun)
- $A_{CC2}$  = konsumsi batubara tahunan setelah perbaikan (ton/tahun)
- $C_{Rp}$  = harga batubara (Rp/kg).

Reduksi  $CO_2$  (Reduksi $_{CO_2}$ ) dihitung menggunakan:

$$\text{Reduksi}_{CO_2} = A_{CR} \times EF \dots\dots\dots(16)$$

dengan:

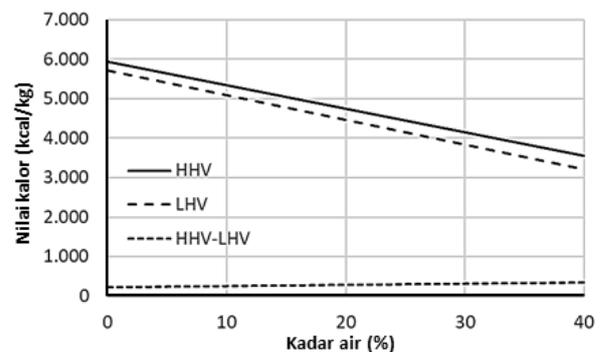
EF = faktor emisi  $CO_2$  (t $CO_2$ /t).

### Hasil dan Pembahasan

Beberapa temuan penting pada saat dilakukan identifikasi *co-benefit* antara lain penggunaan batubara dengan kadar air tinggi, rasio udara pembakaran tinggi, konduktivitas air umpan dari air sungai tinggi menyebabkan rasio *blowdown* tinggi, tidak dilakukan insulasi pada mesin produksi yang relatif tua, dan pengoperasian beberapa boiler dengan efisiensi rendah. Efisiensi termal boiler sekitar 66,2% (berdasarkan nilai HHV batubara), lebih rendah dari kondisi normal yaitu 81-85% (Barma *et al.*, 2017). Berdasarkan hasil perhitungan, konsumsi energi spesifik sebesar 4,32 ton *steam*/ton produk atau 11,2 GJ/ton produk dengan faktor penguapan 4,88 ton *steam*/ton batubara untuk produksi kertas rokok. Konsumsi energi spesifik dipengaruhi oleh jenis kertas yang diproduksi.

### Pengaruh Kadar Air Batubara

Nilai ukur aktual kadar air batubara pada saat diagnosa adalah 25,8% dengan nilai kalor 4.101 kcal/kg dan konsumsi 33.802 ton/tahun. Kadar air batubara biasanya berkisar antara 8 hingga 25% berat, sedangkan untuk lignit, kadar air bisa mencapai hingga 66% berat (Xu *et al.*, 2016). Hubungan antara kadar air dan nilai kalor batubara pada pengukuran ini ditampilkan pada **Gambar 1**.

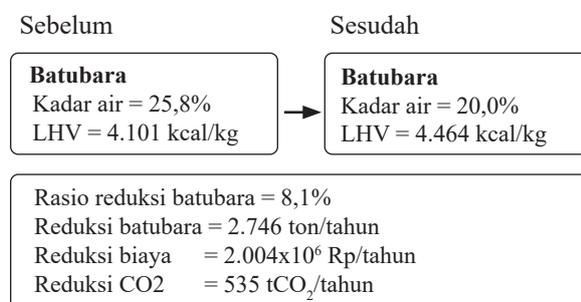


**Gambar 1.** Hubungan antara Kadar Air dan Nilai Kalor Batubara

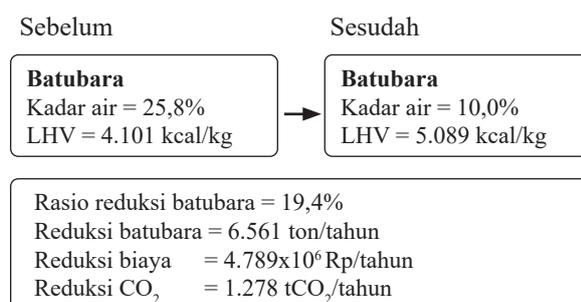
Semakin tinggi kadar air maka semakin rendah nilai kalor batubara karena semakin banyak panas yang dibutuhkan untuk menguapkan air. Selama pembakaran, air yang ada di dalam batubara mengkonsumsi panas sensible dan panas laten untuk menjadi uap panas. Panas yang terserap uap panas ini ikut terbuang bersama dengan gas buang (Liu *et al.*, 2015). Jumlah panas yang diambil oleh uap air berbanding lurus dengan jumlah air yang ada dalam batubara. Efek penurunan kadar air batubara disimulasikan dengan perbandingan kasus bila dilakukan penurunan kadar air dari 25,8% menjadi 20% (**Gambar 2**) dan 10% (**Gambar 3**).

Penurunan kadar air menghasilkan reduksi konsumsi batubara dan berdampak pada penurunan biaya dan emisi CO<sub>2</sub>. Penurunan kadar air dari 25,8% menjadi 10% menghasilkan reduksi lebih tinggi dibandingkan penurunan kadar air menjadi 20%. Semakin rendah kadar air batubara, maka jumlah panas yang dapat digunakan untuk pembangkit *steam* di boiler menjadi bertambah sehingga efisiensi boiler menjadi naik.

Saat ini, proses pengeringan batubara telah diterapkan secara luas dalam aplikasi batubara lignit untuk pembangkit listrik, seperti pengeringan



**Gambar 2.** Kasus bila Kadar Air Batubara diturunkan dari 25,8% menjadi 20%



**Gambar 3.** Kasus bila Kadar Air Batubara diturunkan dari 25,8% menjadi 10%.

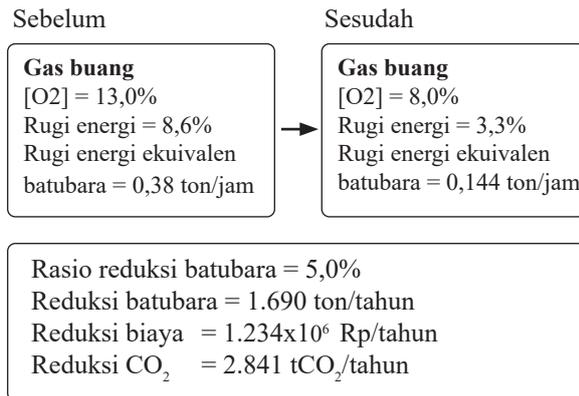
menggunakan unggun terfluidakan dengan memanfaatkan panas sisa, gas pembakaran, dan *steam* lewat panas (Xu *et al.*, 2016). Pengurangan kadar air batubara yang lebih ekonomis dan lebih mudah dapat dilakukan dengan cara diangin-anginkan di tempat penyimpanan dalam jangka waktu tertentu. Metode ini sangat tergantung pada kelembaban udara di tempat penyimpanan. Pembelian batubara pada kondisi sudah dihancurkan dapat menurunkan nilai kalor karena meningkatnya kadar air pada waktu penyimpanan dan proses transportasi. Sebaiknya batubara dihancurkan di lokasi pabrik sebelum digunakan untuk menyamakan kadar air dan ukuran partikel batubara.

### Perbaikan Rasio Udara Pembakaran

Pada pembakaran batubara dengan boiler tipe *traveling grate*, umumnya memerlukan kelebihan udara 30%-60% dan konsentrasi oksigen pada gas buang sebesar 5%-8%. Hasil pengukuran menunjukkan boiler beroperasi pada rasio udara 2,63 dan konsentrasi oksigen pada gas buang rata-rata 13%. Suhu gas buang pada saat pengukuran adalah 195°C. Pada keadaan ini terlihat jelas pengoperasian boiler tidak efisien. Udara yang berlebih merupakan salah satu penyebab hilangnya energi pada boiler, karena dapat menurunkan suhu pembakaran, meningkatkan jumlah gas buang yang dihasilkan, dan memperbesar panas yang hilang. Oleh karena itu, optimalisasi udara berlebih dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi boiler dan dapat menurunkan emisi gas buang (Ibrahim and Farrukh, 2019). Pada simulasi efek perbaikan konsentrasi oksigen dari 13% menjadi 8%, dihasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 5,0% dan 2.841 tCO<sub>2</sub>/tahun (**Gambar 4**).

Alat analisis oksigen *online* atau sistem *trim* oksigen perlu dipasang untuk kontrol yang tepat pada kelebihan udara dan kandungan oksigen dalam gas buang. Pengaturan rasio udara pembakaran dapat diatur menggunakan VSD (*variable speed drive*) (Saidur, Ahamed and Masjuki, 2010). VSD digunakan pada motor kipas untuk mengubah rasio udara pembakaran (Barma *et al.*, 2017).

Selain konsentrasi oksigen, suhu gas buang juga mempengaruhi besarnya panas yang hilang yang berefek pada penurunan efisiensi boiler. Semakin tinggi suhu gas buang maka semakin besar panas yang hilang, berarti semakin rendah



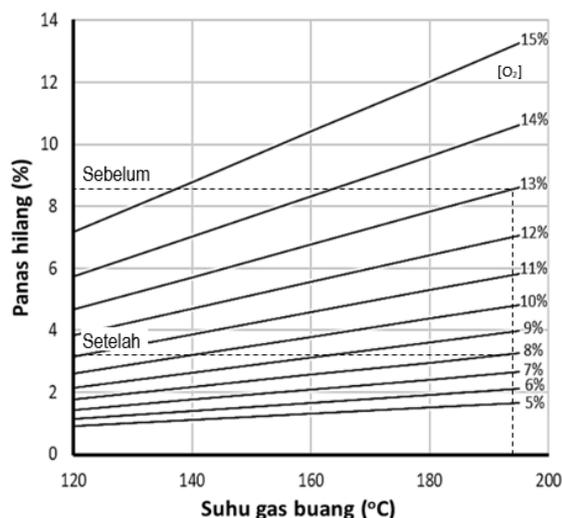
**Gambar 4.** Kasus bila Konsentrasi Oksigen Gas buang diturunkan dari 13,3% menjadi 8,0%

efisiensi termal boiler. Panas terbuang melalui gas buang merupakan sumber kehilangan panas tertinggi dalam sistem boiler. Pemulihan panas dari gas buang suhu tinggi dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan (Barma *et al.*, 2017).

Tergantung pada suhu gas buang dan konsentrasi oksigen, efek penurunan rugi-rugi panas gas buang dapat diperkirakan dengan membaca **Gambar 5**. Pada saat suhu gas buang 195°C dan konsentrasi oksigen diturunkan dari 13% menjadi 8%, maka terjadi penurunan rugi-rugi panas gas buang dari 8,6% menjadi 3,3%.

### Optimalisasi Rasio *Blowdown*

Boiler harus menghasilkan *steam* berkualitas baik dengan stabil dan memasok *steam*



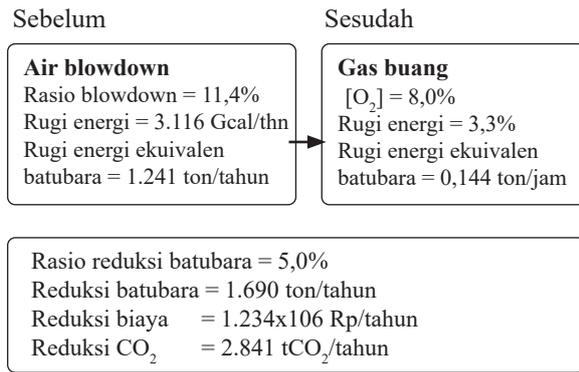
**Gambar 5.** Pengaruh Konsentrasi O<sub>2</sub> dan Suhu Gas Buang terhadap Panas Hilang

tersebut secara terus menerus ke mesin kertas yang menggunakan *steam*. Air umpan boiler mengandung berbagai macam ion seperti kalsium, magnesium dan sebagainya. Jika konsentrasinya tinggi dapat menimbulkan kerak di permukaan dalam pipa dan dapat menurunkan konduktivitas panas pada pipa-pipa alat penukar panas. Untuk alasan ini, air panas di dalam boiler perlu dikuras (*blowdown*) untuk menjaga konsentrasi ion di dalam air boiler. Jumlah air yang dibuang ini tergantung dari kualitas air yang digunakan boiler. Jika kualitas air baik maka jumlah pembuangan sedikit, namun jika kualitas air jelek maka jumlah pembuangan akan menjadi banyak sehingga jumlah panas yang dibuang bertambah dan membuat efisiensi produksi *steam* menurun. Kualitas air umpan boiler dapat dievaluasi dari kandungan garam, silika dan sebagainya, tapi dapat juga dievaluasi melalui konduktivitas listrik sebagai salah satu indikator. Jika dilihat dari tingkat konduktivitas listrik, terdapat kasus di mana rasio *blowdown* lebih dari 5%. Dari hasil analisis, konduktivitas air umpan boiler mencapai 217-272  $\mu$ S dan konduktivitas air *blowdown* mencapai 2.770-4.840  $\mu$ S (**Tabel 2**). Untuk kasus ini, pengoperasian sistem *blowdown* pada boiler menjadi masalah yang perlu diperbaiki. Air *blowdown* memiliki suhu tinggi seperti *steam* yang dihasilkan boiler sehingga jika jumlah *blowdown* besar, maka efisiensi boiler akan menurun. Rugi-rugi panas *blowdown* pada umumnya sekitar 1-3% dari konsumsi bahan bakar (Barma *et al.*, 2017).

Hasil pengukuran selama dua bulan menunjukkan rasio *blowdown* rata-rata sekitar 11,4% dengan pengoperasian secara manual. Rasio *blowdown* ini diukur berdasarkan laju *blowdown* dan laju *steam* yang diproduksi. Normalnya, pada boiler dengan pemulihan kondensat mencapai  $\geq 80\%$  akan menghasilkan rasio *blowdown* sekitar 1,0%. Evaluasi perbaikan

**Tabel 2.** Konduktivitas Air *Softener*, Air Umpan, dan Air Kondensat

Sampling point	Konduktivitas [ $\mu$ S]	
	Pengukuran 1	Pengukuran 2
Air <i>softener</i>	578	518
Air umpan	272	217
Air <i>blowdown</i>	4.840	2.770
Air kondensat	17	8



**Gambar 6.** Kasus bila Laju *Blowdown* diturunkan dari 11,4% menjadi 1,0%.

dilakukan dengan menurunkan rasio *blowdown* hingga 1,0%. Hasilnya adalah sebagaimana ditampilkan dalam **Gambar 6**.

Penurunan rasio *blowdown* dapat dilakukan dengan pemasangan sistem kontrol *blowdown* otomatis dan perbaikan kualitas air umpan boiler. Sistem *blowdown* otomatis dapat dipasang untuk mengontrol laju *blowdown*, terdiri dari pemantauan konduktivitas secara terus-menerus, dan sistem *blowdown* otomatis pada level konduktivitas tertentu. Sistem otomatis ini dapat menghemat energi yang terbuang pada sistem *blowdown* manual.

Besarnya rasio *blowdown* dapat disebabkan oleh adanya pencemaran pada sumber air yang digunakan untuk bahan baku air industri. Supaya dapat digunakan sebagai air umpan boiler, maka perlu dilakukan perbaikan kualitas dengan cara membuang senyawa ionik yang merupakan sumber pencemaran air. Meskipun metode resin penukar ion untuk produksi air murni untuk boiler banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir, metode membran reverse osmosis cenderung mulai dipilih karena metode resin penukar ion menggunakan bahan kimia berbahaya untuk regenerasi resin digunakan. Pada pengoperasian membran reverse osmosis dengan kapasitas produksi air murni sebesar 14,4 m<sup>3</sup>/jam (berdasarkan kebutuhan air umpan boiler) membutuhkan investasi Rp 3 milyar dengan waktu pengembalian modal selama 12,3 tahun (**Tabel 3**).

### Pemulihan Air Kondensat

Rasio pemulihan air kondensat rata-rata selama beberapa kali pengukuran berdasarkan analisis konduktivitas air kondensat, air *softener* dan air umpan yaitu sebesar 43%. Selain memiliki

**Tabel 3.** Biaya Pengoperasian Membran *Reverse Osmosis*

1. Biaya peralatan <sup>a</sup> :		
▪ Unit pemurnian air	1.500x10 <sup>6</sup>	Rp
▪ Peralatan <i>pre-treatment</i>	1.500x10 <sup>6</sup>	Rp
2. Konsumsi listrik	90	kWh/tahun
3. Biaya perawatan <sup>b</sup>	500x10 <sup>6</sup>	Rp/tahun
<i>Payback period</i>	12,3	tahun

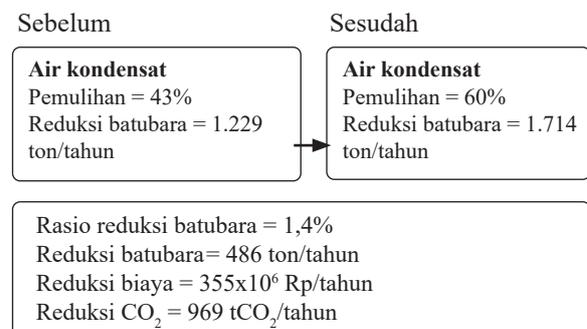
<sup>a</sup> Asumsi harga di Jepang;

<sup>b</sup> Perkiraan biaya di Jepang.

kandungan panas, kondensat pada dasarnya adalah air distilasi yang ideal untuk digunakan sebagai air umpan boiler. Sistem *steam* yang efisien akan mengumpulkan kondensat ini dan mengembalikannya ke deaerator, tangki umpan boiler, atau menggunakannya dalam proses lain. Kondensat tidak dikembalikan ke boiler hanya jika terjadi kontaminasi. Meskipun demikian, dimungkinkan untuk mengumpulkan kondensat dan menggunakannya sebagai air proses panas atau melewatkannya melalui penukar panas di mana kandungan panasnya dapat dimanfaatkan kembali.

Efek perbaikan dievaluasi dengan melakukan peningkatan rasio pemulihan air kondensat dari 43% menjadi 60%. Hasilnya ditampilkan dalam **Gambar 7**. Simulasi efek peningkatan rasio pemulihan air kondensat menghasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 1,4% dan 969 tCO<sub>2</sub>/tahun.

Penurunan konsumsi batubara ini karena terjadi peningkatan kandungan panas sebesar 1.682 Gcal/tahun yang dapat dimanfaatkan kembali. Selain itu, terjadi peningkatan jumlah air kondensat yang dapat digunakan kembali oleh



**Gambar 7.** Kasus bila Pemulihan Air Kondensat dinaikkan dari 43% menjadi 60%

boiler sebesar 28.038 ton/tahun, sehingga dapat mengurangi kebutuhan air *softener*.

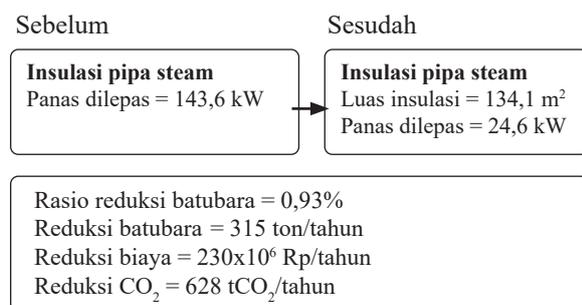
### Pemasangan Insulasi

Pengamatan menunjukkan beberapa permukaan boiler, pipa *steam*, pipa kondensat, saluran gas buang, dan ruangan mesin produksi tidak terinsulasi dengan baik. Semua insulasi yang rusak atau aus harus diperbaiki berdasarkan prioritas. Titik panas mengindikasikan terjadinya hilang panas yang berlebihan. Kehilangan panas terjadi karena radiasi, konveksi dan konduksi dari permukaan panas sistem boiler. Jumlah panas yang hilang tergantung pada suhu permukaan panas yang dipengaruhi oleh insulasi (ketebalan, konduktivitas termal, dan kondisi). Untuk meminimalkan kehilangan panas, permukaan panas harus ditutup dengan bahan insulasi yang memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap perpindahan panas (Gupta, Ghai and Jain, 2011).

### Insulasi Pipa Steam

Kondisi pipa *steam* saat ini (termasuk katup, dan lain-lain) dievaluasi jika diinsulasi dengan area target pipa seluas 134,1 m<sup>2</sup>. Luas permukaan katup, flensa, dan lain-lain dikoreksi dan dikonversi menjadi panjang pipa. Jumlah panas yang dikeluarkan dari perpipaan dihitung dari luas permukaan. Ketebalan dan konduktivitas termal dari bahan insulasi panas dihitung dengan nilai yang diasumsikan. Hasil perhitungan ditampilkan pada **Gambar 8**.

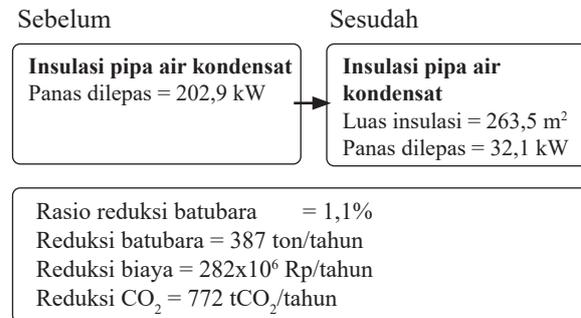
Simulasi efek pemasangan insulasi pipa *steam* menghasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 0,93% dan 628 tCO<sub>2</sub>/tahun. Reduksi batubara ini menggambarkan besarnya rugi-rugi panas yang dapat diturunkan dari pemasangan insulasi pada



**Gambar 8.** Kasus bila Pipa *Steam* diinsulasi dengan Luas Insulasi 134,1 m<sup>2</sup>

**Tabel 4.** Biaya Pemasangan Insulasi Perpipaan *Steam*

1. Material insulasi panas	26.821x10 <sup>3</sup> Rp.
2. Biaya tenaga kerja	18.000x10 <sup>3</sup> Rp.
<i>Payback period</i>	0,2 tahun



**Gambar 9.** Kasus bila Pipa Pemulihan Air Kondensat diinsulasi dengan Luas Insulasi 263,5 m<sup>2</sup>

sistem perpipaan *steam*. Pemasangan insulasi pada perpipaan *steam* membutuhkan investasi sebesar Rp 44,821 juta dengan waktu pengembalian modal selama 0,2 tahun (**Tabel 4**).

### Insulasi Pipa Pemulihan Air Kondensat

Kondisi pipa kondensat saat ini (termasuk perpipaan, tangki separator, dan lain-lain) dievaluasi jika diinsulasi dengan area target pipa pemulihan air kondensat seluas 263,5 m<sup>2</sup>. Hasil perhitungan ditampilkan pada **Gambar 9**.

Simulasi efek pemasangan insulasi pipa pemulihan air kondensat menghasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 1,1% dan 772 tCO<sub>2</sub>/tahun. Reduksi batubara ini menggambarkan besarnya rugi-rugi panas yang dapat diturunkan dari pemasangan insulasi pada sistem perpipaan pemulihan air kondensat. Pemasangan insulasi pada perpipaan pemulihan air kondensat membutuhkan investasi sebesar Rp 101 juta dengan waktu pengembalian modal selama 0,4 tahun (**Tabel 5**).

**Tabel 5.** Biaya Pemasangan Insulasi Perpipaan Kondensat

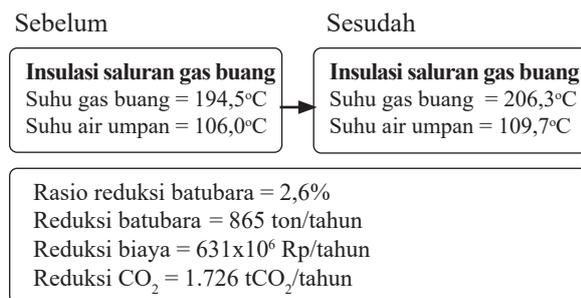
1. Material insulasi panas	83x10 <sup>6</sup> Rp
2. Biaya tenaga kerja	18x10 <sup>6</sup> Rp
<i>Payback period</i>	0,4 tahun

### Insulasi Saluran Gas Buang dan Pemanasan Udara Inlet Boiler

Suhu gas buang yang keluar dari boiler biasanya berkisar 150°C-250°C, sekitar 10%–30% energi panas hilang melalui proses tersebut (Barma et al., 2017). Pada suhu seperti itu, gas buang mengandung energi dalam jumlah besar dan menghasilkan efisiensi termal yang relatif rendah (Zaporozhets, 2019). Saat ini, panas dari gas buang digunakan untuk memanaskan air umpan melalui unit economizer dan gas buang diolah dengan mengoperasikan *bag filter*. Pengoperasian *bag filter* dilakukan dengan persyaratan suhu gas buang yang diolah tidak melebihi 150°C. Jika suhu gas buang naik, maka dilakukan proses untuk menurunkan suhu gas buang sehingga terjadi kehilangan panas. Disipasi panas dari saluran gas buang dapat dikontrol dan secara efisien dapat dimanfaatkan untuk pemanasan udara inlet boiler sehingga efisiensi termal boiler dapat ditingkatkan jika dilakukan insulasi saluran gas buang. Penelitian simulasi oleh Ibrahim and Farrukh (2019) menunjukkan pemasangan alat pemanas yang memanaskan campuran udara-bahan bakar sampai 93°C dapat meningkatkan efisiensi boiler sebesar 4%.

Evaluasi efek perbaikan bila dilakukan insulasi saluran gas buang dan panas gas buang digunakan untuk pemanasan udara inlet boiler ditampilkan dalam **Gambar 10**, sedangkan pemanfaatan panas gas buang untuk pemanasan udara inlet boiler ditampilkan dalam **Gambar 11**.

Pemasangan insulasi dapat menurunkan rugi-rugi panas saluran gas sebesar 73,6 Mcal/jam dan menaikkan suhu gas buang menjadi 206,3°C. Dampaknya, suhu air umpan keluar dari unit economizer dapat ditingkatkan menjadi 109,7°C. Gas buang keluar unit economizer pada suhu 141,7°C digunakan untuk



**Gambar 10.** Kasus bila Saluran Gas Buang dan Pemanasan Udara Inlet Boiler Diinsulasi



Sumber: Modifikasi gambar dari Laporan Diagnosis Co-benefit Tahun Fiskal 2018 (MUG, 2019)

**Gambar 11.** Insulasi Saluran Gas Buang dan Pemanfaatan Panas Gas Buang untuk Pemanasan Udara Inlet Boiler

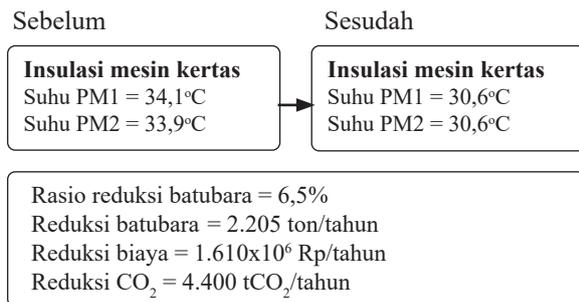
**Tabel 6.** Biaya Pemasangan Fasilitas Insulasi Saluran Gas Buang dan Pemanasan Udara Inlet Boiler

Biaya pemasangan fasilitas	2.000x10 <sup>6</sup>	Rp
Payback period	3,2	tahun

pemanasan awal udara inlet boiler dari 40°C menjadi 76,6°C. Total tambahan panas yang dimanfaatkan oleh unit economizer dan unit pemanasan udara yaitu sebesar 3.810 Gcal/tahun atau ekuivalen dengan batubara sebanyak 865 ton/tahun. Simulasi efek pemasangan insulasi saluran gas buang menghasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 2,6% dan 1.726 tCO<sub>2</sub>/tahun.

Pemasangan insulasi pada saluran gas buang dan pemanfaatan panas gas buang untuk pemanasan udara inlet boiler membutuhkan investasi sebesar Rp 2 milyar (asumsi) dengan waktu pengembalian modal selama 3,2 tahun (**Tabel 6**).

Pemulihan panas gas buang berpotensi menimbulkan korosi karena kondensasi asam. Belerang dalam batubara bereaksi dengan oksigen selama pembakaran membentuk belerang dioksida, yang bereaksi dengan uap air menghasilkan asam sulfat dalam gas buang. Kondensasi asam terjadi ketika gas buang didinginkan di bawah titik embun asam. Suhu gas buang harus dijaga di atas suhu titik embun asam untuk mencegah kondensasi asam. Jika tidak, sistem pemulihan panas harus dirancang tahan terhadap korosi asam. Jumlah kandungan asam dalam gas buang tergantung kandungan sulfur batubara. Oleh karena itu, suhu gas buang minimum yang diijinkan tergantung pada jenis batubara yang digunakan dalam boiler (Barma et al., 2017).



**Gambar 12.** Kasus bila Mesin-Mesin Kertas diinsulasi

**Insulasi Mesin Kertas**

Industri kertas ini memiliki tiga unit fasilitas mesin produksi, Dua unit diantaranya adalah mesin sudah tua dan insulasi tidak dilakukan secara menyeluruh hanya parsial pada bodi dan pipa-pipa *steam*. Simulasi pemasangan insulasi terhadap kedua mesin tersebut dapat menghasilkan reduksi konsumsi batubara sebagaimana ditampilkan dalam **Gambar 12**.

Penerapan langkah-langkah insulasi termal dapat mengurangi *steam* yang dikonsumsi akibat disipasi panas dari mesin, dan sebagai hasilnya, konsumsi batubara menjadi berkurang. Simulasi efek pemasangan insulasi mesin kertas menghasilkan reduksi batubara dan penurunan emisi, masing-masing sebesar 6,5% dan 4.400 tCO<sub>2</sub>/tahun. Konstruksi insulasi panas pada dua unit mesin kertas diasumsikan membutuhkan investasi Rp 10 milyar. Waktu yang diperlukan untuk pengembalian modal untuk investasi ini adalah 6 tahun (**Tabel 7**).

**Kontrol Optimum Multi Boiler**

**Tabel 8** menunjukkan data produksi *steam* dari boiler 15 ton/jam dan 20 ton/jam dalam lima hari. Faktor beban masing-masing boiler berkisar 48%-65%. Masing-masing boiler beroperasi secara mandiri.

Pengoperasian boiler menyebabkan kehilangan panas yang tetap, seperti panas radiasi dari

**Tabel 7.** Biaya Pemasangan Insulasi Dua Mesin Kertas

Biaya konstruksi insulasi panas	10.000x10 <sup>6</sup> Rp
Payback period	6 tahun

**Tabel 8.** Data Produksi *Steam* dalam Lima Hari

Periode	Produksi <i>Steam</i> and Faktor Beban (%)				
	15 ton/jam		20 ton/jam		Total
	<i>Steam</i> (t)	Faktor beban (%)	<i>Steam</i> (t)	Faktor beban (%)	<i>Steam</i> (t)
Hari 1	7,3	48,6	9,9	49,3	17,1
Hari 2	8,2	54,4	12,1	60,5	20,3
Hari 3	8,1	53,8	12,9	64,7	21,0
Hari 4	7,3	48,7	12,3	61,4	19,6
Hari 5	7,7	51,1	10,7	53,7	18,4
Rata-rata	7,7	51,3	11,6	57,9	19,3

badan boiler. Besarnya kehilangan panas radiasi tergantung pada luas permukaan boiler. Karena boiler memiliki area permukaan yang luas, kehilangan panas akibat radiasi menjadi signifikan saat boiler beroperasi pada beban rendah. Kehilangan panas akibat radiasi dan konveksi pada boiler yang beroperasi pada beban penuh mencapai sekitar 2% dari total panas hilang (Barma *et al.*, 2017). Karena itu, pengaturan dari besar kecilnya ukuran boiler sangat berpengaruh terhadap efisiensi termal boiler. Jika beberapa boiler dengan kapasitas berbeda dioperasikan, maka konsumsi bahan bakar dapat dikurangi dengan mengoperasikan boiler skala besar pada kondisi optimal dan boiler lainnya yang lebih kecil digunakan untuk mengatasi fluktuasi beban. Berdasarkan karakteristik ini, boiler 20 ton/jam selalu dioperasikan pada sekitar 90% beban, dan boiler 6 ton/jam dioperasikan untuk mengatasi fluktuasi beban. Efek peningkatan dari pengoperasian boiler seperti ini ditampilkan dalam **Gambar 13**.

Konsumsi *steam* sebesar 164.929 ton/tahun dipenuhi dari pengoperasian dua unit boiler, yaitu boiler 20 ton/jam dan boiler 15 ton/jam, masing-masing pada beban rendah. Peningkatan beban boiler 20 ton/jam dari 59% menjadi 90% dapat meningkatkan produksi *steam* menjadi 138.240 ton/tahun dan efisiensi boiler naik menjadi 74,8%. Kekurangan produksi *steam* sebesar 26.689 ton/tahun dipenuhi dengan mengoperasikan boiler 6 ton/jam pada beban 58%. Pada beban ini, boiler 6 ton/jam memiliki efisiensi 61,1%. Dengan demikian maka boiler 15 ton/jam tidak perlu dioperasikan lagi. Kontrol multi-boiler dengan cara ini dapat menurunkan konsumsi batubara sebesar 8,3% dan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 4.694 tCO<sub>2</sub>/tahun.

Sebelum

**Kontrol multi boiler**

Konsumsi batubara = 33.802 ton/tahun  
 Konsumsi steam = 164.929 ton/tahun  
 Boiler 20 ton/jam:  
 - Efisiensi termal = 69,8%  
 - Produksi steam = 89.954 ton/tahun  
 - Faktor beban = 59%



Sesudah

**Kontrol multi boiler**

Konsumsi batubara = 31.0089 ton/tahun  
 Produksi steam = 164.929 ton/tahun  
 Boiler 20 ton/jam:  
 - Efisiensi termal = 74,8%  
 - Produksi steam = 138.240 ton/tahun  
 - Faktor beban = 90%  
 Boiler 6 ton/jam:  
 - Efisiensi termal = 61,1%  
 - Produksi steam = 26.689 ton/tahun  
 - Faktor beban = 58%

Rasio reduksi batubara = 8,3%  
 Reduksi batubara = 2.793 ton/tahun  
 Reduksi biaya = 2.039x10<sup>6</sup> Rp/tahun  
 Reduksi CO<sub>2</sub> = 4.694 tCO<sub>2</sub>/tahun

**Gambar 13.** Kasus bila Boiler 20 Ton Dioperasikan pada 90% Beban, dan Boiler 6 Ton Dioperasikan untuk mengatasi Fluktuasi Beban

**Tabel 9.** Biaya Pemasangan Sistem Kontrol Pembakaran Otomatis Boiler 6 Ton

Biaya konstruksi sistem kontrol pembakaran	2.000x10 <sup>6</sup>	Rp
<i>Payback period</i>	0,98	tahun

Kontrol pembakaran pada boiler 6 ton dilakukan secara otomasi untuk mengatasi fluktuasi beban. Konstruksi sistem kontrol pembakaran otomatis boiler 6 ton diasumsikan membutuhkan investasi Rp 2 milyar. Waktu yang diperlukan untuk pengembalian modal untuk investasi ini adalah 0,98 tahun (**Tabel 9**).

**Potensi Perbaikan Keseluruhan**

Diketahui potensi tindakan perbaikan dengan penyesuaian kadar air batubara, perbaikan rasio udara pembakaran, optimalisasi rasio *blowdown*, pemulihan air kondensat, pemasangan insulasi, dan kontrol multi-boiler secara teori akan menurunkan konsumsi batubara 16.445 ton/tahun dan menurunkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 48,63%. Selanjutnya hasil perhitungan simulasi efek perbaikan pada tiap tindakan *co-benefit* diringkaskan dalam **Tabel 10**.

Perbaikan-perbaikan ini akan menghasilkan reduksi konsumsi batubara 16.445 ton/tahun atau 48,63%, dan reduksi CO<sub>2</sub> sebesar

**Tabel 10.** Hasil Perhitungan Simulasi Efek Perbaikan pada Tiap Tindakan *Co-Benefit*

Tindakan	Rasio Reduksi Batubara	Reduksi Batubara	Reduksi CO <sub>2</sub>	Reduksi Biaya
	%	ton/tahun	tCO <sub>2</sub> /tahun	Rp juta/tahun
Penurunan kadar air batubara	19,4	6.561	1.278	4.789
Perbaikan rasio udara pembakaran	5,0	1.690	2.841	1.234
Optimalisasi <i>blowdown</i>	3,4	1.143	2.281	834
Pemulihan kondensat	1,4	486	969	355
Insulasi pipa steam	0,93	315	628	230
Insulasi pipa pemulihan kondensat	1,1	387	772	282
Insulasi saluran gas buang dan pemanasan udara inlet boiler	2,6	865	1.726	631
Insulasi mesin kertas	6,5	2.205	4.400	1.610
Optimalisasi multi boiler	8,3	2.793	4.694	2.039
<b>Total</b>	<b>48,63</b>	<b>16.445</b>	<b>19.589</b>	<b>12.004</b>

19.377 t-CO<sub>2</sub>/tahun. Penghematan biaya yang diperoleh dalam waktu satu tahun diestimasi mencapai Rp 12 milyar.

## Kesimpulan

Kegiatan studi co-benefit peningkatan efisiensi boiler batubara di industri kertas menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi boiler ditunjukkan dengan reduksi konsumsi batubara, reduksi emisi CO<sub>2</sub>, dan reduksi biaya yang sangat signifikan dapat dicapai dengan perbaikan-perbaikan berupa penurunan kadar air batubara, rasio udara pembakaran, optimalisasi rasio *blowdown*, pemulihan kondensat, insulasi perpipaan, insulasi saluran gas buang, insulasi mesin kertas, dan kontrol beban multi boiler. Perbaikan-perbaikan ini dapat menghasilkan reduksi konsumsi batubara 16.445 ton/tahun atau 48,63%, dan reduksi emisi CO<sub>2</sub> sebesar 19.589 tCO<sub>2</sub>/tahun. Penghematan biaya yang diperoleh dalam waktu satu tahun diestimasi mencapai Rp 12 milyar. Tindakan perbaikan yang paling signifikan pengaruhnya dengan biaya murah yaitu penurunan kadar air batubara, disusul optimalisasi beban multi boiler, dan perbaikan rasio udara pembakaran.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen Balai Besar Pulp dan Kertas, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia, dan Kementerian Lingkungan Hidup Jepang sebagai penyandang dana “Program Kerjasama Bilateral dengan Indonesia dalam Pengembangan Internasional Teknologi Lingkungan dengan Pendekatan Co-Benefit Tahun Fiskal 2018”.

## Daftar Pustaka

- Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A. and Sait, S. M. (2017) ‘A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 79(May), pp. 970–983. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.187.
- Gupta, R., Ghai, S. and Jain, A. (2011) ‘Energy Efficiency Improvement Strategies for Industrial Boilers: A Case Study’, *Journal of Engineering & Technology*, 1(1), p. 52. doi: 10.4103/0976-8580.74541.
- Ibrahim, U. and Farrukh, S. (2019) ‘Optimization of Fuel in Saturated Steam Boiler through Preheating of Controlled Air-Fuel Mixture’, *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE, (x), pp. 1–5.
- Liu, M., Qin, Y., Yan, H., Han, X. and Chong, D. (2015) ‘Energy and water conservation at lignite-fired power plants using drying and water recovery technologies’, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 105, pp. 118–126. doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.069.
- Mahapatra, D. (2016) ‘A Review on Steam Coal Analysis -Calorific Value’, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, pp. 143–152.
- MUFG (2019) *Laporan program tahun fiskal 2018 program kerjasama bilateral dengan Indonesia dalam pengembangan internasional teknologi lingkungan dengan pendekatan co-benefit*.
- Saidur, R., Ahamed, J. U. and Masjuki, H. H. (2010) ‘Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers’, *Energy Policy*. Elsevier, 38(5), pp. 2188–2197. doi: 10.1016/j.enpol.2009.11.087.
- Song, C., Li, M., Zhang, F., He, Y. L. and Tao, W. Q. (2015) ‘A data envelopment analysis for energy efficiency of coal-fired power units in China’, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 102, pp. 121–130. doi: 10.1016/j.enconman.2014.12.062.
- Tirumala Srinivas, G. (2017) ‘Efficiency of a Coal Fired Boiler in a Typical Thermal Power Plant’, *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(1), p. 32. doi: 10.11648/j.ajmie.20170201.15.
- Wang, K., Wang, S., Liu, L., Yue, H., Zhang, R. and Tang, X. (2016) ‘Environmental co-benefits of energy efficiency improvement in coal-fired power sector: A case study of Henan Province, China’, *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 184, pp. 810–819. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.059.
- Xu, C., Xu, G., Zhao, S., Dong, W., Zhou, L. and Yang, Y. (2016) ‘A theoretical investigation of energy efficiency improvement by coal pre-drying in coal fired power plants’, *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 122, pp. 580–588. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.048.

- Yang, X. and Teng, F. (2018) 'The air quality co-benefit of coal control strategy in China', *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier B.V., 129(x), pp. 373–382. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.08.011.
- Zaporozhets, A. (2019) 'Analysis of control system of fuel combustion in boilers with oxygen sensor', *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64(4), pp. 241–248. doi: 10.3311/PPme.12572.

- Halaman ini sengaja dikosongkan -