

VALUASI PENGENDALIAN EMISI BOILER BATU BARA PADA INDUSTRI KERTAS DAN ESTIMASI EMISI MERKURI (Hg)

Yusup Setiawan

Balai Besar Pulp dan Kertas
Jl. Raya Dayeuhkolot No. 132, Bandung

Diterima : 06 April 2017, Revisi akhir : 18 September 2017, Disetujui terbit : 18 September 2017

VALUATION ON EMISSION CONTROL OF COAL-FIRED BOILER OF PAPER INDUSTRY AND ESTIMATION OF MERCURY (Hg) EMISSION

ABSTRACT

Steam and electricity needs in the paper industry have been provided itself through coal-fired boiler equipped with emission control devices. Boiler flue gas emissions of coal combustion products contain contaminants such as particulate emissions, NO₂ and SO₂, and a small amount of emissions of mercury (Hg). Valuation on boiler emissions quality associated with air emissions control systems and emissions standard has been carried out. Estimation of mercury concentration in air emissions of boiler flue gas in the paper industry has also been conducted. The valuation on the air emissions quality of non-mercury parameters of paper industry boilers has also been done based on national emissions standards. The results of the valuation indicated that the current applied of flue gas emissions control devices in the paper industry has been optimally operated so that the emission quality of boiler for both non-mercury parameters and mercury parameters has been complied with the emission quality standards. Prediction of mercury content in air emissions of a coal boiler stack of paper industry that is discharged into environment based on the content of mercury in coal is 0.0205 mg/Nm³ (20.5 µg/Nm³) maximum. Paper industry needs to consider the application of co-benefit technology when mercury is used as a quality standard emissions parameter.

Keywords: paper industry, coal boiler, emissions, mercury, co-benefit technology

ABSTRAK

Kebutuhan uap dan atau listrik pada industri kertas disediakan melalui unit *boiler* berbahan bakar batu bara yang dilengkapi alat pengendali emisi. Emisi gas *boiler* mengandung pencemar berupa partikulat, NO₂ dan SO₂, dan merkuri (Hg). Valuasi kualitas emisi *boiler* berkaitan dengan sistem pengendalian emisi udara dan baku mutu emisi telah dilakukan, Estimasi kadar merkuri di udara emisi cerobong *boiler* pada industri kertas juga telah dilakukan. Valuasi kualitas emisi udara non-merkuri emisi *boiler* industri kertas juga telah dilakukan berdasarkan baku mutu emisi nasional. Hasil valuasi menunjukkan bahwa alat pengendali emisi gas buang *boiler* yang telah diterapkan saat ini pada industri kertas telah dioperasikan secara optimal sehingga kualitas emisi *boiler* baik untuk parameter non-merkuri maupun untuk parameter merkuri telah memenuhi baku mutu emisi. Prediksi kadar merkuri dalam udara emisi cerobong *boiler* batu bara industri kertas yang dibuang ke lingkungan dihitung berdasarkan kadar merkuri dalam batu bara adalah maksimum sebesar 0,0205 mg/Nm³ (20,5 µg/Nm³). Industri kertas perlu mempertimbangkan penerapan teknologi *co-benefit* bilamana suatu saat parameter merkuri ditetapkan sebagai parameter baku mutu emisi.

Kata kunci: industri kertas, *boiler* batu bara, emisi, merkuri, teknologi *co-benefit*

PENDAHULUAN

Industri kertas dikenal sebagai industri yang banyak mengonsumsi energi. Pada saat ini tercatat ada sekitar 66 pabrik kertas (APKI, 2014). Pada industri kertas, energi (uap) dapat disediakan sendiri melalui unit ketel uap (*boiler*). Umumnya bahan bakar *boiler* yang digunakan pada industri kertas adalah batu bara. Emisi gas yang dihasilkan oleh industri kertas dapat berasal dari beberapa sumber emisi, salah satunya berasal dari *boiler* berbahan bakar batu bara. Pada *boiler* berbahan bakar batu bara, pembakaran bahan bakar akan menghasilkan polutan berupa emisi gas buang yang dikeluarkan lewat cerobong. Emisi gas buang yang dikeluarkan tersebut pada umumnya mengandung bahan pencemar berupa partikulat (debu), ataupun berupa gas seperti NO₂ dan SO₂. Emisi gas buang yang dikeluarkan dari cerobong baik berupa partikulat maupun gas merupakan emisi yang dapat mencemari lingkungan. Oleh karena itu, polutan dari hasil pembakaran tersebut harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan supaya memenuhi Baku Mutu Emisi (BME) berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 07 tahun 2007 Lampiran IV tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap.

Emisi lainnya dari hasil pembakaran adalah *trace element* seperti logam berat (Be, Hg, Pb, Cd, Zn, As, dan Se) berada dalam jumlah kecil. Hanya ada sedikit data yang ada dari hasil uji emisi untuk logam seperti merkuri (Hg) dari sumber pembakaran berbahan baku batu bara di industri kertas. Namun, data yang dikumpulkan dari penyisihan partikulat dari perangkat pengendali partikulat dapat juga memberikan kinerja terbaik untuk penyisihan logam. Oleh karena itu, partikulat merkuri juga dapat dikendalikan pada tingkat yang sama sebagai partikulat. Merkuri (Hg) dapat diemisikan dari perangkat pengendali seperti *Electro Static Precipitator* (ESP) atau *wet scrubber* dalam bentuk uap (Strivastava, 2010; Ansyori, 2011)

Apabila jumlahnya berlebihan di dalam air, tanah dan udara, merkuri dan senyawanya merupakan zat berbahaya untuk manusia dan organisme lainnya. Keracunan merkuri dapat terjadi akibat kontak kulit, makanan, minuman dan pernapasan. Dampaknya pada kesehatan termasuk gangguan sistem pencernaan dan sistem syaraf; paparan dalam jumlah besar dan berulang dapat menyebabkan kerusakan

kesehatan yang bersifat fatal. Emisi merkuri juga dapat dihasilkan dari kegiatan industri yang menggunakan bahan bakar batu bara. Asia Timur dan Tenggara merupakan penyumbang 40% emisi merkuri ke udara (Giang *et al.*, 2015; KLHK, 2015). Masyarakat Jepang dan masyarakat dunia kemudian mulai menyadari bahaya pencemaran merkuri. *The United Nations Environmental Programme* (UNEP) yang membidangi isu lingkungan telah memprakarsai konferensi yang dihadiri oleh wakil-wakil *Intergovernmental Negotiating Committees* (INC) dari masing-masing negara untuk mendiskusikan dan menegosiasikan persetujuan global tentang merkuri. Konferensi tersebut menghasilkan Konvensi Minamata tentang Merkuri (*Minamata Convention on Mercury*) yang ditandatangani oleh 128 negara, termasuk Indonesia dan Uni Eropa di tahun 2013. Konvensi Minamata ini bertujuan untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan hidup dari bahaya merkuri (UNEP, 2015) (www.mercuryconvention.org/, 2017). Dalam pertemuan tersebut, Indonesia berhasil memastikan bahwa konvensi baru ini menerapkan pendekatan berimbang, yaitu komitmen dan target yang diterapkan akan melindungi kesehatan dan lingkungan hidup, dan target yang disepakati disesuaikan dengan kondisi di dalam negeri dan kebutuhan perekonomian Indonesia. Adanya konvensi ini juga memberikan kewajiban kepada berbagai industri di Indonesia untuk menerapkan sistem dan teknologi yang rendah merkuri (KLHK, 2015).

Dalam makalah ini diuraikan mengenai sistem pengendalian dan kualitas emisi udara dari cerobong *boiler* berbahan bakar batu bara di industri kertas. Estimasi merkuri (Hg) dalam emisi udara berdasarkan alat pengendali emisi udara yang digunakannya juga disajikan. Makalah ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan untuk pertimbangan dalam penetapan merkuri (Hg) sebagai salah satu parameter pada penetapan baku mutu emisi *boiler* berbahan bakar batu bara di Indonesia.

METODE

Valuasi dilakukan berdasarkan data sekunder dari berbagai pustaka untuk pembahasan :

- jenis *boiler* dan alat pengendali emisi udara *boiler* berbahan bakar batu bara pada industri pulp dan kertas;
- baku mutu udara emisi dan merkuri (Hg);

- kualitas batu bara Indonesia;
- transformasi merkuri yang terkandung dalam batu bara selama proses pembakaran dan setelah pembakaran;
- teknologi *co-benefit* pengendalian merkuri dalam emisi gas buang *boiler* berbahan bakar batu bara; dan
- estimasi kadar merkuri di udara emisi cerobong *boiler* berbahan bakar batu bara pada industri kertas

Estimasi kadar merkuri di udara emisi cerobong *boiler* berbahan bakar batu bara pada industri kertas yang dibuang ke lingkungan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

Persamaan 1:

Kadar merkuri (ppm) = (kadar merkuri dalam batu bara dalam ppm) x (100 - efisiensi reduksi Hg oleh alat pengendali udara emisi dalam %)

Persamaan 2 :

Kadar merkuri (mg/Nm³) = (Kadar merkuri, ppm_{NTP}) x (Berat Molekul Hg)/(24,45 liter/mol)

Keterangan :

- Berat Molekul Hg = 200,59
- 24,45= volume molar pada kondisi normal suhu (T)25°C (298°K) dan tekanan (P) 760 mmHg
- 24,45= volume molar pada kondisi normal suhu (T)25°C (298°K) dan tekanan (P) 760 mmHg
- NTP= kondisi normal, suhu (T) 25°C (298°K) dan tekanan (P) 760 mmHg

Selain itu, kajian dilakukan juga berdasarkan hasil pengujian kualitas emisi *boiler* di industri kertas dan membandingkannya dengan baku mutu emisi baik nasional maupun luar negeri. Pengujian kualitas emisi *boiler* berbahan bakar batu bara telah dilakukan pada 5 industri kertas yang berlokasi di wilayah Jawa Barat. *Boiler* berbahan bakar batu bara untuk menghasilkan uap pada 5 industri kertas tersebut terdiri dari 4 *boiler* jenis *fluidized bed* dan 1 *boiler* jenis *chain grate*. Seluruh *boiler* industri kertas tersebut telah dilengkapi dengan alat pengendali emisi *wet scrubber* jenis *ventury* yang menggunakan air bersih sebagai media untuk menangkap polutan emisinya. Air yang keluar dari *wet scrubber* dialirkan ke bak pengendap untuk mengendapkan padatan yang terserap air. *Effluent* dari bak

pengendap selanjutnya dialirkan ke saluran air limbah yang menuju instalasi pengolahan air limbah (IPAL).

Parameter uji kualitas emisi udara meliputi parameter partikulat, SO₂, NO₂ dan opasitas. Metoda yang digunakan untuk masing-masing parameter adalah sebagai berikut :

- a. Partikulat : Contoh partikulat diisap dan disaring dengan *filter microfibre thimbles*, kemudian kadarnya ditentukan dengan metoda gravimetri menurut SNI 19-7117.12.2005 Emisi Gas Buang-Sumber Tidak Bergerak-Bagian 12: Penentuan Total Partikel secara Isokinetik.
- b. NO_x sebagai NO₂ diukur dengan metoda *Chemiluminescence* menggunakan alat ukur *Portable Gas Analyzer Horiba PG-250 series*.
- c. SO₂ diukur dengan metoda *Non-Dispersive Infra Red* (NDIR) menggunakan alat ukur *Portable Gas Analyzer Horiba PG-250 series*.
- d. Opasitas diukur menurut SNI 19-7117.11.2005 Emisi gas buang-Sumber tidak bergerak-Bagian 11: Cara uji opasitas menggunakan skala *Ringelmann* untuk asap hitam.

PEMBAHASAN

Jenis *Boiler* dan Alat Pengendali Emisi Udara *Boiler* Berbahan Bakar Batu Bara pada Industri Pulp dan Kertas

Boiler yang digunakan di industri pulp dan kertas umumnya adalah *boiler* dengan dapur *stoker* (*chain grate*) dan *boiler* dengan sistem pembakaran unggun terfluidisasi (*fluidized bed*). Industri pulp dan kertas telah memasang peralatan pengendali emisi dalam pengendalian polutan emisi dari hasil pembakaran batu bara di *boiler* seperti disajikan pada Tabel 1.

Baku Mutu Udara Emisi dan Merkuri (Hg)

Pemerintah Indonesia telah menetapkan baku mutu udara emisi untuk *boiler* berbahan bakar batu bara melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 07 tahun 2007 Lampiran IV tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap. Terdapat 4 parameter udara emisi untuk *boiler* berbahan bakar batu bara yang ditetapkan oleh peraturan ini meliputi parameter

Tabel 1. Peralatan Pengendalian Pencemaran Udara di Industri Pulp dan Kertas

Alat pengendali emisi	Efisiensi penyisihan (%)	Penggunaan
<i>Electrostatic Precipitator</i> (ESP)	91 - 99	<i>Recovery boiler, power boiler, dan lime kiln</i>
<i>Ventury Scrubber</i>	95 - 99	<i>Lime kiln, recovery boiler, smelt dissolving tank, dan boiler industri kertas</i>
<i>Cyclone scrubber</i>	65 - 95	<i>Lime kiln dan boiler industri kertas</i>
<i>Impingement scrubber</i>	92 - 97	<i>Lime kiln dan power boiler</i>
<i>Fabric filter</i> (FF)	99	<i>Power boiler</i>
<i>Cyclone separator</i>	65 - 99	<i>Lime kiln, power boiler batu bara, dan recovery boiler</i>

Tabel 2. Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Ketel Uap (*Boiler*) yang Menggunakan Bahan Bakar Batu Bara (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2007)

No.	Parameter	Baku mutu
1.	Partikulat	230 mg/m ³
2.	Sulfur dioksida (SO ₂)	750 mg/m ³
3.	Nitrogen oksida (NO ₂)	825 mg/m ³
4.	Opasitas	20 %

partikulat, SO₂, NO₂, dan opasitas yang kadar maksimumnya disajikan dalam Tabel 2.

Pada saat ini, baku mutu udara emisi merkuri (Hg) untuk emisi *boiler* berbahan bakar batu bara belum ditetapkan pemerintah Indonesia. Namun, emisi insinerator telah ditetapkan maksimal sebesar 0,2 mg/Nm³ dan 5 mg/Nm³, masing-masing menurut Keputusan Kepala Bapedal No.Kep. 03/BAPEDAL/09/1995 Tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun dan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 13 Tahun 1995, Lampiran V-B : Baku mutu emisi untuk jenis kegiatan lain, yang berlaku mulai tahun 2000.

Baku mutu udara emisi merkuri (Hg) telah diterapkan di beberapa negara seperti ditunjukkan dalam Tabel 3. Korea telah menetapkan baku mutu emisi merkuri (Hg) maksimal sebesar 100 µg/Nm³ mulai sejak tahun 2010 (Lee, 2007). China telah menerapkan baku mutu merkuri (Hg) maksimal sebesar 5 µg/Nm³ sejak tahun 2015 dan akan menjadi lebih ketat lagi menjadi sebesar 3µg/Nm³ pada tahun 2020. Amerika Serikat telah menerapkan baku mutu merkuri (Hg) berdasarkan jenis batu bara yang digunakan sebagai bahan

bakar *boiler*, yaitu 1,7µg/Nm³ untuk batu bara jenis *bituminous* dan 1,5 µg/Nm³ untuk batu bara jenis lignit. Jerman telah menerapkan baku mutu merkuri (Hg) maksimal sebesar 30 µg/Nm³ dan akan lebih ketat lagi menjadi sebesar 10 µg/Nm³ pada tahun 2019. Jepang telah menerapkan baku mutu merkuri (Hg) yang sangat ketat, yaitu maksimal sebesar 0,04 µg/Nm³. India telah menerapkan baku mutu merkuri (Hg) maksimal sebesar 50 µg/Nm³, sedangkan baku mutu merkuri (Hg) yang agak sedikit longgar diterapkan di Philipina, yaitu maksimal sebesar 5.000 µg/Nm³.

Kualitas Batu Bara Indonesia

Batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar *boiler* diperoleh dari pertambangan di Sumatera dan Kalimantan dengan jenis lignit, *bituminous*, dan *sub-bituminous* yang memiliki karakteristik seperti pada Tabel 4. Kualitas batu bara yang digunakan sebagai bahan bakar *boiler* oleh industri kertas pada kenyataannya sangat bervariasi. Kualitas batu bara diklasifikasikan berdasarkan nilai kalornya, yaitu nilai kalor rendah (< 5.100 kal/gr), nilai kalor sedang (5.100 – 6.100 kal/gr), nilai kalor tinggi (6.100 – 7.100 kal/gr), dan nilai kalor sangat tinggi (> 7.100 kal/gr). Selain nilai kalor, batu bara diklasifikasikan berdasarkan kadar sulfurnya, yaitu kadar sulfur rendah (< 0,5 %), kadar sulfur sedang (0,5 – 1 %), dan kadar sulfur tinggi (> 1%) (Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, 2006; Fatimah and Herudiyanto, 2007). Tabel 4 menunjukkan bahwa kualitas batu bara Indonesia termasuk pada kualitas nilai kalor rendah sampai tinggi (4.200 – 7.000 kal/gr) dan kadar sulfurnya rendah sampai tinggi (0,08 – 2,80%).

Tabel 3. Baku Mutu Emisi Merkuri (Hg) di Beberapa Negara

No.	Negara	Baku mutu emisi merkuri (Hg)		Sumber
		Satuan	Nilai	
1.	Indonesia	mg/Nm ³	0,2	Keputusan Kepala Bapedal No.Kep. 03/ BAPEDAL/09/1995, Baku mutu emisi udara untuk insinerator
		mg/Nm ³	5	Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 13 Tahun 1995, Lampiran V-B : Baku mutu emisi untuk jenis kegiatan lain
2.	Korea	µg/Nm ³	100	(Sloss, 2012)
3.	China	µg/Nm ³	5	(NRDC, 2012)
4.	Amerika Serikat	µg/Nm ³	1,7	(Sloss, 2012)
5.	Jerman	µg/Nm ³	30	(Sloss, 2012)
6.	Jepang	µg/Nm ³	0,04	(Sloss, 2012)
7.	Belanda	µg/Nm ³	4,8	(Sloss, 2012)
8.	India	µg/Nm ³	50	(Sloss, 2012)
9.	Philipina	µg/Nm ³	5.000	(NRDC, 2012)

Tabel 4. Karakteristik Batu Bara Indonesia (Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, 2006; Fatimah and Herudiyanto, 2007; Jones *et al.*, 2007; Lee, 2007)

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Analisis Proksimat:		
	- Air lembab (<i>moisture</i>)	%	4 – 24
	- Abu (<i>ash</i>)	%	1,33 – 15,00
	- <i>Fixed carbon</i>	%	40,23 – 51,64
	- Zat terbang (<i>Volatile Matter</i>)	%	36,3 – 41,5
2.	Analisis Ultimat :		
	- Hidrogen (H ₂)	%	6,27 – 8,05
	- Karbon (C)	%	55,00 – 70,60
	- Nitrogen (N ₂)	%	0,97 – 1,25
	- Oksigen (O ₂)	%	36,34 – 46,65
	- Sulfur (S)	%	0,08 – 2,80
	- Nilai kalor	kal/gr	4.200 – 7.000
3.	Klorin (Cl ⁻)	ppm	28,7
4.	Merkuri (Hg)	ppm	0,020 – 0,0503

Kualitas Emisi Cerobong *Boiler* Industri Kertas

Hasil pengujian kualitas emisi cerobong *boiler* batu bara pada 5 industri kertas disajikan pada Tabel 5. Secara keseluruhan, konsentrasi emisi cerobong *boiler* batu bara pada 5 industri kertas berada pada kisaran konsentrasi partikulat 28 – 171 mg/Nm³, SO₂ = 29 – 622 mg/Nm³, NO₂ 29 – 594

mg/Nm³, dan opasitas < 20%. Bila dibandingkan dengan baku mutu emisi menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 07 tahun 2007, kualitas emisi cerobong *boiler* kelima industri kertas tersebut telah memenuhi baku mutu yang aman untuk lingkungan. Dalam hal ini, 5 industri kertas tersebut telah mengoperasikan *boiler* berbahan bakar batu bara dan peralatan pengendali emisi secara efektif dan optimal.

Tabel 5. Alat Pengendali Emisi dan Kualitas Emisi Cerobong *Boiler* Berbahan Bakar Batu Bara pada Industri Kertas Indonesia

Industri Kertas	Jenis <i>Boiler</i>	Alat pengendali emisi*	Kualitas emisi gas buang <i>boiler</i> setelah alat pengendali			
			Partikulat (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	Opasitas (%)
A	<i>Fluidized bed</i>	VWS	45 – 152	147 – 219	85 – 594	< 20
B	<i>Fluidized bed</i>	VWS	79 – 83	29 – 294	33 – 349	< 20
C	<i>Chain grate</i>	VWS	43 – 125	35 – 622	67 – 200	< 20
D	<i>Fluidized bed</i>	VWS	28 – 100	161 – 393	42 – 150	< 20
E	<i>Fluidized bed</i>	VWS	97 - 171	28 - 366	29 - 247	< 20
Baku Mutu Emisi (BME) : PerMenLH No. 07 Tahun 2007, Lampiran IV			230	750	825	20

Transformasi Merkuri yang Terkandung dalam Batu Bara selama Proses Pembakaran dan Setelah Pembakaran

Merkuri adalah salah satu logam kontaminan dalam jumlah kecil yang terkandung dalam batu bara. Merkuri merupakan logam yang sangat mudah menguap pada suhu pembakaran batu bara di dalam *boiler*. Konsekuensinya, merkuri diemisikan dalam aliran gas pada saat pembakaran. Konsentrasi merkuri di dalam batu bara bervariasi tergantung pada jenis batu bara. Terdapat empat jenis batu bara, antara lain antrasit, *bituminous*, *sub-bituminous*, dan lignit. *Boiler* utilitas yang menghasilkan listrik bisa menyala oleh batu bara. Batu bara dibakar di *boiler* untuk memanaskan air dan menghasilkan uap. Hasil pembakaran batu bara di dalam *boiler* menghasilkan uap merkuri yang diemisikan. Emisi merkuri pada akhirnya terkumpul dan tersimpan di dalam tanah atau badan air. Emisi merkuri hasil pembakaran batu bara yang terperangkap alat pengendali emisi berupa limbah padat seperti abu dasar (*bottom ash*) dan abu terbang (*fly ash*) (Leopold, 2002).

Transformasi merkuri yang terkandung dalam batu bara selama proses pembakaran dan setelah pembakaran seperti terlihat pada Gambar 1. Selama pembakaran, merkuri (Hg) dalam batu bara diuapkan dan dikonversi menjadi bentuk gas merkuri (Hg⁰) pada suhu tinggi *boiler*. Karena gas buang didinginkan, serangkaian reaksi kompleks mulai mengkonversi Hg⁰ menjadi senyawa merkurioksida (Hg²⁺) dan/atau senyawa Hg fasa padat (Hg_p) pada suhu gas buang atau Hg yang teradsorpsi pada permukaan partikel. Adanya gas klor akan menyebabkan pembentukan HgCl₂ dalam gas buang. Hg dalam aliran peralatan

pengendali gas buang berupa campuran Hg⁰, Hg²⁺ dan Hg_p. Banyaknya merkuri oksida sangat bergantung pada kualitas batu bara, konsentrasi klor (Cl₂) dalam batu bara, dan kondisi operasi *boiler* (misalnya, rasio udara/bahan bakar dan suhu). Partisi Hg menjadi Hg⁰, Hg²⁺ dan Hg_p dikenal sebagai spesiasi Hg, yang dapat mempengaruhi pada pemilihan alat pengendali merkuri. Secara umum, sebagian besar gas Hg di *boiler* batu bara *bituminous* adalah dalam bentuk Hg²⁺. Di sisi lain, sebagian besar gas Hg di batu bara *sub-bituminous* dan lignit dalam bentuk Hg⁰ (Galbreath and Zygarrlicke, 1996; Pirrone and Mason, 2008).

Tabel 4 menunjukkan bahwa kandungan merkuri (Hg) batu bara Indonesia termasuk dalam kategori kadar rendah yaitu pada kisaran 0,020 – 0,0503 ppm (Jones *et al.*, 2007; Lee, 2007). Komposisi batu bara memiliki dampak yang besar pada kuantitas dan bentuk kimia Hg dalam emisi gas buang dan, sebagai hasilnya,

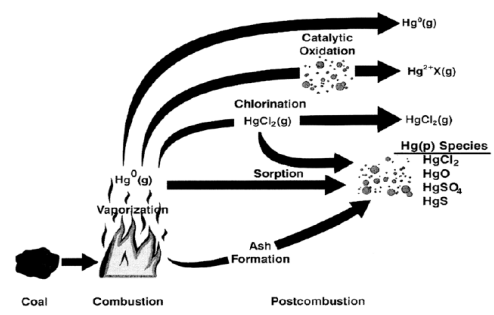


Figure 2. Potential mercury transformations during combustion and post-combustion (Galbreath and Zygarrlicke, 2000)

Gambar 1. Transformasi Merkuri Selama dan Setelah Pembakaran (Galbreath and Zygarrlicke, 1996; Wang *et al.*, 2009)

efektivitas perangkat kontrol pencemar udara untuk mereduksi Hg dari gas buang.

Batu bara yang mengandung klorin(Cl) lebih dari 200 ppm menghasilkan emisi gas buang yang didominasi oleh senyawa merkuri (Hg^{2+}), sebagian besar dalam bentuk merkuri klorida ($HgCl_2$), yang lebih mudah ditangkap oleh alat pengendali emisi. Sebaliknya, batu bara yang mengandung klor rendah (<50 ppm) seperti batu bara jenis *sub-bituminous* dan lignit, emisi gas buang hasil pembakaran batu baranya didominasi dalam bentuk merkuri gas (Hg^0), yang lebih sulit direduksi dari pada dalam bentuk Hg^{2+} (Jones *et al.*, 2007). Bila dilihat dari kadar klorinnya (Tabel 4), batu bara Indonesia termasuk dalam kategori yang mengandung klorin rendah (<50 ppm) sehingga kemungkinan besar emisi gas buang hasil pembakaran batu baranya didominasi dalam bentuk merkuri gas (Hg^0).

Teknologi Co-Benefit Pengendalian Merkuri dalam Emisi Gas Buang Boiler Berbahan Bakar Batu Bara

Peralatan pengendali polusi udara non-merkuri sering dilakukan dalam dua model dasar yaitu penghilangan merkuri partikulat-terikat menggunakan perangkat pengendali partikulat dan penghilangan merkuri teroksidasi menggunakan *scrubber Flue Gas Desulfurization* (FGD) sistem basah. Pengendalian emisi merkuri dari boiler berbahan bakar batu bara dilakukan melalui peralatan pengendali yang sama digunakan untuk menghilangkan partikulat, sulfur dioksida (SO_2), dan nitrogen oksida (NO_x). Alat pengendali emisi partikulat antara lain *Electro Static Precipitator* (ESP), *wet scrubber*, *fabric filter* atau *baghouses*, dan kolektor mekanis. ESP adalah alat pengendali emisi yang paling banyak digunakan oleh industri. Tidak ada desain khusus untuk menghilangkan merkuri, tetapi semua alat pengendali emisi memiliki sifat yang berbeda-beda. Ansyori (2011) melaporkan bahwa pengontrol merkuri pada emisi cerobong berbahan bakar batu bara dapat menggunakan teknologi *co-benefit*. Teknologi *co-benefit* adalah teknologi yang didesain untuk mengontrol polutan selain merkuri, yaitu partikulat, NO_x , dan SO_x akan tetapi dalam hal ini dapat juga digunakan sebagai alat pengendali merkuri. Konfigurasi alat pengendali emisi dari teknologi ini antara lain seperti ditunjukkan pada

Tabel 6 dan Gambar 2. Emisi partikulat dapat dikontrol menggunakan alat pengendali ESP. Selain berfungsi sebagai pengendali partikulat, ESP juga dapat digunakan sebagai pengendali emisi Hg fasa padat (Hg_p) dan emisi Hg yang teradsorpsi pada permukaan partikel. SO_x adalah polutan yang dikendalikan menggunakan *Wet Scrubber Gas Desulfurization*. Selain berfungsi sebagai pengendali SO_x , alat pengendali ini bisa digunakan untuk penghilangan kadar emisi merkuri dengan cara melarutkan oksida merkuri (Hg^{2+}) di dalam air sebagai cairan penyerapnya. Penghilangan merkuri juga dapat dilakukan menggunakan *spray dryer*. Jumlah penghilangan merkuri yang dapat dicapai sangat bervariasi besarnya tergantung pada konfigurasi peralatan pengendalian polusi seperti ditunjukkan pada Tabel 6 (Leopold, 2002; Srivastava *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2007; Srivastava, 2010). Gambar 2 menunjukkan salahsatu contoh diagram proses pengendalian emisi merkuri di Jepang dengan kombinasi SCR, ESP dan FGD.

Kombinasi SCR, ESP dan FGD pada pembangkit listrik berbahan bakar batu bara banyak digunakan di Jepang. Sistem pengendalian emisi tersebut dapat mencapai efisiensi penghilangan NO_x sebesar 50 - 90%, partikulat lebih dari 99%, SO_2 sebesar 76,0 - 98,0%, dan penghilangan merkuri dengan rata-rata 74,4%, yang menghasilkan konsentrasi merkuri di gas buang sebesar $1,2 \text{ ug/m}^3$. Lebih lanjut, kombinasi alat pengendali emisi SCR dan ESP suhu rendah dan sistem basah FGD dapat mencapai tingkat efisiensi penghilangan merkuri cukup tinggi dengan rata-rata 86,5%, yang menghasilkan merkuri dalam gas buang dengan konsentrasi $0,88 \text{ ug/m}^3$ (Ito, Yokoyama and Asakura, 2006). Oleh karena itu, teknologi *co-benefit* dapat mengendalikan polutan emisi udara dan menghilangkan merkuri yang efektif sebagai pengendalian pencemaran udara yang komprehensif.

Estimasi Kadar Merkuri di Udara Emisi Cerobong Boiler Berbahan Bakar Batu Bara pada Industri Kertas

Estimasi kadar merkuri dalam udara emisi cerobong boiler batu bara industri kertas dihitung sebagai berikut :

Kandungan merkuri (Hg) dalam batu bara Indonesia yaitu sebesar 0,020 – 0,0503 ppm (Tabel 4). Alat pengendali udara emisi yang

Tabel 6. Penangkapan Merkuri dengan berbagai Konfigurasi Peralatan Pengendali yang digunakan pada *Coal-Fired Boiler* (Leopold, 2002; Strivastava, 2010; UNEP, 2010; Wang *et al.*, 2010)

Strategi pengendalian	Konfigurasi peralatan pengendali	Rata-rata penangkapan merkuri (%)		
		Jenis batu bara		
		<i>Bituminous</i>	<i>Sub-bituminous</i>	Lignit
Hanya partikulat	CS-ESP	29 - 36	0 - 18	0 - 2
	HS-ESP	9 - 11	0 - 27	-
	FF	84 - 93	72- 73	-
	PS	-	9	-
Pengendalian partikulat dan <i>Spray Dryer Adsorber</i> (SDA)	SDA+CS-ESP	-	35	-
	SDA+FF	98	24	0
	SDA+FF+SCR	98	-	-
Pengendalian partikulat dan sistem <i>Wet FGD</i>	PS+FGD	12	0	33
	CS-ESP+FGD	75 - 78	16 - 29	44
	HS-ESP+FGD	39 - 49	8 - 29	-
	FF+FGD	97 - 98	-	-

Keterangan :

CS-ESP = *Cold Side Electrostatic Precipitator*; HS-ESP = *Hot Side Electrostatic Precipitator*; FF = *Fabric Filter*; PS = *Particulate matter Scrubber*; FGD = *Flue Gas Desulfurization*; SCR = *Selective Catalytic Reduction*

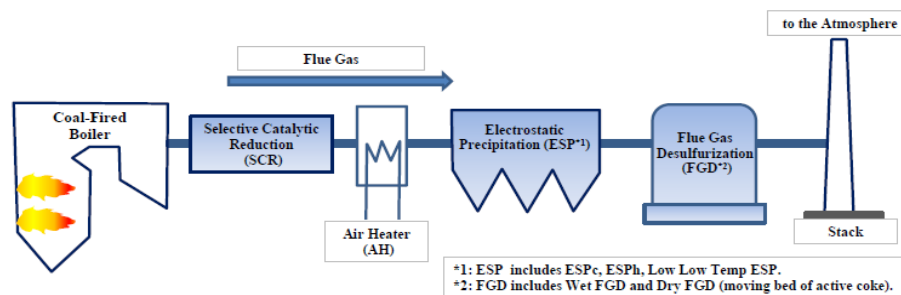


Figure 3. Process diagram of a typical configuration of coal fired power plant in Japan (Ito *et al.*, 2006)

Gambar 2. Pengendalian Emisi dengan Sistem Kombinasi SCR, ESP, dan FGD di *Coal Power Plant* di Jepang (UNEP, 2013)

digunakan di industri kertas adalah jenis *ventury wet scrubber* dengan efisiensi reduksi partikulatnya sebesar 95 – 99% (Tabel 1). Kadar merkuri yang diemisikan ke lingkungan dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 dengan asumsi efisiensi reduksi partikulat terendah sebesar 95% dan kadar merkuri maksimum 0,0503 ppm sebagai berikut :

$$\text{Kadar merkuri (ppm)} = (0,0503 \text{ ppm}) (100 - 95\%) = 0,0025 \text{ ppm}$$

$$\text{Kadar merkuri (mg/Nm}^3\text{)} = (0,0025 \text{ ppm}) (200,59) / 24,45 = 0,0205 \text{ mg/Nm}^3 = 20,5 \mu\text{g/Nm}^3$$

Bila dibandingkan dengan baku mutu emisi insinerator menurut Kep. Bapedal No. 03/Bapedal/09/1995 atau Kep.MENLH No.Kep.-13/MENLH//3/1995, Lampiran VB, nilai tersebut masih memenuhi baku mutu emisi. Namun, bila dibandingkan dengan baku mutu emisi dari negara maju seperti Amerika Serikat, Jepang dan China, nilai kadar emisi merkuri yang dibuang ke lingkungan tersebut masih belum memenuhi baku mutu (Tabel 3).

KESIMPULAN

Dalam pengendalian polutan emisi dari hasil pembakaran batu bara di *boiler*, industri kertas

telah memasang peralatan pengendali emisi *wet scrubber*. Industri kertas telah mengoperasikan boiler yang dilengkapi dengan peralatan pengendali emisi secara optimal sehingga kualitas emisi cerobong boiler untuk parameter non-merkuri telah memenuhi baku mutu emisi. Teknologi *co-benefit* dapat dipertimbangkan sebagai desain peralatan untuk mengendalikan polutan emisi udara dan menghilangkan merkuri yang efektif sebagai pengendalian pencemaran udara yang komprehensif. Estimasi kadar merkuri dalam udara emisi cerobong boiler batu bara industri kertas yang dibuang ke lingkungan berdasarkan kadar merkuri dalam batu bara maksimum sebesar 0,0025 ppm = 0,0205 mg/Nm³ = 20,5 µg/Nm³. Nilai estimasi kadar merkuri (Hg) masih memenuhi baku mutu emisi insinerator yang sudah ditetapkan lebih dahulu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada industri kertas yang diuji kualitas emisinya, penyelia, dan teknisi laboratorium uji udara Balai Besar Pulp dan Kertas (BBPK) atas segala bantuan tenaga dan sumbangan pemikirannya sehingga tulisan ini bisa dipublikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ansyori, I. (2011) 'Pengendalian emisi merkuri di cerobong industri pada penggunaan batu bara sebagai bahan bakar', *Ecolab*, 5(1), pp. 1–44.
- APKI, A. P. dan K. I. (2014) *Indonesian Pulp & Paper Industry Directory 2014.pdf*.
- Fatimah and Herudiyanto (2007) 'Kandungan sulfur dalam batubara Indonesia', *Buletin Sumber Daya Geologi*, 2(1), pp. 1–11.
- Galbreath, K. C. and Zygarlicke, C. J. (1996) 'Mercury Speciation in Coal Combustion and Gasification Flue Gases', *Environmental Science & Technology*, 30(8), pp. 2421–2426. doi: 10.1021/es950935t.
- Giang, A., Stokes, L. C., Streets, D. G., Corbitt, E. S. and Selin, N. E. (2015) 'Impacts of the minamata convention on mercury emissions and global deposition from coal-fired power generation in Asia', *Environmental Science and Technology*, 49(9), pp. 5326–5335. doi: 10.1021/acs.est.5b00074.
- Ito, S., Yokoyama, T. and Asakura, K. (2006) 'Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan', *Science of The Total Environment*, 368(1), pp. 397–402. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.09.044.
- Jones, M. L., Pavlish, B. M., Sollom, S. E. and Kay, J. P. (2007) *JV TASK 107 – Pilot scale emission control technology testing for constellation energy*.
- KLHK, K. L. H. dan K. (2015) *Memperluas perbaikan, memperkecil risiko*.
- Lee, S. (2007) 'Current Status of Mercury Regulation and Control Technology in Korea Korea Institute of Energy Research', (February).
- Leopold, B. R. (2002) *Use and release of mercury in the United States, Mercury*.
- NRDC (2012) *Summary of Recent Mercury Emission Limits for Power Plants in the United States and China*. Available at: <https://www.nrdc.org/resources/summary-recent-mercury-emission-limits-power-plants-united-states-and-china>.
- Pirrone, N. and Mason, R. (2008) *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere: Measurements, Models and Policy Implications Editors* :
- Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia (2006) *Batubara Indonesia*. Available at: www.tekmira.esdm.go.id (Accessed: 27 April 2012).
- Sloss, L. (2012) *Legislation, standards and methods for mercury emissions control*.
- Srivastava, R. K., Hutson, N., Martin, B., Princiotta, F. and Staudt, J. (2006) *Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers*. doi: 10.1021/es062639u.
- Strivastava, R. (2010) *Control of Mercury Emissions from Coal Fired Electric Utility Boilers: An Update, U.S. Environmental Protection Agency*. Available at: http://www3.epa.gov/airtoxics/utility/ord_whtpaper_hgcontroltech_oar-2002-0056-6141.pdf.
- UNEP (2010) *Process Optimization Guidance for Reducing Mercury Emissions from Coal Combustion in Power Plants*.
- UNEP (2013) *Minamata Convention on Mercury - Text and Annexes, UNEP*.
- UNEP (2015) *Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices to Control Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants and Coal-fired Industrial Boilers*. Available at: http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/BAT-BEP_draft_guidance/Coal_burning_power_stations_and_industrial_boilers.pdf (Accessed: 17 April 2017).
- Wang, S. X., Zhang, L., Li, G. H., Wu, Y., Hao, J. M., Pirrone, N., Sprovieri, F. and Ancora, M. P. (2010) 'Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3), pp. 1183–1192. doi: 10.5194/acp-10-1183-2010.

- Wang, Y., Duan, Y., Yang, L., Zhao, C., Shen, X., Zhang, M., Zhuo, Y. and Chen, C. (2009) 'Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases', *Fuel Processing Technology*, 90(5), pp. 643–651. doi: 10.1016/j.fuproc.2008.10.013.
- Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Bland, A. E. and Judkins, R. R. (2007) 'Adsorbents for capturing mercury in coal-fired boiler flue gas', *Journal of Hazardous Materials*, 146(1–2), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.113.