

KAJIAN PENGURANGAN SO_2 DAN NO_x DARI GAS BUANG HASIL PEMBAKARAN DENGAN AKSELERATOR

Sukarsono

Puslitbang Teknologi Maju BATAN, Yogyakarta

ABSTRAK

KAJIAN PENGURANGAN SO_2 DAN NO_x DARI GAS BUANG HASIL PEMBAKARAN DENGAN AKSELERATOR. Emisi gas nitrogen oksida dan sulfur oksida merupakan salah satu sumber pencemaran dan kerusakan lingkungan. Gas-gas tersebut disebut disebut gas asam, dapat menyebabkan hujan asam, efek rumah kaca secara tidak langsung, merusak hutan, menghancurkan hasil panen, merusak lahan pertanian dan kehidupan hewan, korosi bangunan dan menimbulkan masalah-masalah kesehatan. Pengurangan gas berbahaya dalam gas hasil pembakaran banyak dilakukan dengan penyerapan gas SO_2 , dikombinasi dengan proses pencegahan terjadinya gas NO_x melalui pembakaran ulang gas NO_x atau reduksi gas hasil pembakaran baik secara katalitik maupun tidak. Cara tersebut menimbulkan banyak limbah cair. Cara baru yang tidak menimbulkan limbah cair dan dapat menghilangkan NO_x dan SO_2 secara simultan dapat dilakukan dengan iradiasi menggunakan berkas elektron. Gas Hasil Pembakaran diiradiasi menghasilkan senyawa radikal yang memicu reaksi NO_x menjadi asam nitrat dan SO_2 menjadi asam sulfat yang apabila direaksikan dengan amoniak menghasilkan ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Kedua hasil samping dapat digunakan sebagai pupuk tanaman. Dengan proses baru ini biaya investasi lebih besar tetapi biaya operasional menjadi murah dan dihasilkan produk samping sehingga biaya keseluruhan menjadi murah.

ABSTRACT

REMOVING SO_2 AND NO_x FROM THE FLUEGAS BY ACCELERATOR. The emission of sulfur oxide and nitrogen oxide from fossil fuel burning is one of the sources of environmental pollution and environmental degradation. These gases are named as acid gases, causing acid rain, the indirect green house effect, damages forest, agriculture fields and flora, building corrosion and also caused many public health problems. Treatment of the dangerous gases is doing by scrubbing of SO_2 using calcium base combined by reburn NO_x process or catalytic/non catalytic reduction process for reducing NO_x in the flue gas. The new process was introduced. Using the electron beam machine, flue gas was irradiated, producing radical substances that make a reaction with NO_x and SO_2 to be nitric acid and sulfuric acid. By introducing ammonia in the gas phase, the acid will react with ammonia to be ammonium sulfate and ammonium nitrate. These by products is used as plant fertilizer. This new process needs higher investment cost and lower operational cost. The total cost of NO_x and SO_2 treatment of the new process is lower then the old process.

PENDAHULUAN

Emisi gas berbahaya dari alat proses atau pembakaran bahan bakar seperti SO_x (SO_2 dan SO_3) dan NO_x (NO , NO_2) merupakan sumber polusi lingkungan terbesar, yang berakibat pencemaran dan perusakan lingkungan. Gas-gas tersebut disebut gas asam, dapat menyebabkan hujan asam yaitu air hujan yang mengandung asam karena reaksi antara gas dengan air. Gas asam juga menyebabkan efek rumah kaca secara tidak

langsung. Hujan asam merusak hutan, menghancurkan hasil panen, merusak lahan pertanian dan kehidupan hewan, korosi bangunan dan menimbulkan masalah-masalah kesehatan^(1,2).

Emisi gas SO_2 dan NO_x

Peraturan tentang langit bersih yang digalakkan di banyak negara termasuk Indonesia menyebabkan keharusan bagi perusahaan untuk mengontrol polutan udara

dari plant mereka. Kebutuhan energi untuk tambahan proses ini sangat besar, karena kandungan polutan gas buang, besar dan bervariasi tergantung dari asal gas buang tersebut. Akibat peraturan-peraturan tersebut penyediaan energi untuk menghilangkan emisi polutan menjadi besar juga. Untuk pembatasan terhadap emisi gas berbahaya yang mengancam kelestarian lingkungan,

perlu ditetapkan oleh negara batas emisi yang diijinkan keluar dari plant tertentu⁽¹⁾.

Batas emisi gas berbahaya yang diijinkan untuk beberapa negara sangat bervariasi tergantung dari jenis plant, ukuran plant dan bahan bakar yang digunakan. Data tersebut dapat dilihat dalam tabel 1⁽¹⁾.

Tabel 1. Batas Emisi SO₂ dan NO_x dari beberapa negara

Negara	Plant baru (mg/Nm ³)		Plant lama (mg/Nm ³)	
	SO ₂	NO _x	SO ₂	NO _x
Australia	200-1.620	200-400	200-2.000	200-400
Canada	715	740	-	-
Denmark	400-2.000	650(200)	810	-
Finlandia	380-2.540	200-400	620-1.540	200-620
Perancis	400-2.000	650-1.300	400-2.000	-
German	400-2.000	200-500	400-2.500	200-1.300
Grase	200-2.000	650-1.300	400-2.000	-
Irlandia	400-2.000	650-1.300	-	-
Itali	400-2.000	200-650	400-2.000	-
Jepang	-	410-510	-	620-720
Polandia	540-1.755	460	675-4.160	-
Portugal	400-2.000	650-1.300	-	-
Spanyol	400-2.000	650-1.300	2.400-9.000	-
Swedia	160-540	140	160-920	(140-560)
Swis	430-2.145	200-500	430-2.145	200-500
Inggris	400-3.000	650-300	2.000-3.000	-
USA	750-1.480	615-980(550)	1480	-

Sumber energi dan dampaknya terhadap lingkungan

Di dalam bidang sumber energi, Indonesia mempunyai bermacam-macam sumber energi yang masih cukup banyak, tetapi beberapa sudah menipis cadangannya. Sumber sumber energi tersebut adalah minyak, batubara, gas alam, panas bumi, air, gelombang laut, beda panas laut, matahari dll. Minyak bumi yang pernah menjadi andalan di Indonesia pada masa lalu, cadangannya tercatat sebesar sekikar 10 milyar barrel (M bbl) dengan rincian 4,7 cadangan terbukti dan 5,02 M bbl merupakan cadangan potensial⁽³⁾. Cadangan tersebut dapat menyediakan

minyak bumi sampai 20 tahun dengan tingkat produksi 1,3 juta bbl per hari seperti saat ini. Tetapi apabila cadangan potensial tidak terbukti, maka dalam 7 tahun, cadangan minyak Indonesia akan habis ditambang⁽⁴⁾.

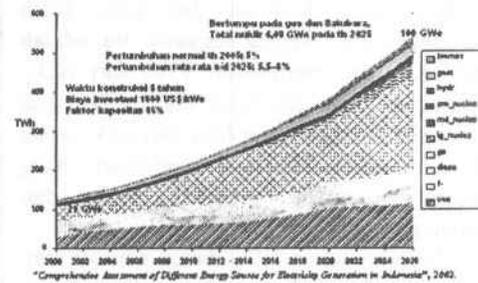
Produksi minyak mentah Indonesia 1,3 juta bbl/hari, dihasilkan oleh para KPS (Kontraktor *Production Sharing*) baik asing maupun domestik. Tetapi produksi oleh KPS domestik (Pertamina & Medco), hanya 0,14 juta bbl/hari dan sisanya oleh KPS asing. Setelah disisihkan sebagian untuk membayar ongkos produksi pada KPS, sisanya dibagikan (15% KPS, 85% pemerintah RI). Dari bagi hasil tersebut

perolehan pemerintah adalah : 700.000 bbl/hari. Kapasitas total kilang domestic saat ini sebesar 1,05 juta bbl/hari. Untuk keperluan kilang di Cilacap sejumlah 350.000 bbl/hari minyak mentah diimpor dari Arab. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan minyak bumi bagi kilang-kilang Indonesia, pemerintah masih mengimpor minyak dari luar negeri ⁽⁵⁾.

Bahan bakar lain yang masih potensial untuk digunakan, adalah gas alam. Cadangan gas alam Indonesia 39 milyar ton dan baru dimanfaatkan 5%. Sumber energi panas bumi tersedia 20.000 MW dan baru dimanfaatkan 1%. Cadangan gas bumi masih 178,1 trilyun CuFt. Sumber energi lain selain yang sudah disebut di atas, dapat dikatakan kecil untuk memenuhi kebutuhan energi yang semakin meningkat.

Pertumbuhan energi di Indonesia sebelum krisis moneter mencapai 15% ter tahun, dan terhenti pada waktu terjadi krisis moneter tahun 1997. Setelah melalui usaha yang keras, pada saat ini pertumbuhan energi diperkirakan 5%, yang diharapkan masih meningkat seiring dengan membaiknya keadaan ekonomi Indonesia.

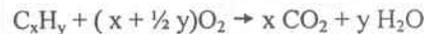
Salah satu sumber energi yang potensial untuk dikembangkan di Indonesia adalah batubara. Hanya sayang sebagian besar batubara Indonesia berupa lignit yaitu batubara muda. Batubara muda karena kandungan kandungan pengotor masih cukup besar kalau dibakar menghasilkan gas-gas yang bermacam-macam dan abu layang berupa debu yang lebih banyak. Untuk menjaga kelestarian alam, diperlukan biaya yang lebih banyak untuk mengolah gas buangan ini agar tidak berbahaya bagi lingkungan. Perkiraan konsumsi sumber energi dimasa yang akan datang dapat dilihat di Gambar 1 ⁽⁵⁾.



Gambar 1. Proyeksi Sumber Energi di Indonesia di Masa Yang Akan Datang

Gas-gas dalam gas buang.

Reaksi pembakaran adalah reaksi antara bahan bakar dengan oksigen dalam ruang pembakaran. Bahan bakar yang merupakan senyawa organik hidrokarbon bila dibakar menghasilkan gas CO₂ dan H₂O menurut reaksi :



Senyawa hidrokarbon yang bermacam-macam dan senyawa-senyawa lain yang ada dalam bahan bakar, menyebabkan hasil pembakaran tidak hanya karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) tetapi juga senyawa berbahaya seperti SO₂ dan NO_x. Kadar gas NO_x dan SO₂ dalam gas hasil pembakaran dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Emisi SO₂ dan NO_x dari bahan bakar

No	Asal gas Hasil Buang	Emisi SO ₂ (mg/m ³)	Emisi NO _x (mg/m ³)
1	Pembakaran Batubara	550-14.000	300-1.800
2	Pembakaran minyak ringan	125-1.300	
3	Pembakaran minyak berat	0-25	

Pembentukan gas NO_x dalam pembakaran bahan bakar

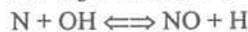
Emisi NO_x dari pembakaran dapat dijelaskan sebagai sebagai emisi nitrogen oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂).

Oksida yang dominan dan yang lebih berbahaya dari kedua senyawa itu adalah gas NO yang merupakan 95% dari NO_x. Meskipun juga terdeteksi N₂O dalam gas hasil pembakaran yang bisa merusak ozone di Stratosfir, tujuan pengelolaan NO_x adalah merubah menjadi NO₂ dan pengambilan gas tersebut⁽⁶⁾.

Pembentukan NO_x dalam pembakaran merupakan interaksi antara proses kimia, fisika dan panas berlangsung melalui 3 tahapan.

1. Pembentukan NO_x karena panas

Oksidasi nitrogen dalam atmosfer pada suhu tinggi membentuk radikal oksigen. Atom berreaksi dengan nitrogen menghasilkan NO

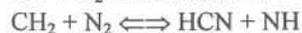


2. Pembentukan NO_x dari Bahan bakar

Pembentukan NO_x dari bahan bakar disebabkan adanya senyawa heterosiklik nitrogen yang ada dalam bahan bakar seperti piridin, piperidin dan guinolin yang terdapat dalam minyak dan rantai siklik maupun rantai terbuka nitrogen dalam batu bara. Senyawa-senyawa nitrogen ini yang menghasilkan gas NO. Jumlah maupun kecepatan pembentukan NO_x dari senyawa nitrogen tergantung dari ikatannya masing-masing.

3. Pembentukan NO_x cepat

Pembentukan NO_x ini terjadi karena reaksi nitrogen dan radikal hidrokarbon selama pembakaran. Pembentukan NO_x ini cepat terjadi pada pelepasan energi panas karena pembakaran. Sebagai permulaan terjadinya reaksi adalah pembentukan HCN sbb:



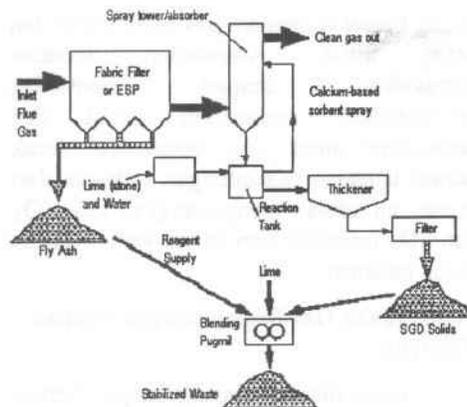
Selanjutnya HCN ini mereduksi senyawa nitrogen menjadi NO

Penghilangan gas-gas berbahaya dalam gas buang

Teknologi pengontrolan gas berbahaya dari suatu plant misalnya pembakaran batubara, bisa melalui dua jalan yaitu dengan modifikasi teknik pembakaran untuk mencegah terbentuknya atau penghilangan gas berbahaya yang ada dalam gas hasil pembakaran. Pencegahan terjadinya gas berbahaya, misalnya NO_x dilakukan dengan pembakaran kembali NO_x pada kondisi kekurangan udara dan dilanjutkan pembakaran pada suhu rendah untuk menyempurnakan reaksi. Sedangkan penanganan gas hasil pembakaran untuk mengurangi NO_x yaitu dengan teknik reduksi katalitis selektif (SCR) dan reduksi non katalitis selektif (SNCR). Penyerapan gas berbahaya juga dilakukan dengan menyerap gas tersebut dengan bahan penyerap melalui kontak antara gas yang mengandung gas berbahaya dengan cairan penyerap dalam kolom absorpsi^(1,2,6,7,8,9,10).

Skema proses pembersihan gas hasil pembakaran dapat dilihat dalam Gambar 2⁽⁷⁾.

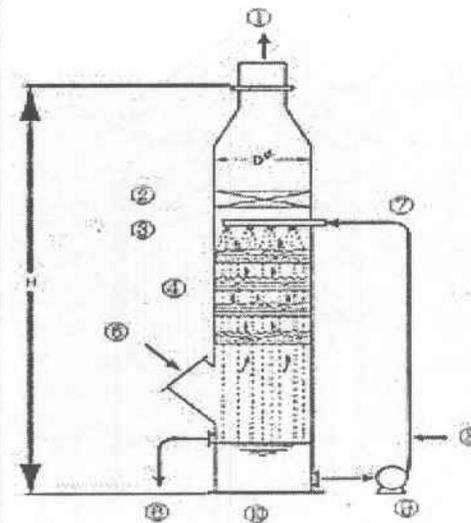
Abu layang yang terikut dalam gas hasil pembakaran dipisahkan dengan pemisah elektrostatis. Penyerapan gas berbahaya dalam gas hasil pembakaran dilakukan dengan cara mengkontakkan gas dengan penyerap kalsium hidroksida, yang mengikat gas menjadi senyawa kalsium sulfat dan kalsium nitrat. Dalam reaktor ini, reaksi disempurnakan dan kemudian dipompakan ke dalam tangki penganap sehingga kalsium sulfat mengendap. Setelah dipisahkan kalsium sulfat dicampur dengan abu layang dari pemisahan menggunakan pemisah elektrotatis.



Gambar 2. Bagan penyerapan gas berbahaya dengan penyerap cair

Pembakaran ulang NO_x adalah modifikasi proses pembakaran, sehingga pembentukan NO_x diminimumkan. Pembakaran ulang NO_x untuk mengurangi NO_x dalam hasil pembakaran dilakukan melalui 3 tahapan. Tahap pertama gas pembentukan gas NO dengan interaksi bahan bakar dengan udara, tahap kedua adalah penambahan bahan bakar di bawah kondisi reduksi (kekurangan oksigen) untuk memproduksi radikal hidrokarbon yang bereaksi dengan NO_x yang terbentuk, menghasilkan N_2 dan tahapan ketiga adalah penambahan udara pada suhu rendah untuk menyempurnakan pembakaran⁽⁶⁾.

Karena biaya proses penyerapan ini tinggi, dan hasil samping yang diperoleh yaitu gipsun tidak banyak digunakan, maka kebanyakan negara berkembang tidak menggunakan penyerap ini, kecuali pada untuk gas-gas mempunyai kandungan SO_x yang sangat tinggi.

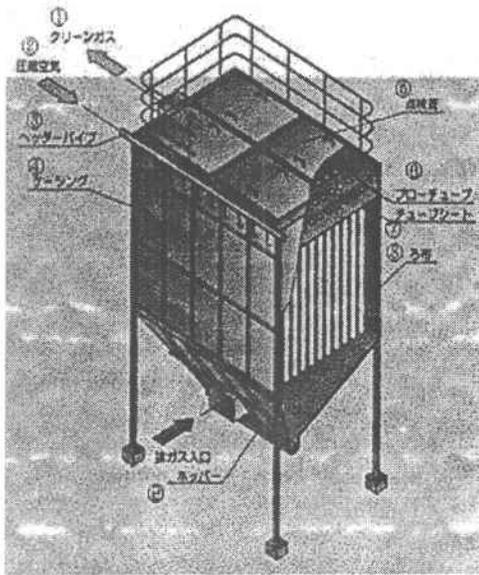


Keterangan

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Keluaran Gas | 6. Over Flow |
| 2. Pemisah butiran | 7. Re-sirkulasi |
| 3. Nozzle Penyemprot | 8. Aliran Cairan |
| 4. Plate Berlubang | 9. Pompa Sirkulasi |
| 5. Masukan Gas | |

Gambar 3. Alat penyerap gas berbahaya dalam gas hasil pembakaran

Untuk menjaga lingkungan dan mendukung program langit bersih, perlu didapatkan cara penyerapan gas-gas berbahaya tersebut dengan biaya yang murah. Mesin berkas elektron yang merupakan akselerator elektron dengan energi rendah, mempunyai prospek untuk memecahkan permasalahan tersebut. Mesin berkas elektron merubah gas-gas tersebut menjadi asam sulfat dan asam nitrat, kemudian diikuti dengan langkah kedua mereaksikan asam dengan ammoniak. Hasil yang diperoleh adalah ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Garam ammonium yang dihasilkan dapat berfungsi sebagai pupuk tanaman. Dengan demikian, proses ini mengubah bahan berbahaya menjadi bahan yang dibutuhkan petani untuk menyuburkan tanaman⁽²⁾.



Keterangan

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Gas Bersih keluar | 6. Tabung peniup |
| 2. Udara tekan | 7. Tabung Plate |
| 3. Pipa | 8. Kain Filter |
| 4. Casing | 9. Hopper |
| 5. Tutup pengecekan | |

Gambar 4. Penyaring gas hasil pembakaran

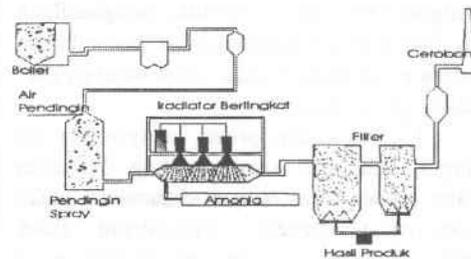
Beberapa perusahaan atau badan yang telah mulai mengembangkan metode ini diantaranya dikenal Proses Wellmann-Lord, proses batubara aktif, proses Walther dan Proses berkas elektron (electron beam /EB).

Proses pembersihan gas buang menggunakan mesin berkas elektron, melibatkan proses reaksi antara gas NO_x dan SO_x dengan bantuan berkas elektron yang dapat dijelaskan mekanismenya sbb: Gas SO_x dioksidasi oleh radikal OH menjadi HSO_3 yang cepat bereaksi menjadi hasil antara HSO_5 . Senyawa antara tsb. dengan adanya uap air dalam udara dapat bereaksi menjadi asam sulfat H_2SO_4 dan O_2H . Radikal ini mengoksidasi NO dan menghasilkan radikal untuk bereaksi selanjutnya. Sehingga Oksidasi SO_2 meningkatkan oksidasi NO_x menjadi $\text{NO}_2^{(1)}$. Dengan demikian konsumsi energi bisa rendah. Gas SO_2 , NO_2 , air dalam gas

buang bereaksi menjadi gas asam sulfat dan asam nitrat. Asam-asam tersebut direaksikan dengan amoniak menghasilkan ammonium sulfat dan ammonium nitrat yang bermanfaat untuk pupuk tanaman. Keuntungan terbesar dari proses ini adalah menghilangkan gas NO_x dan SO_x menghasilkan bahan yang berguna untuk tanaman.

Penanganan Gas Buang dengan Berkas Elektron

Penanganan gas buang dengan berkas elektron sangat efektif untuk menghilangkan sulfur dioksida (SO_2) dan Oksida-oksida nitrogen (NO_x) dari gas sisa hasil pembakaran secara simultan. Proses ini merupakan proses kering menggunakan iradiasi berkas elektron dengan penambahan ammonia untuk mengkonversi oksida-oksida sulfur dan nitrogen garam ammonia. Garam amoniak yang terbentuk serbuk mudah dipisahkan dengan menggunakan pengendapan elektron atau dengan filter kain. Garam amoniak berupa ammonium sulfat dan ammonium nitrat dapat digunakan sebagai pupuk tanaman.



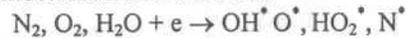
Gambar 5. Flow Diagram Penanganan Gas Buang dengan Berkas Elektron

Gas buang dimasukkan dalam bejana yang kemudian diiradiasi dengan berkas elektron sehingga gas buang tersebut terionisasi. Ion-ion yang terbentuk akan berinteraksi dengan komponen dalam gas buang menjadi atom bebas dan radikal seperti O, OH, N dan HO_2 . Atom bebas dan radikal tersebut berpotensi untuk bereaksi cepat dengan SO_2 , NO_x dan air menjadi

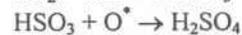
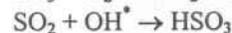
butiran halus dan uap asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3). Dengan adanya ammonia (NH_3) di sana, asam-asam akan bereaksi menjadi ammonium sulfat ($(NH_4)_2SO_4$) dan ammonium nitrat (NH_4NO_3).

Reaksi yang terjadi dalam proses penanganan gas buang dengan berkas elektron sbb:

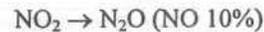
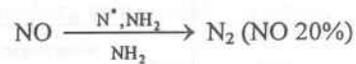
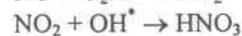
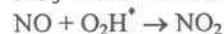
Pembentukan Radikal bebas



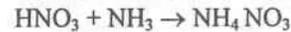
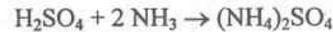
Oksidasi SO_2 dan pembentukan H_2SO_4



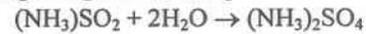
Oksidasi NO_2 dan pembentukan HNO_3



Reaksi asam dengan NH_3



Penghilangan SO_2 oleh panas



Penelitian penggunaan berkas elektron telah dimulai 30 tahun terakhir menggunakan gas simulasi dan akselerator untuk penelitian dengan daya kecil. Dimulai oleh Ebara Jepang, saat ini sudah sampai pada penggunaan akselerator skala industri dengan kecepatan alir gas $620.000 \text{ Nm}^3/\text{jam}$ setara dengan tenaga 220 MW menggunakan akselerator 800 KeV 400 KW per unit. Data akselerator penelitian yang pernah dibuat dapat dilihat dalam Tabel 3 dan untuk skala industri dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 3. Akselerator untuk eksperimen untuk penanganan gas buang

No	Tahun	Institusi		Kecepatan Alir Nm^3/jam	Akselerator KW/MeV	Type Gas Buang
		Nama	Negara			
1	1970-1971	Ebara	Japan	0.02	1.2/2-12	Simulated
2	1972-1974	Jaeri	Japan	60	15/1.5	Simulated
3	1974-1977	Ebara	Japan	1.000	30/0.750	Heavy oil
4	1977-1978	Ebara	Japan	10.000	90/0.750	Sinter plante simulated
5	1981	University of Tokio	Japan	84	0.12/1.0	
6	1984-1985	Research Cortrell	USA	5.300	80/0.800	Coal
7	1984-1988	Ebara	USA	24.000	160/0.800	Coal
8	1981-1991	Jaeri	Japan	0.9	/1.5	Heavy oil
9	1984-1988	KIK	FRG	300 - 1.000	3.6/0.300	Nat.gas
10	1984-1991	University Karlsruhe	FRG	1.000	22/0.220	Coal
11	1985-1989	Bedenwerk	FRG	20.000	180/0.300	
12	1989	KIK	FRG	1.500	16.5/0.550	Light oil
13	1991	INCT	Poland	20.000	100/0.700	Coal
14	1992	NKK/Jaeri	Japan	1.000	50/<1.000	Incinerator
15	1992	Ebara	Japan	50.000	80/0.800	Tunnel
16	1993	Ebara/Jaeri	Japan	12.000	108/0.800	Coal

Tabel 4. Akselerator penanganan gas buang untuk industri

No	Th	Institusi		Keterangan	Kec. Alir Nm ³ /jam	Produk Kg/j	Akselerator MW/MeV	Polutan, ppm	Efisiensi
		Nama	Negara						
1	1998	Chengdu Thermal Power Plant	China	1 seri dengan dua akselerator	300.000	2.470	640 kW/ 800 KeV 400 mA/unit	SO ₂ : 1.800 NO _x : 400 Dust	80% 10% <200 mg/m ³
2	1999	Pomorzeni Electric Power	Polandia	2 seri masing-masing 2 akselerator	275.000		1200 kW/ 800 KeV 300 kW/unit	SO ₂ : 5.500 NO _x : 390	85% 70 %
3	1999	Nishi-Nagara Thermal Power Plant	Jepang	3 seri masing-masing 2 akselerator	620.000	4.500	2400 kW/ 800 KeV		
4		CET –South Bucharest Project	Rumania	5 seri masing-masing 2 akselerator			4000 kW/ 800 KeV		

Tabel 5. Perbandingan Beberapa Proses Pengurangan gas NO_x dan SO₂

	Pembakaran Ulang	Penyerapan	Berkas elektron
Proses	Meminimumkan NO _x dengan pembakaran ulang NO _x menjadi N ₂	Penyerapan gas SO ₂ dengan basa Calcium menjadi gipsun	Aktivasi NO _x dan SO ₂ menjadi asam nitrat dan asam sulfat, direaksikan dengan amoniak
Keuntungan/kerugian	1. Sederhana 2. Menghilangkan NO _x 3. Kerugian Penyerapan basah 4. Lebih banyak limbah cair yang dihasilkan. 5. Biaya operasional tinggi	1. Sederhana 2. Menghilangkan SO ₂ 3. Penyerapan basah 4. Lebih banyak limbah cair yang dihasilkan. 5. Biaya operasional tinggi	1. Kompleks 2. Bisa simultan menghilangkan SO ₂ dan NO _x 3. Penyerapan : kering 4. Tidak dihasilkan limbah cair 5. Biaya Operasional rendah
Hasil samping	Hasil samping tidak ada	Hasil samping adalah gipsun, yang nilai ekonomis kecil	Ammonium sulfat dan ammonium nitrat nilai ekonomis tinggi (200.000 ton/th = 14 milyar \$/th untuk 550 Mwe plat)
Biaya investasi		Modal Pokok (\$/kW) 100-150 (Lama) dan (\$/kW) 70-150 (baru)	Biaya investasi 150-200 \$/Kwe
Biaya Operasional		Variabel O&M Us mills/kWj 1,5-3,3 (lama) 1,3 – 3,2 (baru), Total O&M Us mills/kWj 6,6-12 (lama) 7,4-13,0 (baru)	Biaya berkas elektron 2\$/W dan kira-kira 10% dari total investment.
Kemampuan membersihkan gas	Menghilangkan 60% NO _x	Menghilangkan 80-95 % SO ₂ (95-99 % dengan aditif Mg atau asam adipik)	Menghilangkan 90% SO ₂ dan 40-65 % NO _x
Plant yang ada		Kapasitas 1000 MW dengan boiler 360 KW	4000 kW/ 800 KeV

PEMBAHASAN

Pengurangan kadar gas berbahaya dalam gas buang hasil pembakaran telah dilakukan dengan berbagai cara. Cara pertama yang dilakukan adalah dengan cara preventif yaitu mencegah terbentuknya gas berbahaya dengan pembakaran kembali gas hasil pembakaran. Cara kedua adalah dengan pengelolaan gas hasil pembakaran seperti cara penyerapan, atau dengan pembentukan radikal bebas menggunakan berkas elektron agar terjadi reaksi menjadi gas stabil asam nitrat dan asam sulfat yang bisa direaksikan dengan amoniak menjadi ammonium sulfat dan ammonium nitrat.

Bila dibandingkan beberapa cara di atas, masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian masing-masing. Berkas elektron sekaligus menghilangkan SO_2 dan NO_x sedang proses penyerapan, kemampuan penyerap basa kalsium adalah menyerap gas SO_2 . Penyerapan gas NO_x tidak sempurna sehingga banyak yang masih terbawa oleh gas. Gas NO_x merusak lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan. Sehingga untuk mengurangi dampak NO_x tersebut, penyerapan SO_2 perlu dilengkapi dengan pengurangan terbentuknya NO_x . Cara yang sudah terbukti mengurangi kandungan NO_x dalam hasil pembakaran adalah dengan proses pembakaran kembali NO_x . Prinsipnya hasil pembakaran yang mengandung NO_x dilewatkan proses pembakaran dengan kekurangan oksigen, yang mendorong terbentuknya senyawa radikal yang memacu reaksi pembentukan N_2 . Pada tahap ketiga reaksi pada suhu rendah untuk menyempurnakan reaksi.

Penyerapan gas NO_x yang tidak memalui proses pembakaran ulang, bisa dilakukan dengan cara reduksi katalitis selektif atau reduksi non katalitis selektif. Tetapi cara ini lebih rumit, sehingga perlu biaya yang tinggi.

Penyerapan gas SO_2 merupakan proses penghilangan setelah pembakaran. Gas dikontakkan dengan cairan penyerap yang

mengandung bahan penyerap kalsium hidroksida. Reaksi akan terjadi antara gas SO_2 dengan kalsium hidroksida dan oksigen dari udara tekan yang dimasukkan dalam tangki sulfit. Endapan yang terbentuk adalah kalsium sulfat atau gipsun yang digunakan untuk keperluan bangunan. Untuk menghilangkan gas NO_x dan SO_2 , diperlukan kombinasi proses antara penyerapan NO_x menggunakan pembakaran kembali NO_x atau proses reduksi baik menggunakan katalisator maupun tidak, dan proses penyerapan gas SO_2 menghasilkan gipsun. Proses tersebut meskipun sederhana dan biaya investasi rendah, tetapi memerlukan biaya operasional yang lebih besar dan menghasilkan limbah cair yang cukup banyak. Perbandingan proses-proses tersebut sudah penulis rangkum dalam Tabel 5.

Proses penghilangan gas berbahaya menggunakan berkas elektron mempunyai banyak keuntungan. Proses penyerapan sepenuhnya menggunakan proses kering sehingga tidak menimbulkan limbah baru. Hasil sampingnya juga berupa ammonium nitrat dan ammonium sulfat yang dipergunakan sebagai pupuk. Proses juga dapat menghilangkan gas NO_x dan SO_2 secara simultan.

KESIMPULAN

1. Gas Hasil Pembakaran mengandung gas-gas berbahaya utamanya NO_x (NO , NO_2 , N_2O), SO_2 , SO_3 yang bisa menyebabkan hujan asam, merusakkan ozon di Stratosfir, merusakkan hutan atau tanah pertanian, menyebabkan korosi dan menyebabkan problem kesehatan bagi manusia dan hewan.
2. Gas NO_x dapat dikurangi dengan mencegah terjadi gas NO_x melalui pembakaran ulang dari gas hasil pembakaran dengan pengurangan udara yang menyebabkan terbentuknya radikal sehingga gas NO_x bereaksi menjadi N_2 , dilanjutkan dengan penyempurnaan reaksi dengan pemberian udara pada suhu rendah.

3. Penyerapan NO_x dalam hasil pembakaran dapat juga dilakukan dengan reaksi reduksi baik secara katalitis maupun non katalitis.
4. Penyerapan gas SO_2 dilakukan dalam kolom absorpsi dengan mengkontakkan gas hasil pembakaran dengan penyerap kalsium hidroksida, menghasilkan gipsun
5. Cara baru untuk penyerapan gas NO_x dan SO_2 secara simultan dilakukan dengan iradiasi gas dengan berkas elektron.
6. Penghilangan gas dengan berkas elektron memerlukan investasi yang lebih besar, tetapi biaya operasional lebih kecil sehingga biaya keseluruhan menjadi lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

1. TURHAN S., KARADENIZ S., TUGLUOGLU N., EKEN N., OKTAR O., DAN ERCAR I., Technical and Economical Aspects of SO_2 and NO_x Removal from Lue Gas By Electron Beam Irradiation, Ankara Nuclear Research and Training Center (ANRTC), Ankara, http://www.atom.gov.tr/taek/dudnaen/yayintar/yayintar_pdf/fundamental/fundamental-52.pdf.
2. Technology for SO_2 and NO_x , Reduction From Combustion Flue Gas By energetic Electron Induced Plasma Process And Electric Discharge <http://www.vonrollinc.com/downloads/fluegas.pdf>.
3. Maklumat, Minyak Bumi Indonesia cukup 22 tahun, Maklumat, 11 Februari 2004.
4. Kompas, Cadangan Minyak Bumi Hanya Cukup untuk 7 Tahun Lagi, Kompas 13 Desember 2003.
5. Deputi PTEN, Persiapan Batan Menghadapi Pembangunan PLTN, Presentasi Trainee, Hasil Penelitian dan Kegiatan P2PLR th 2003, Jakarta, 2004.
6. RADIAN CORPORATION, Summary Report : Control of NO_x Emission by Reburning, Emvironmental Protection Agency, Washington DC, 1996, <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs/625r96001/625r96001.pdf>.
7. THE WORLD BANK GROUP, Wet Flue Gas Desulfurification, <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/EA/mitigatn/aqsowet.htm>.
8. CHANG J.S., Integrated Electrostatic-Non-Thermal Plasma Flue Gas Clening Systems, Department of Engineering Physics, Hamilton.
9. MARITSA-East2.tpp.plg Flue Gas Desulphurization, MM2, <http://www.bulgaria.donino.bg/tec2/eng/tec2.6.htm>.
10. BEARDSWOTTH E., UFTO Note- E-Beam Stack Gas Scubbing.
11. ZIMEK Z., RZEWUSKI H., MIGDAT W., Electron Accelerators Installed at The Institute of Nuclear Chemistry and tecnonogy, Kronika Kola Naukowego Fyzykow CAMAC.