

## ANALISIS ASPEK TEKNIS DAN EKONOMIS PENGOLAHAN GAS BUANG DENGAN BERKAS ELEKTRON

Sudjatmoko

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN  
Jl. Babarsari, Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

### ABSTRAK

#### **ANALISIS ASPEK TEKNIS DAN EKONOMIS PENGOLAHAN GAS BUANG DENGAN BERKAS ELEKTRON.**

Masalah lingkungan yang diakibatkan oleh meningkatnya permintaan energi dunia telah menjadi masalah yang serius di berbagai negara. Emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dari pembakaran bahan bakar fosil pada pembangkit listrik dan industri adalah satu dari banyak sumber polusi lingkungan. Polutan tersebut dinamakan sebagai gas asam yang mengakibatkan hujan asam dan secara tidak langsung juga gas rumah-kaca yang menyumbang terjadinya efek rumah-kaca. Komponen gas buang yang beracun tersebut kadang-kadang bergerak lebih dari ribuan kilometer dan menjadi masalah di tempat lain, dan bahkan di negara lain. Oleh karena itu, masalah polusi udara menjadi masalah dunia. Pada saat ini banyak negara memasukkan peraturan pengendalian emisi yang lebih ketat untuk menyelesaikan masalah lingkungan. Teknologi pengolahan gas buang dengan berkas elektron adalah salah satu dari teknologi yang paling maju diantara proses generasi baru untuk pengendalian polusi udara. Proses berkas elektron ini adalah proses pembersihan kering dan membersihkan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  secara simultan dan produk sampingnya bermanfaat untuk pupuk pertanian. Dalam kajian ini dibahas aspek teknis dan ekonomis dari pengolahan gas buang dengan berkas elektron. Secara ekonomis teknologi tersebut cukup bersaing terhadap teknologi konvensional.

**Kata kunci :** Teknologi berkas elektron, pengolahan gas buang, emisi  $\text{SO}_2$ , emisi  $\text{NO}_x$ , efek rumah kaca

### ABSTRACT

#### **THE ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS OF ELECTRON BEAM FLUE GAS TREATMENT.**

Environmental problems caused by the increased world energy demands have become a serious problem in many countries. The emission of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  from fossil fuel burning for electricity generation and industrial plants is one of the major sources of environmental pollution. These pollutants are named as acid gases causing acid rain and also indirect greenhouse gases contributing greenhouse effect. These toxic components sometimes travel more than thousand kilometers and make a trouble in other places, in some cases, even in other countries. Therefore, the problem of the air pollution became world-wide problem. Today many countries are introducing more strict emission control regulations to solve invironmental problem. Electron beam flue gas treatment technology is one of the most advanced technologies among new generation processes for air pollution control. This electron beam process is dry scrubbing process and simultaneously removes  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  and useful by-product for agriculture fertilizer. In this study, the technical and economical aspects of electron beam flue gas treatment process are discussed. Economically, the technology is competitive with the conventional ones.

**Keywords :** Electron beam technology, flue gas treatment,  $\text{SO}_2$  emission,  $\text{NO}_x$  emission, green house effect

### PENDAHULUAN

Masalah lingkungan yang diakibatkan oleh meningkatnya permintaan energi dunia, terutama yang menggunakan bahan bakar fosil, telah menjadi masalah yang sangat serius di berbagai negara saat ini. Polutan yang diemisikan ke atmosfer seperti  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  terutama dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang berasal dari aktivitas industri, stasiun pembangkit energi listrik dan kendaraan bermotor<sup>(1,2,3,4,5)</sup>. Bahan bakar fosil tersebut terdiri dari batubara, gas alam, *petroleum* dan *bitumen* merupakan sumber utama energi listrik dan energi pemanas. Semua bahan bakar tersebut selain mengandung unsur-unsur utama (karbon, hidrogen dan oksigen) juga mengandung campuran logam, sulfur dan nitrogen. Selama proses pembakaran akan diemisikan berbagai jenis polutan seperti abu-layang, sulfur oksida ( $\text{SO}_2$  dan  $\text{SO}_3$ ), nitrogen oksida ( $\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$ ) dan campuran organik yang mudah menguap (*VOC : volatile organic compound*); sedangkan abu-layang mengandung unsur-unsur logam berat<sup>(5,6,7)</sup>. Polutan yang berada di atmosfer tersebut pada suatu kondisi tertentu dapat membahayakan manusia dan lingkungannya. Polusi udara yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil tidak hanya berdampak secara langsung pada lingkungan, tetapi juga oleh kontaminasi pada air dan tanah yang

akan mengakibatkan terjadinya degradasi lingkungan. Polutan tersebut juga mengakibatkan terjadinya hujan yang mengandung asam sulfat dan asam nitrat, dan lebih dikenal dengan istilah hujan asam (*acid rain*). Hujan asam tersebut akan mempengaruhi dan merusak danau dan rawa, sungai, tanah dan hutan yang kemudian akan menyebabkan degradasi lingkungan hidup<sup>(5,8,9)</sup>. Oleh karena itu dalam penyediaan energi berbasis bahan bakar fosil diperlukan adanya pembuatan undang-undang yang menetapkan batasan emisi suatu polutan.

Pada saat ini ada beberapa metode untuk mengendalikan emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  yang telah dikembangkan yaitu *wet flue gas desulfurization* (FGD) dan *selective catalytic reduction* (SCR). Teknologi konvensional FGD untuk  $\text{SO}_2$  dan SCR untuk  $\text{NO}_x$  tersebut telah dimanfaatkan secara luas di berbagai negara maju. Meskipun tingkat pembersihannya cukup tinggi, namun masih ada beberapa masalah yang dihadapi antara lain : limbah yang dihasilkan (gypsum, limbah air dan limbah katalis), masih terlampau mahal biayanya karena sistem FGD harus dikombinasi dengan sistem SCR untuk mengolah  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  secara simultan, katalis yang digunakan dalam sistem SCR harganya mahal dan harus diganti secara periodik, dan penerapannya memerlukan lahan yang luas<sup>(5,10,11)</sup>.

Suatu teknologi baru yang mulai diterapkan dalam skala industri adalah proses pembersihan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  menggunakan teknik iradiasi berkas elektron yang lebih dikenal dengan istilah *EBFGT* (*Electron Beam Flue Gas Treatment*). Dengan teknologi ini dapat mengurangi kadar polutan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  secara bersamaan sampai batas ambang aman untuk lingkungan. Proses pengolahan gas buang menggunakan iradiasi berkas elektron mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan proses konvensional (FGD dan SCR) antara lain: merupakan satu sistem proses kering yang kompak karena dapat mengolah  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  secara simultan dengan tingkat efisiensi tinggi, tidak memerlukan katalis, sangat cocok untuk pengolahan gas buang dengan kandungan  $\text{SO}_2$  yang tinggi dan membutuhkan air proses sedikit dibandingkan dengan FGD, ramah lingkungan karena proses akan mengubah polutan menjadi pupuk pertanian dan tidak menghasilkan limbah/polutan baru, lebih ekonomis ditinjau dari segi konstruksi dan operasi instalasi, serta pengaruh terhadap biaya produksi tenaga listrik relatif kecil bahkan ada kemungkinan berubah menjadi keuntungan bila pupuk dapat dikelola dengan baik, serta lahan yang dibutuhkan untuk instalasi relatif lebih kecil dibandingkan dengan teknologi sejenis yang lain<sup>(6,10,12)</sup>.

Dalam makalah ini dibahas tentang proses pengolahan gas buang dengan iradiasi berkas elektron, instalasi dari pengolahan gas buang dengan berkas elektron skala pilot dan industri, dan aspek ekonomis dari pengolahan gas buang tersebut. Proses pengolahan gas buang dengan teknik iradiasi berkas elektron merupakan proses yang canggih dan efisien untuk mengurangi secara simultan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dari gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil, khususnya pembangkit energi listrik batubara. Dengan demikian diharapkan tulisan ilmiah ini dapat memberikan sumbangan dalam mengatasi masalah polusi lingkungan terkait dengan beroperasinya beberapa buah PLTU batubara di Indonesia.

## BATAS EMISI GAS BUANG HASIL PEMBAKARAN BATUBARA

Jenis polutan yang diemisikan ke atmosfer sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar fosil yang digunakan dalam berbagai sistem pembangkit energi. Sebagai contoh, emisi  $\text{SO}_2$  yang tidak dikontrol dapat bervariasi antara  $550 \text{ mg/m}^3$  -  $14.000 \text{ mg/m}^3$  dari pembakaran batubara, antara  $125 \text{ mg/m}^3$  -  $1.300 \text{ mg/m}^3$  untuk pembakaran minyak ringan dan berat, dan antara  $0 \text{ mg/m}^3$  -  $25 \text{ mg/m}^3$  untuk pembakaran gas; sedangkan emisi  $\text{NO}_x$  dapat bervariasi antara  $300 \text{ mg/m}^3$  untuk gas alam dan  $1.800 \text{ mg/m}^3$  untuk batubara keras (*hard coal*)<sup>(1)</sup>. *Lignite* adalah sumber energi yang sangat umum dan digunakan dalam jumlah yang sangat besar di seluruh dunia untuk pembangkit listrik dan energi pemanas, karena harganya murah. Akan tetapi gas buang dari pembakaran *lignite* mengandung debu, air dan  $\text{SO}_2$  dalam jumlah yang sangat besar. Emisi debu dan  $\text{SO}_2$  per unit pembangkit panas dari pembakaran *lignite* adalah jauh lebih besar daripada pembakaran *bituminous coal*. Nilai kalor dari *lignite* kurang dari  $3.500 \text{ kcal.kg}^{-1}$  untuk komponen-C dan kandungan airnya lebih dari 20%, dan emisi  $\text{SO}_2$  ke atmosfer dapat mencapai lebih dari  $5.000 \text{ ppm}$ <sup>(6)</sup>.

Standar nasional atau batas emisi untuk  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  yang dipancarkan dari pembakaran batubara telah diperkenalkan pada awal 1970 di Amerika Serikat dan Jepang. Pada tahun 1980-an regulasi mengenai lingkungan menjadi sangat maju, lebih keras dan mengikat serta lebih tersiar kemana-mana. Batas emisi suatu polutan telah

ditetapkan di beberapa negara termasuk Indonesia, dan batas emisi tersebut bervariasi dari satu negara dengan negara lainnya untuk suatu pabrik atau sistem pembangkit energi yang sama. Bergantung pada situasi dan kondisi masing-masing negara, dimana batas emisi tersebut dapat berdasar pada jenis pembangkit energi (baru atau lama), besarnya sistem pembangkit energi dan bahan bakar yang digunakan. Batas emisi dari setiap negara bervariasi, sebagai contoh: 200 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> di Austria dan 2.000 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> di Australia untuk pembangkit energi yang sama<sup>(1)</sup>. Sejumlah negara telah menetapkan batas emisi polutan dari gas buang, namun hasil emisi tidak selalu memenuhi batas yang ditetapkan. Hal ini mendorong usaha untuk mendapatkan solusi yang murah guna mengendalikan kelebihan emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>.

Indonesia memiliki cadangan batubara sekitar 36,5 milyar ton atau sebanyak 3,1% dari seluruh cadangan dunia dengan kualitas *environment coal* (memenuhi baku mutu emisi tahun 2000) kurang dari 10%, sedangkan sisanya di atas 90% adalah *non environment coal* (tidak memenuhi baku mutu emisi). Cadangan tersebut di atas 67,5% terdapat di Sumatra dan 31,6% di Kalimantan, sedangkan sisanya tersebar di Jawa, Sulawesi dan Papua. Dari cadangan yang ada, sebanyak 21,3 milyar ton (58%) batubara dengan peringkat *lignite* dan 4,7 milyar ton (13%) peringkat *sub-bituminous coal* yang berkualitas rendah, sedang sisanya 5,2 milyar ton (14%) peringkat *bituminous coal* dan sebagian kecil 0,15 milyar ton (0,4%) berkualitas sangat baik untuk komoditas ekspor.

Pada saat ini peraturan perundang-undangan pencemaran udara yang berlaku di Indonesia adalah sebagai berikut.

- Baku mutu udara ambien berdasarkan Peraturan Pemerintah RI No. 41, Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara,
- Baku mutu udara ambien untuk SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dan *total suspended particulate* (debu),
- Baku mutu emisi sumber tak bergerak berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 13/Men.LH/13/1995. Baku mutu emisi sumber tak bergerak untuk jenis kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap berbahan bakar batubara adalah sebagai berikut, batas emisi maksimum 750 mg/m<sup>3</sup> untuk SO<sub>2</sub> dan 850 mg/m<sup>3</sup> untuk NO<sub>2</sub> (mulai berlaku pada tahun 2000).

Selain Kementerian Lingkungan Hidup, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral juga berperan aktif dalam hal konservasi lingkungan. Beberapa pendekatan telah diadopsi, seperti penggunaan bahan bakar bersulfur rendah : bensin dengan sulfur rendah (< 3,5%) dan batubara dengan sulfur rendah (< 1%); akan tetapi ke depan perlu dipertimbangkan penggunaan teknologi maju pengolahan gas buang hasil pembakaran batubara, yaitu teknik iradiasi berkas elektron untuk pengendalian emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> ke atmosfer.

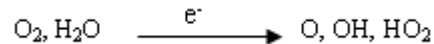
## PROSES PENGOLAHAN GAS BUANG DENGAN IRADIASI ELEKTRON

Proses pengolahan gas buang dengan teknik iradiasi berkas elektron merupakan suatu proses yang canggih dan efektif untuk mengurangi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> secara simultan dari gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil. Proses ini adalah suatu proses kering menggunakan iradiasi berkas elektron dalam lingkungan amoniak untuk memulai terjadinya reaksi kimia yang mengubah sulfur oksida dan nitrogen oksida menjadi aerosol yang dengan mudah dapat dikumpulkan dengan metode konvensional menggunakan *electrostatic precipitators* atau *bag house filter*.

Gas buang dialirkan masuk ke dalam suatu bejana proses, selanjutnya gas buang yang telah dicampur amoniak diradiasi dengan berkas elektron energi tinggi dengan jangkauan 0,8 – 1,2 MeV, terjadi tumbukan dengan molekul-molekul gas buang dan mengakibatkan terjadinya ionisasi molekul. Mekanisme reaksi untuk mereduksi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dalam gas buang dapat dijelaskan sebagai berikut.

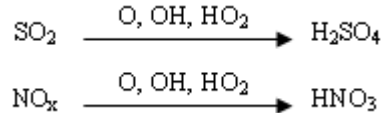
### Pembentukan Radikal

Energi berkas elektron yang terinduksi dalam gas buang terabsorpsi oleh komponen-komponen campuran gas sebanding dengan fraksi massanya. Oleh karena itu hampir semua energi elektron terabsorpsi oleh komponen-komponen utama gas buang, yaitu N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Reaksi pertama yang dihasilkan oleh iradiasi berkas elektron adalah ionisasi dan eksitasi, yang menghasilkan ion-ion positif, elektron dan radikal. Elektron-elektron membentuk ion negatif dan akan bereaksi dengan ion-ion positif menjadi netral dan menghasilkan radikal lainnya. Radikal yang terbentuk secara langsung dan proses dekomposisi ionik adalah OH, N, HO<sub>2</sub>, O dan H, dan terjadi secara berkesinambungan; sebagai contoh proses adalah sebagai berikut,



### Reaksi Radikal

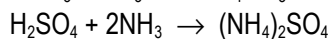
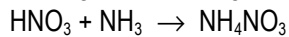
$\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  teroksidasi dan terkonversi menjadi asam sulfat dan asam nitrat oleh radikal-radikal yang dihasilkan oleh iradiasi berkas elektron pada gas buang yang mengandung uap air,



Beberapa radikal menghasilkan radikal-radikal yang lain melewati reaksi ini dan reduksi  $\text{NO}_x$  terutama terjadi melewati reaksi radikal, sedangkan reduksi  $\text{SO}_2$  terjadi terutama melalui proses lain yang disebut dengan reaksi termal.

### Reaksi Netralisasi

Dengan adanya amoniak yang diinjeksikan ke dalam bejana proses maka asam sulfat dan asam nitrat tersebut akan berubah menjadi ammonium sulfat  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  dan ammonium nitrat  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Garam-garam tersebut merupakan produk samping dari sistem pengolahan gas buang menggunakan iradiasi berkas elektron yang dapat digunakan sebagai pupuk pertanian.

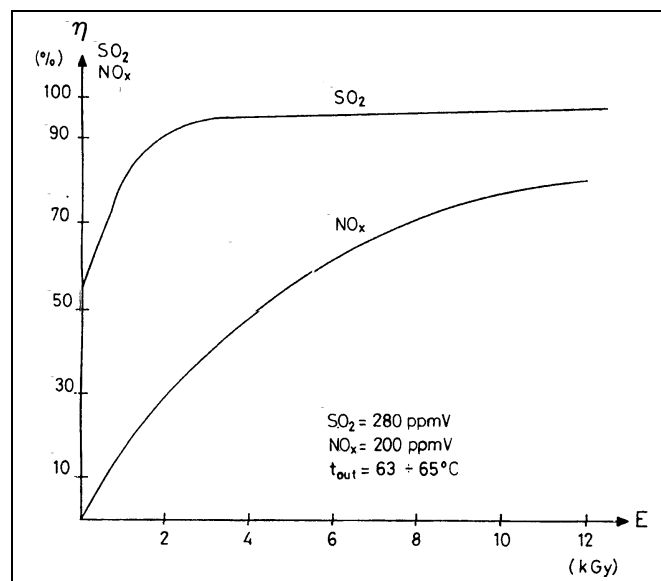


Jumlah  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dalam gas buang yang dapat direduksi (*removal efficiency*) setelah proses iradiasi berkas elektron dipengaruhi oleh beberapa parameter yang berbeda, antara lain adalah suhu dan kelembaban gas buang, dosis terserap, konsentrasi awal  $\text{NO}_x$ , energi dan daya berkas elektron. Ada dua proses yang mengakibatkan terjadinya reduksi  $\text{SO}_2$ , yang pertama adalah proses kimia yang juga disebut reaksi termal (*thermal reaction*) dan kedua adalah reaksi akibat radiasi (*radiation-induced reaction*) yang sangat bergantung pada suhu dan kelembaban gas buang, sedangkan *removal efficiency*  $\text{NO}_x$  bergantung terutama pada dosis<sup>(13)</sup>:

$$\eta_{\text{SO}_2} = f_1(\varphi, \alpha, T) + f_2(D, \alpha, T) \quad (1)$$

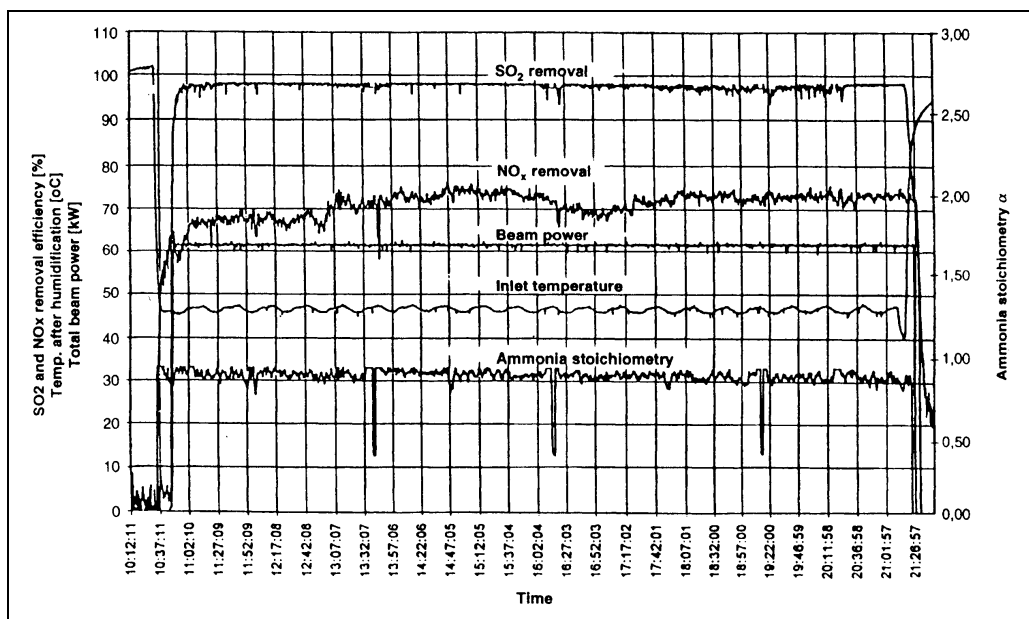
dimana  $\eta_{\text{SO}_2}$  adalah *removal efficiency*  $\text{SO}_2$  (%),  $\alpha$  adalah *ammonia stoichiometry* dan  $T$  adalah suhu gas buang (K). Sedangkan *removal efficiency*  $\text{NO}_x$  bergantung terutama pada dosis :

$$\eta_{\text{NO}_x} = \Delta\text{NO}_x / (\text{NO}_x)_0 = k_1 [1 - \exp(-k_2 D / (\text{NO}_x)_0)] \quad (2)$$



**Gambar 1.** *Removal efficiency* NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> versus dosis.

dimana  $(NO_x)_0$  adalah konsentrasi saat masuk (ppm),  $D$  adalah dosis (kGy), sedangkan  $k_1$  dan  $k_2$  adalah konstante empiris. Pada Gambar 1 disajikan *removal efficiency* NO<sub>x</sub> dan SO<sub>2</sub> versus dosis untuk nilai konsentrasi SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> dan suhu gas tertentu<sup>(13)</sup>. Karena reaksi termal yang terjadi maka *removal efficiency* SO<sub>2</sub> sangat bergantung pada suhu gas buang dan hanya diperlukan dosis yang rendah untuk mendapatkan *removal efficiency* SO<sub>2</sub> yang tinggi, dan kemudian nilainya konstan sekitar 98% meskipun nilai dosis semakin besar. *Removal efficiency* NO<sub>x</sub> sangat bergantung pada nilai dosis, dan pada dosis 4 kGy dihasilkan *removal efficiency* NO<sub>x</sub> hanya sekitar 48% sedangkan *removal efficiency* SO<sub>2</sub> telah mencapai 98%. Pada Gambar 2 ditampilkan data *removal efficiency* SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dari *Kaweczyn Pilot Plant* di Polandia saat beroperasi untuk kondisi operasi: kelembaban gas buang 15 vol% dan suhu 45 °C, daya berkas elektron sekitar 60 kW<sup>(13)</sup>. Di bawah kondisi operasi tersebut *removal efficiency* SO<sub>2</sub> 98% dan *removal efficiency* NO<sub>x</sub> dapat dicapai sekitar 70%.

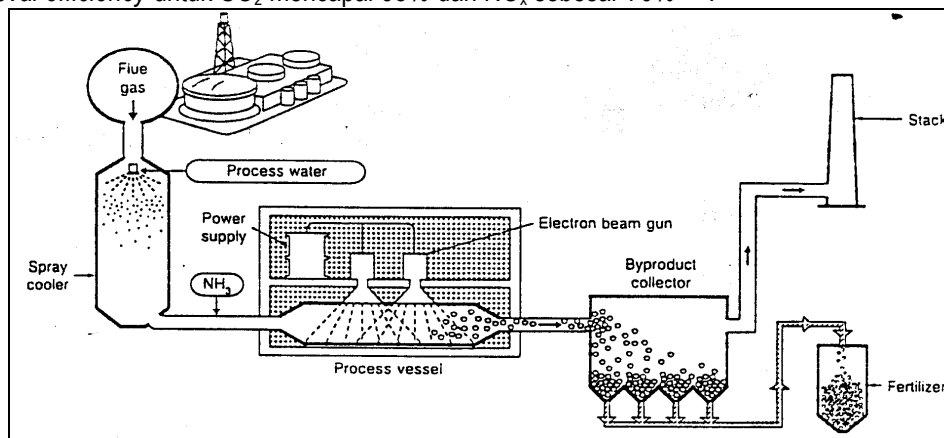
**Gambar 2.** *Removal efficiency* SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> pada kondisi operasi suhu gas buang 45 °C dan daya berkas 60 kW.

## INSTALASI SKALA PILOT DAN INDUSTRI PENGOLAH GAS BUANG

Potensi penggunaan radiasi untuk proses pengolahan gas buang dengan tujuan menghilangkan atau mengurangi gas-gas beracun seperti SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, untuk mencegah terjadinya polusi lingkungan, telah diperkenalkan oleh *Ebara Corporation* di Jepang sejak awal tahun 1970. Teknik tersebut selanjutnya secara bertahap dikembangkan dari skala laboratorium menjadi skala pilot dan skala demonstrasi yang besar atau skala industri oleh proyek-proyek riset dan pengembangan di Jerman, Jepang, Polandia, Amerika Serikat, China dan Brazil<sup>(14,15)</sup>. Skema proses berkas elektron untuk pengolahan gas buang ditampilkan dalam Gambar 3 di bawah ini<sup>(2)</sup>.

Sebuah fasilitas pengolahan gas buang menggunakan radiasi berkas elektron dalam skala pilot 12.000 Nm<sup>3</sup>/jam dengan tiga buah akselerator elektron telah dikonstruksi di Nagoya – Jepang hasil kerjasama antara JAERI, *Chubu Electric Company* dan *Ebara Cooperation*, dan telah beroperasi mulai bulan Nopember 1992. *Removal efficiency* untuk SO<sub>2</sub> mencapai 94% dan untuk NO<sub>x</sub> adalah 80% pada kondisi gas buang mengandung 800 ppm SO<sub>2</sub> dan 225 ppm NO<sub>x</sub><sup>(2)</sup>. Di Polandia, sebuah fasilitas pengolahan gas buang skala pilot dengan kapasitas 20.000 Nm<sup>3</sup>/jam dan menggunakan dua buah mesin berkas elektron telah dibangun di *Kaweczyn Power Station*, Warsawa. *Removal efficiency* untuk SO<sub>2</sub> (960 – 1.060 ppm) mencapai 85-95% dan untuk NO<sub>x</sub> (sekitar 50 ppm) adalah 72-80%<sup>(16)</sup>. Selain itu, fasilitas pengolahan gas buang skala industri telah dibangun di stasiun

pembangkit listrik Pomorzany – Szczecin, Polandia. Kapasitas gas buang yang diolah adalah  $270.000 \text{ Nm}^3/\text{jam}$  dengan *removal efficiency* untuk  $\text{SO}_2$  mencapai 95% dan  $\text{NO}_x$  sebesar 70%<sup>(11)</sup>.



**Gambar 3.** Skema proses berkas elektron untuk pengolahan gas buang.

Selain negara-negara tersebut di atas, China juga telah menginstalasi dua fasilitas pengolahan gas buang menggunakan berkas elektron, yang pertama adalah *Chengdu EBA installation* yang berlokasi di *Huaneng Chengdu Thermal Power Plant*, dan yang kedua adalah *Hangzhou EBA installation* di *Hangzhou Xielian Thermal Power Plant*, dan selesai dilakukan uji-coba oleh *China State Power Company* pada bulan Mei 1998. Di instalasi Chengdu, kapasitas gas buang yang diolah adalah  $300.000 \text{ Nm}^3/\text{jam}$ , dan *removal efficiency* untuk  $\text{SO}_2$  ( $1.800 \text{ ppm}$ ) mencapai 80% dan untuk  $\text{NO}_x$  ( $400 \text{ ppm}$ ) adalah 10%; sedangkan pada instalasi Hangzhou kapasitas gas buang yang diolah adalah  $305.400 \text{ Nm}^3/\text{jam}$ , dan *removal efficiency* untuk  $\text{SO}_2$  ( $2.767,6 \text{ mg/Nm}^3$ ) mencapai 85% dan untuk  $\text{NO}_x$  ( $200 \text{ ppm}$ ) adalah 55%<sup>(15)</sup>. Negara lainnya yang telah memanfaatkan radiasi berkas elektron untuk pengolahan gas buang adalah Bulgaria. Berdasarkan kontrak kerjasama yang telah ditanda-tangani oleh IAEA, JAERI Jepang dan NEK (*National Electropower Company*) Bulgaria telah melakukan konstruksi sebuah *pilot plant* berkas elektron untuk pengolahan gas buang, dan fasilitas tersebut telah beroperasi sejak bulan Januari 2004. Laju aliran gas buang  $10.000 \text{ Nm}^3/\text{jam}$  diiradiasi dengan tiga buah akselerator elektron yang masing-masing energinya 800 keV dan daya berkas elektron 35 kW. *Removal efficiency* untuk  $\text{SO}_2$  mencapai 98% dan untuk  $\text{NO}_x$  sebesar sekitar 86%<sup>(17)</sup>.

Teknologi iradiasi berkas elektron untuk pengolahan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  pada umumnya terdiri dari lima komponen utama, yaitu unit pendinginan gas buang (*spray cooler*), unit penyimpanan dan injeksi amoniak, sistem iradiasi (bejana proses dan mesin berkas elektron), unit pengumpul dan penyimpan produk samping, serta sistem instrumentasi dan kendali<sup>(10, 18)</sup>.

Sebelum memasuki instalasi pengolahan, gas buang yang dihasilkan oleh ketel-uap (*boilers*) dilewatkan pada unit ESP (*electrostatic precipitators*) untuk menghilangkan kandungan abu-layang. Selanjutnya gas buang dimasukkan ke unit *spray cooler*, dimana akan terjadi proses evaporasi air pendingin. Sebagai akibat proses ini, suhu gas buang menjadi lebih rendah hingga  $65 - 80^\circ\text{C}$  dan kelembabannya naik hingga 10 – 14% vol.

Dalam teknik iradiasi berkas elektron untuk pengolahan gas buang, amoniak adalah reagen proses utama yang dapat disimpan dalam bentuk amoniak cair. Amoniak tersebut diinjeksikan ke dalam sistem dengan dua teknik

- Amoniak diubah dalam bentuk gas setelah evaporasi, kemudian diinjeksikan ke dalam bejana proses,
- Amoniak dalam bentuk cair disemprotkan secara langsung ke dalam unit *spray cooler* menggunakan sistem *nozzles* yang terpisah.

Bergantung pada kondisi proses, konsumsi atau keperluan amoniak dalam bentuk cair dapat mencapai  $150 - 600 \text{ kg/jam}$ <sup>(10)</sup>.

Setelah injeksi amoniak, gas buang dialirkan ke dalam bejana proses dan dalam bejana ini terjadi proses iradiasi dan reaksi utama. Energi elektron mengakibatkan reaksi secara berturutan dan menghasilkan efek oksidasi pada  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$ , dan mengakibatkan terbentuknya aerosol ammonium sulfat dan ammonium nitrat.

Produk-samping aerosol tersebut dikumpulkan dengan menggunakan unit ESP (*electrostatic precipitator*), dan setelah proses granulasi (pembentukan butiran) dan disimpan, selanjutnya dikirim ke pabrik pupuk NPK. Produk samping tersebut terutama terdiri dari ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Selain itu juga terdapat ammonium klorida dan tak murnian lainnya seperti ammonium fluorida dan bagian yang tak larut lainnya (sisa abu-layang)<sup>(10)</sup>. Kandungan tak murnian atau pengotor tersebut sangat rendah sehingga produk samping mempunyai kualitas yang sangat baik untuk pembuatan pupuk yang bermanfaat dalam bidang pertanian.

### ASPEK EKONOMI PENGOLAHAN GAS BUANG DENGAN TEKNIK IRADIASI BERKAS ELEKTRON

Hingga saat ini para peneliti, konsultan dan suatu perusahaan telah membuat beberapa analisis biaya instalasi pengolahan gas buang menggunakan teknik iradiasi berkas elektron. Hasil analisis tersebut sangat berbeda jika dibuat perbandingan satu dengan lainnya, karena adanya perbedaan estimasi dan asumsi yang digunakan. Salah satu asumsi yang selalu digunakan adalah harga dari akselerator, karena harga peralatan dasar termasuk harga akselerator mencapai nilai 60% dari total biaya investasi. Harga akselerator elektron sendiri bergantung pada energi elektron, daya berkas, efisiensi kelistrikan dan ukuran fisik atau kompak-tidaknya akselerator yang digunakan. Secara umum, karena diperlukan tingkat efisiensi listrik dan tingkat daya berkas yang tinggi maka akselerator untuk pengolahan gas buang skala industri yang sesuai adalah akselerator dc (*direct current*) seperti akselerator transformer (*transformer accelerator*) dan akselerator induksi linier (*linear induction accelerator*).

Evaluasi ekonomi dan finansial meliputi biaya investasi dan biaya operasi dari fasilitas pengolah gas buang. Efek secara ekonomi dari instalasi radiasi dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, dan yang paling penting adalah sebagai berikut.

1. Biaya investasi (akselerator, peralatan pendukung, sistem monitor dan kendali proses, gedung termasuk perisai radiasi dan pembebasan tanah, persiapan proyek, *engineering*, prosedur *start up* dan validasi),
2. Biaya operasi (perawatan dan komponen, listrik, air, amoniak, biaya personil dan tenaga kerja, serta biaya administrasi),
3. Pemanfaatan berkas elektron dan penentuan dosis (*dose setting*).

Periode selama proses iradiasi terhenti akibat perawatan akselerator dapat menurunkan efisiensi fasilitas berkas elektron. Perawatan akselerator elektron biasanya berkaitan dengan penggantian komponen-komponen seperti *window foils*, katode sumber elektron atau peralatan elektronik yang umur pakainya terbatas.

Harga akselerator elektron untuk skala industri secara umum mempunyai jangkauan antara 0,5 – 5 juta dollar, bergantung pada jenis akselerator, energi elektron dan daya berkas rata-rata, jenis konstruksi dan fabrikasi. Harga relatif berhubungan dengan daya berkas rata-rata untuk konstruksi akselerator yang berbeda dan energi elektron diestimasi sebagai berikut<sup>(19)</sup>.

- *Transformer accelerators* : 2 – 25 \$/W (energi rendah dan medium),
- *HF accelerators* : 20 – 80 \$/W (energi medium dan tinggi),
- *UHF accelerators* : 30 – 150 \$/W (energi tinggi).

Biaya modal yang secara langsung berkaitan dengan harga akselerator dapat dituliskan dalam bentuk formulasi sebagai berikut<sup>(19)</sup>,

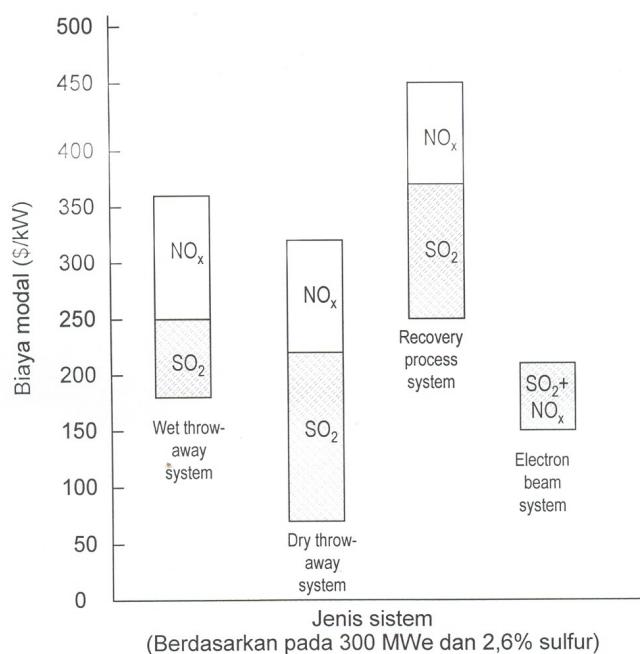
$$K_i = b \times K_a \quad (3)$$

dimana  $K_i$  adalah biaya modal,  $K_a$  adalah harga dari sebuah akselerator dan konstante  $b$  sekitar 3,2 untuk akselerator linier UHF 10 MeV/10 kW untuk sterilisasi radiasi, dan nilainya kira-kira 6,2 untuk sebuah akselerator untuk fasilitas industri *flue gas treatment* dengan daya berkas total 1,2 MW. Tabel 1 menampilkan biaya estimasi dari fasilitas industri EPS Pomorzany di Polandia<sup>(19)</sup>. Keseksamaan estimasi suatu fasilitas akselerator untuk industri tersebut sangat bergantung pada pengalaman fabrikasi atau pembuat akselerator.

Teknologi akselerator telah dipahami sebagai suatu peralatan untuk mengkonversi energi listrik menjadi energi pengion. Efisiensi penggunaan energi (*energy utilization efficiency*) secara langsung bergantung pada karakteristik proses, konstruksi akselerator dan penggunaan berkas elektron. Penggunaan energi listrik dengan efisiensi yang tinggi dapat mengurangi sejumlah besar polutan yang diemisikan selama proses pembakaran dalam sistem pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Berdasarkan optimasi dengan menggunakan hubungan antara energi elektron, arus berkas dan sifat material yang diradiasi diperoleh bahwa 1% dari daya listrik total dapat digunakan untuk reduksi polutan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  yang diemisikan oleh pembakaran batubara dalam proses pembangkitan energi listrik. Sebagai contoh dalam pembangkit listrik 100 MWe akan diperlukan sekitar 1.000 kW untuk daya berkas elektron. Keperluan daya yang tinggi tersebut dapat diberikan oleh lima hingga enam buah akselerator elektron dengan masing-masing daya 200 kW. Pada waktu yang akan datang dimungkinkan menggunakan akselerator dengan daya berkas yang lebih besar, sehingga dapat mengurangi jumlah akselerator yang dipasang dan mengurangi biaya investasi dari suatu proyek pada skala yang sama.

**Tabel 1.** Estimasi biaya investasi fasilitas industri EPS Pomorzany.

Spesifikasi	Harga (M\$)	Persentase Pembiayaan (%)
Akselerator	2,9	16,1
Penkondisian gas buang	0,7	3,9
Bejana iradiasi	0,4	2,2
Sistem penanganan produk samping	5,8	32,2
Sistem kontrol dan analisis	1,8	10,0
Rekayasa dan konstruksi	2,5	13,9
Transportasi, pemasangan, dll.	2,3	12,8
Pengeluaran tak terduga	1,6	8,9
<b>Total</b>	<b>18,0</b>	<b>100,0</b>



**Gambar 4.** Biaya modal untuk pengolahan  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dalam gas buang (\$/kW).



Dalam Gambar 4 disajikan biaya modal untuk pengolahan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dalam \$/kW dari beberapa jenis sistem pengolah gas buang yang berbeda <sup>(3)</sup>. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa biaya investasi dari proses pengolahan gas buang menggunakan teknik iradiasi berkas elektron adalah pada tingkat 190 – 210 \$/kW dari daya listrik yang terinstalasi dan sangat kompetitif terhadap sistem pengolah gas buang lainnya. Sedangkan untuk sistem pengolahan kering (*dry throw-away system*), sistem untuk reduksi  $\text{SO}_2$  dapat mencapai 220 \$/kW dan untuk  $\text{NO}_x$  mencapai sekitar 310 \$/kW .

## KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang telah diuraikan di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Pada saat ini masalah lingkungan yang diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan energi telah menjadi permasalahan yang sangat serius di berbagai negara. Untuk mengendalikan emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  dari suatu pembangkit listrik dan aktivitas industri yang menggunakan bahan bakar fosil perlu diterapkan penggunaan suatu teknologi yang dapat membersihkan atau mereduksi polutan tersebut secara simultan.
- Suatu teknologi baru yang mulai diterapkan dalam skala industri adalah proses pembersihan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  menggunakan teknik iradiasi berkas elektron yang lebih dikenal dengan istilah *EBFGT (Electron Beam Flue Gas Treatment)*. Dengan teknologi ini dapat mengurangi kadar polutan gas buang  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  secara bersamaan sampai batas ambang aman untuk lingkungan, serta diperoleh produk samping berupa ammonium sulfat dan ammonium nitrat. Kandungan tak murnian atau pengotor dalam produk samping tersebut sangat rendah sehingga produk samping mempunyai kualitas yang sangat baik untuk pembuatan pupuk yang bermanfaat dalam bidang pertanian.
- Evaluasi finansial untuk instalasi suatu fasilitas pengolahan gas buang menggunakan iradiasi berkas elektron meliputi biaya investasi dan biaya operasi. Biaya investasi terutama adalah harga akselerator elektron, peralatan pendukung, gedung termasuk perisai radiasi dan pembebasan tanah, sedangkan biaya operasi antara lain adalah biaya perawatan dan komponen, listrik, air, amoniak dan biaya personil. Secara ekonomis maka teknologi pengolahan gas buang menggunakan iradiasi berkas elektron cukup bersaing terhadap teknologi konvensional seperti FGD dan SCR

## DAFTAR PUSTAKA

1. CHMIELEWSKI, A.G., ILLER, E., TYMINSKI, B., ZIMEK, Z., and LICKI, J., Industrial Implementation of Electron Beam Flue Gas Treatment Process, Third International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe, Warsaw, Poland, 1996.
2. NAMBA, H., et al., Pilot-scale Test for Electron Beam Purification of Flue Gas from Coal Combustion Boiler, Radiation Physics Chemistry, Vol. 46, No. 4-6, (1995) 1103-1106.
3. PEI, Y.J., et al., "A low cost and high efficient facility for removal of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  in the flue gas from coal fire power plant", Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, (2001) 660-662.
4. SUDJATMOKO, "Kajian Reduksi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_x$  Dalam Gas Buang Hasil Pembangkit Listrik Batubara Menggunakan Radiasi Berkas Elektron", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Vol.8, Nopember 2006.
5. CHMIELEWSKI, A.G., Industrial applications of electron beam flue gas treatment – From laboratory to the practice, Radiation Physics Chemistry, 76 (2007) 1480-1484.
6. NAMBA, H., HASHIMOTO, S., TOKUNAGA, O., SUZUKI, R., Electron beam treatment of lignite-burning flue gas with high concentrations of sulfur dioxide and water, Radiation Physics Chemistry, 53 (1998) 673-681.
7. CHMIELEWSKI, A.G., SUN, Y.X., LICKI, J., BULKA, S., KUBICA, K., ZIMEK, Z.,  $\text{NO}_x$  and PAHs removal from industrial flue gas by using electron beam technology with alcohol addition, Radiation Physics and Chemistry, 67 (2003) 555-560.
8. CHMIELEWSKI, A.G., "Application of Ionizing Radiation in Environmental Protection", Proceedings of a Technical Meeting held in Sofia, Bulgaria, September 2004, IAEA-TECDOC-1473, Austria, December 2005.
9. LICKI, J., et al., Electron beam flue gas treatment for multi-component air pollution control, Applied Energy, 75 (2003) 145-154.
10. CHMIELEWSKI, A.G., et al., Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment, Radiation Physics Chemistry, 71 (2004) 439-442.
11. TYMINSKI, B., PAWELEC, A., "Economic Evaluation of Electron Beam Flue Gas Treatment", Proceedings of a Technical Meeting held in Sofia, Bulgaria, September 2004, IAEA-TECDOC-1473, Austria, December 2005.
12. RADOIU, M.T., MARTIN, D.I., CALINESCU, I., Emission control of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  by irradiation methods, Journal of Hazardous Materials, B97 (2003) 145-158.

13. CHMIELEWSKI A.G., TYMINSKI B., ILLER E., ZIMEK Z., AND LICKI J., Electron Beam Flue Gas Treatment Process Upscaling, Environmental Applications of Ionizing Radiation, John Wiley & Sons, Inc., 1998
14. CHMIELEWSKI, A.G., TYMINSKI, B., ILLER, E., ZIMEK, Z., and LICKI, J., Electron Beam Flue Gas Treatment Process Upscaling, Environmental Applications of Ionizing Radiation, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
15. MAO, B.J., "Process of Flue Gas Desulphuration with Electron Beam Irradiation in China", Proceedings of a Technical Meeting held in Sofia, Bulgaria, September 2004, IAEA-TECDOC-1473, Austria, December 2005.
16. CHMIELEWSKI, A.G., ZIMEK, Z., PANTA, P., and DRABIK, W., The Double Window for Electron Beam Injection Into The Flue Gas Process Vessel, Radiation Physics Chemistry, Vol. 45, No. 6, (1999) 1029-1033.
17. DOUTSKINOV, N., "Results of the Startup Operation of a Pilot Installation Electron Beam Flue Gases Treatment in the Maritsa East 2 Thermal Power Plant", Proceedings of a Technical Meeting held in Sofia, Bulgaria, September 2004, IAEA-TECDOC-1473, Austria, December 2005.
18. SUDJATMOKO, Aplikasi mesin berkas electron untuk pengolahan gas buang, Jurnal Iptek Nuklir Ganendra, Vo. IX, No. 2, (2006) 1-10.
19. ZIMEK, Z., Electron accelerators for environmental protection, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warszawa, 1998.