

THE EFFECT OF IRRADIATION DOSE AND AMMONIA CONCENTRATION ON THE APPLICATION OF ELECTRON BEAM FOR TREATMENT GASES POLLUTION OF SO₂ AND NO_x

Pengaruh Dosis Iradiasi dan Konsentrasi Gas Ammoniak dalam Aplikasi Berkas Elektron untuk Penanganan Gas Polutan SO₂ dan NO_x

Erizal*

Centre for the Application Technology of Isotopes and Radiation, National Nuclear Energy Agency
Jl. Cinere Ps. Jumat, PO BOX 7002 JKSKL, Jakarta 12070

Received 13 April 2007; Accepted 1 June 2007

ABSTRACT

The application of electron beam for treatment gases pollution of SO₂ and NO_x has been studied. The simulated SO₂ and NO_x gases stream produced from diesel fuel burning boiler were flown into electron beam chamber. Irradiation was conducted using 1000 keV electron beam machine at the dose up to 8.8 kGy, while water vapour and the ammonia gas with variation concentration flew into the system during irradiation. The concentrations of the gases change were observed during processes. After evaluation, it was found that by increasing irradiation dose, the concentration of SO₂ and NO_x gases removal increases. The efficiency of gases removal may reach 98 % for SO₂ and 88 % for NO_x at a dose of 8.8 kGy. By increasing ammonia concentration, the efficiency gas removal increases. Besides, by-products from the irradiation yield were sulfate and nitrate salt compound which are possible to be used as a fertilizer.

Keywords: radiation, electron beam, gas pollution, SO₂, NO_x, ammonia

PENDAHULUAN

Pencemaran udara khususnya yang berasal dari emisi gas SO₂ dan NO_x merupakan salah satu masalah lingkungan yang sangat serius pada beberapa tahun belakangan ini dan terjadi hampir di seluruh dunia baik di negara maju maupun berkembang [1-4]. Emisi gas SO₂ telah lama diketahui dapat memberikan pengaruh yang sangat merugikan pada kesehatan manusia dan lingkungan. Jika gas tersebut terisap dalam konsentrasi yang relatif besar oleh manusia akan menyebabkan terjadinya gangguan pada sistem pernafasan, serta mengganggu sistem kerja jantung. Selain daripada itu, gas SO₂ juga dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan. Akumulasi gas SO₂ di udara menimbulkan hujan asam yang dapat merusak kondisi air danau dan air sungai, merusak dedaunan pada tumbuh-tumbuhan, dan produk hasil pertanian. Lebih jauh lagi, pengendapan hujan asam akan mempercepat kerusakan pada dinding-dinding gedung-gedung dan monumen, sedangkan gas NO_x dapat merusak sistem lapisan ozon pada atmosfer.

Salah satu sumber pencemar udara gas SO₂ yang terbesar berasal dari pembakaran batubara, baik yang digunakan untuk keperluan industri maupun pembangkit tenaga listrik. Sebagai contoh, suatu pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas 500 MW membutuhkan 250-300 ton batubara per jam. Emisi gas SO₂ ke lingkungan dapat mencapai puluhan ton per jam, tergantung pada kandungan sulfurnya (bervariasi antara 0,2-10 %) [5]. Secara konvensional, untuk mengatasi

masalah pencemaran udara gas SO₂ pada umumnya dilakukan dengan proses teknologi kering dan basah, sedangkan untuk pemrosesan gas NO_x dilakukan berdasarkan reaksi katalitik [4, 6-8]. Walaupun tingkat pengurangan konsentrasi pencemar relatif tinggi yang telah dicapai dengan teknologi ini. Namun demikian, masih ada masalah dalam penanganan limbahnya (gypsum, air buangan dan katalis), biaya tambahan untuk penanganan pencemar dan ruang yang dibutuhkan relatif besar untuk memenuhi persyaratan dalam proses skala industri.

Mesin berkas elektron adalah suatu sumber iradiasi yang mengeluarkan pancaran berkas elektron. Jika dibandingkan dengan sinar γ , penetrasinya jauh lebih rendah. Hal ini disebabkan bahwa radiasi berkas elektron merupakan partikel, sedangkan sinar γ merupakan gelombang elektromagnetik [9]. Oleh karena itu, aplikasi berkas elektron pada umumnya digunakan untuk proses pelapisan permukaan, polimerisasi/grafting, sterilisasi, pengawetan makanan dan untuk degradasi senyawa-senyawa organik [10-13]. Ditinjau secara kimia, gas SO₂ dan NO_x merupakan gas-gas yang mempunyai densitas relatif rendah (mudah ditembus cahaya) dibandingkan zat padat. Oleh karena itu jika gas-gas ini diiradiasi berkas elektron akan terjadi interaksi kimia sehingga merubah struktur molekulnya. Berdasarkan hal-hal tersebut, dalam artikel ini dilaporkan hasil penelitian mengenai pengaruh iradiasi berkas elektron dan pengaruh konsentrasi ammonia terhadap gas SO₂ dan NO_x, dengan tujuan untuk mengolahnya menjadi produk

* Email address : izza3053 @ yahoo.com

yang bermanfaat menggunakan radiasi berkas elektron dapat dipakai sebagai teknologi alternatif disamping teknologi konvensional.

METODE PENELITIAN

Bahan

Gas SO_2 dan NO_x masing-masing dengan konsentrasi 1370 ppm dan 170 ppm diperoleh dari hasil pembakaran minyak diesel (*diesel fuel*) produksi ASSAM, Saudi Arabia. Gas NH_3 dengan kemurnian $\pm 85\%$ dan uap air dengan konsentrasi 20-25% digunakan dalam keadaan basah. Kalibrasi dosis iradiasi dilakukan menggunakan film dosimeter CTA (*Cellulose Three Acetate*).

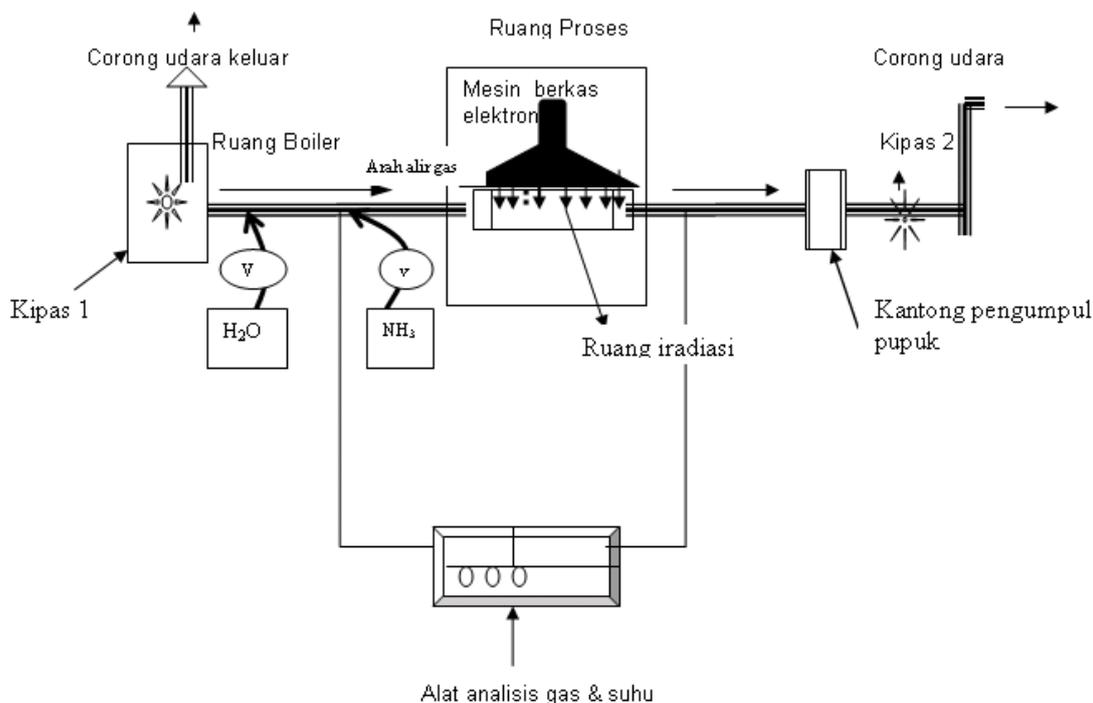
Alat

Boiler yang terdiri atas *gun fire* dan ruang pembakaran untuk membakar minyak diesel, buatan Polandia. Kipas angin untuk pendingin gas dari boiler. Pompa elektrostatis dipakai untuk mengisap gas-gas yang tidak bereaksi dan produk-produk sisa yang tertinggal dalam ruang iradiasi. Sumber berkas elektron ILU-6 dengan energi 1000 keV. Konsentrasi gas SO_2 dan NO_x , serta suhu ruang iradiasi dimonitor menggunakan *Thermo Environmental Instruments. Portable gas analyzer, Lancom series II, Land Combustion Company* digunakan untuk analisis gas-gas N_2 , CO_2 , O_2 , SO_2 , NO_x , dan H_2O hasil pembakaran minyak diesel.

Prosedur Kerja

Pengujian pengaruh dosis iradiasi terhadap penurunan dan efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x

Skema proses iradiasi gas buang disajikan pada Gambar 1. Gas SO_2 dan NO_x dihasilkan dari pembakaran minyak diesel pada suhu 450°C dalam ruang boiler. Sebelum gas ini mengalir ke ruang iradiasi melalui pipa alir, gas dikondisikan hingga suhu 200°C menggunakan kipas dan selanjutnya dialirkan ke dalam (*inlet*) ruang iradiasi dengan laju alir $2\text{ m}^3/\text{jam}$. Sebagian dari gas yang dihasilkan dari boiler dibuang ke udara melalui pipa cerobong udara. Dalam pipa saluran, gas hasil pembakaran didinginkan dengan mengalirkan uap air yang bertujuan untuk menurunkan suhu gas hingga suhu ruang iradiasi $\pm 170^\circ\text{C}$. Selanjutnya gas diiradiasi dengan berkas elektron dalam ruang iradiasi dengan dosis; 3,5; 5,3 dan 8,8 kGy (laju dosis $1,70\text{ kGy/pass}$) dan konsentrasi NH_3 750 ppm (laju alir $9,8\text{ L/jam}$), suhu inlet $171,9^\circ\text{C}$ dan suhu outlet $49,9^\circ\text{C}$. Perubahan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x serta suhu selama proses iradiasi berlangsung pada setiap dosis iradiasi diukur menggunakan alat *thermo environmental instrument analyzer* baik yang mula-mula masuk ke dalam (*inlet*) maupun ke luar (*outlet*) dari ruang iradiasi. Selama proses iradiasi berlangsung ke dalam ruang iradiasi dialirkan gas NH_3 dengan tujuan untuk mengubah

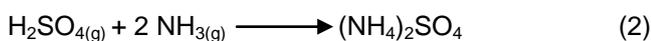
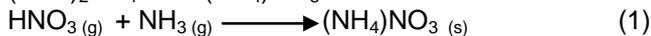


Gambar 1. Skema proses iradiasi gas buang SO_2 dan NO_x menggunakan mesin berkas elektron ILU-6 energi 1000 keV, Institute of Nuclear and Technology, Warsaw, Polandia

produk hasil iradiasi yang berupa asam nitrat dan asam sulfat menjadi garam $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dan $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$. Produk $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dan $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$ hasil iradiasi yang berupa serbuk putih diisap dari ruang iradiasi menggunakan pompa elektrostatis dan dikumpulkan dalam kantong pengumpul dan gas sisa hasil iradiasi dibuang ke udara melalui corong.

Pengujian pengaruh konsentrasi NH_3 terhadap efisiensi pengurangan konsentrasi SO_2 dan NO_x

Gas NH_3 merupakan salah satu zat yang penting dalam proses pengolahan gas buang SO_2 dan NO_x , karena gas NH_3 berfungsi untuk menetralkan asam-asam (HNO_3 dan H_2SO_4) yang dapat menyebabkan korosi pada ruang iradiasi dihasilkan dari proses iradiasi. Konsentrasi NH_3 (ppm) yang dibutuhkan untuk menetralkan asam-asam tersebut dihitung berdasarkan persamaan stokiometri reaksi kimianya (persamaan 1 dan 2). Hitungan stokiometri ini terdiri dari konsentrasi NH_3 yang dibutuhkan untuk menetralkan H_2SO_4 hasil iradiasi SO_2 dan konsentrasi NH_3 yang dibutuhkan untuk menetralkan HNO_3 hasil iradiasi gas NO_x yang masing-masing menghasilkan garam $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dan $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$.



Mengingat reaksi-reaksi ini pada umumnya terjadi dalam fasa gas, maka untuk menghitung konsentrasi gas digunakan persamaan gas ideal sebagai berikut

$$PV = nRT \quad (3)$$

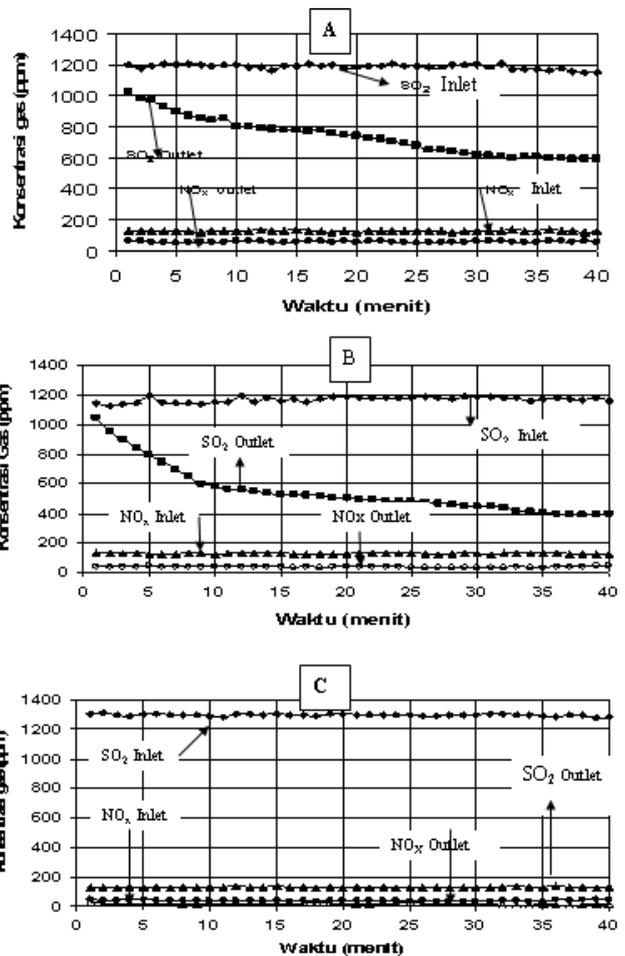
P = tekanan (atm), V = volume gas (l), n = mole gas, R = konstanta gas, T = suhu (K)

Dengan demikian dapatlah diperoleh konsentrasi gas NH_3 yang dibutuhkan untuk menetralkan asam-asam hasil iradiasi. Jumlah konsentrasi NH_3 yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan asam-asam tersebut disebut juga sebagai NH_3 stokiometri yang dinyatakan juga dalam bentuk persen terhadap jumlah konsentrasi gas SO_2 dan NO_x yang akan diiradiasi [14]. Dalam penelitian ini dialirkan NH_3 dari tangki dengan variasi konsentrasi 770 ppm, 1155 ppm dan 1540 ppm ke dalam ruang iradiasi pada dosis iradiasi 3,5 kGy, dan efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x selama proses iradiasi berlangsung diamati dengan selang waktu 40 menit untuk setiap kenaikan konsentrasi NH_3 .

HASIL DAN PEMBAHASAN

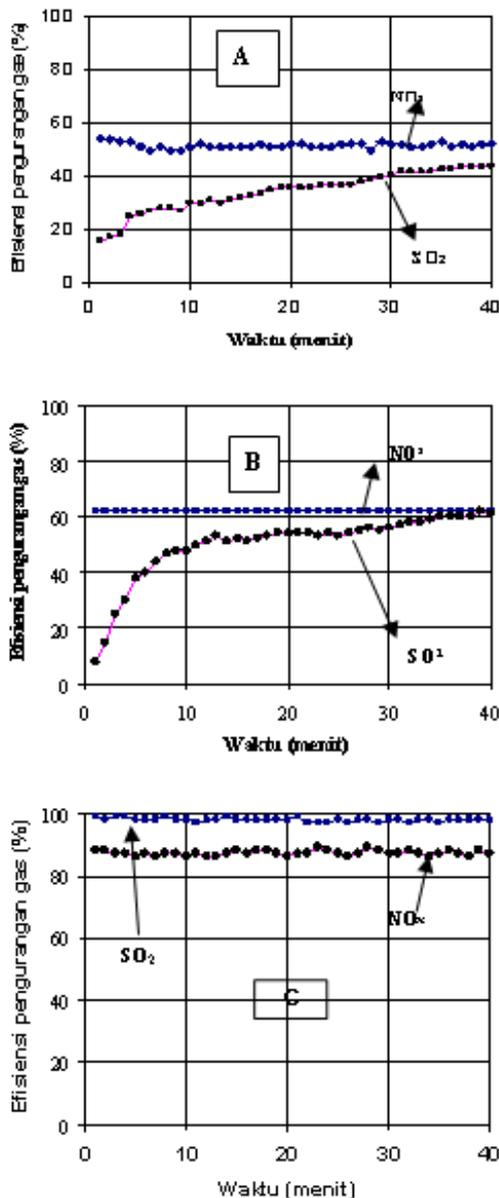
Pengaruh iradiasi berkas elektron terhadap konsentrasi gas SO_2 dan NO_x

Pada Gambar 2 disajikan pola hasil pengukuran konsentrasi gas SO_2 dan NO_x yang masuk (inlet) dan keluar (outlet) setelah diiradiasi dalam ruang iradiasi. Konsentrasi gas diukur selama proses iradiasi pada masing-masing dosis 3,5; 5,3; dan 8,8 kGy dengan



Gambar 2. Pola hasil pengukuran konsentrasi gas SO_2 dan NO_x yang masuk (inlet) dan keluar (outlet) dari ruang iradiasi berkas elektron dialiri gas $\text{NH}_3 = 770$ ppm. Gas diiradiasi pada dosis : (A) 3,5 (B) 5,3 dan (C) 8,8 kGy

selang waktu 40 menit. Terlihat bahwa perlakuan dosis iradiasi 3,5 (Gambar 2a) dan 5,3 kGy (Gambar 2 b), pada awal pengukuran terjadi penurunan konsentrasi gas SO_2 (outlet) yang relatif besar 100-200 ppm, kemudian proses ini secara perlahan-lahan (gradual) menurun mencapai keadaan konstan dengan nilai konsentrasi SO_2 akhir sebesar 600 dan 400 ppm. Pada dosis 8,8 kGy, di awal pengukuran terjadi penurunan konsentrasi SO_2 yang relatif besar mencapai ± 8 ppm, dan nilai ini tetap hingga pengukuran 40 menit. Terjadi pengurangan konsentrasi SO_2 yang relatif besar dibandingkan gas SO_2 yang masuk (inlet) ke dalam ruang iradiasi yaitu sekitar 1200 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa iradiasi pada dosis 8,8 kGy memberikan hasil pengurangan konsentrasi SO_2 yang maksimal. Pada Gambar 2 juga terlihat bahwa dengan naiknya dosis iradiasi hingga 8,8 kGy konsentrasi gas NO_x yang mula-mula masuk kedalam ruang iradiasi sebesar 170 ppm keluar dari ruang



Gambar 3. Hubungan antara efisiensi pengurangan gas SO_2 dan NO_x terhadap waktu iradiasi berkas elektron, konsentrasi $\text{NH}_3 = 770$ ppm. Gas diiradiasi pada dosis (A) 3,5 (B) 5,3 dan (C) 8,8 kGy

iradiasi turun mencapai ± 20 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi gas NO_x tergantung pada dosis iradiasi.

Pengaruh dosis iradiasi terhadap efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x

Dalam aplikasi berkas elektron, efisiensi pengurangan konsentrasi gas merupakan hal yang sangat penting untuk dipertimbangkan karena berkaitan erat dengan energi yang listrik yang dipakai. Makin kecil nilai efisiensi untuk mengurangi konsentrasi gas, makin besar biaya operasional yang diperlukan atau

sebaliknya. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan efisiensi dalam pengolahan gas buang ini. Efisiensi pengurangan gas didefinisikan sebagai konsentrasi gas yang berkurang akibat iradiasi berkas elektron pada keadaan tertentu (*output*) per konsentrasi gas awal yang masuk ke dalam ruang iradiator (*input*) dihitung dengan sbb. ; :

$$\text{Efisiensi pengurangan gas} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (4)$$

C_0 = Konsentrasi gas awal yang masuk ke dalam ruang iradiasi (ppm) dan C_1 = Konsentrasi gas yang ke luar dari ruang iradiasi diukur pada dosis iradiasi tertentu (ppm)

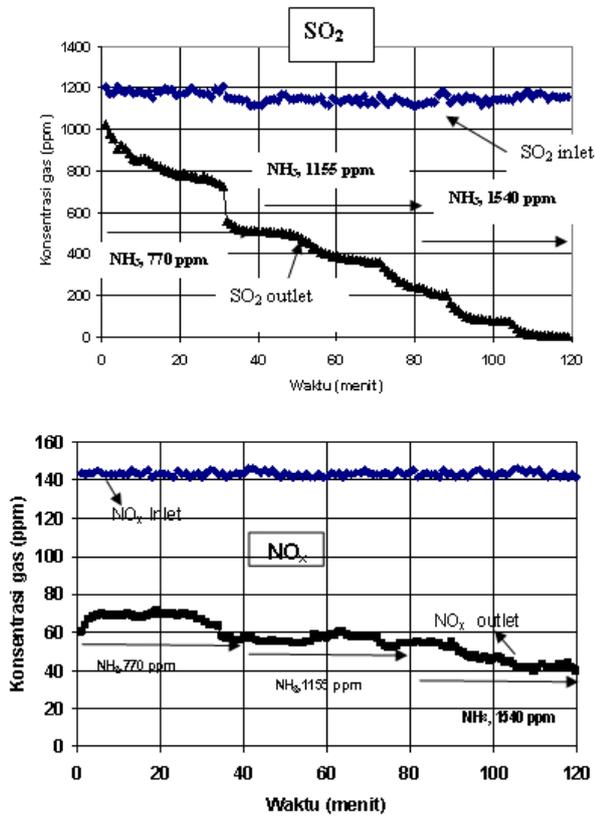
Pada Gambar 3 disajikan hubungan antara efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x terhadap dosis iradiasi. Terlihat bahwa iradiasi pada dosis 3,5 kGy, efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 relatif lebih kecil (40%) dibandingkan gas NO_x (50%), dan pada dosis 5,3 kGy efisiensi pengurangan gas SO_2 relatif sama besar dengan gas NO_x mencapai nilai 65 %. Naiknya dosis iradiasi hingga 8,8 kGy, efisiensi pengurangan gas mencapai 98 % dan gas NO_x mencapai nilai 88 %. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi pengurangan gas NO_x pada dosis rendah (3,5 dan 5,3 kGy) dipengaruhi oleh dosis iradiasi dibanding efisiensi pengurangan gas SO_2 .

Pengaruh konsentrasi NH_3 terhadap penurunan dan efisiensi pengurangan gas SO_2 dan NO_x

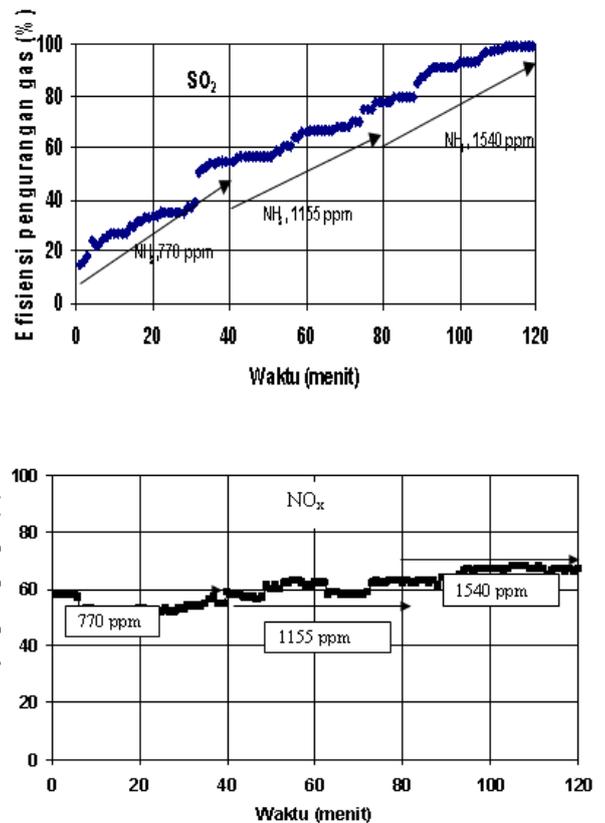
Pada Gambar 4 dan 5 disajikan pengaruh konsentrasi NH_3 terhadap penurunan dan efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO_2 dan NO_x pada dosis 3,5 kGy. Terlihat bahwa dengan naiknya konsentrasi NH_3 hingga 1540 ppm, penurunan serta efisiensi pengurangan konsentrasi SO_2 terjadi dengan sangat signifikan dibandingkan penurunan dan efisiensi pengurangan konsentrasi NO_x yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pengurangan konsentrasi SO_2 sangat dipengaruhi oleh konsentrasi NH_3 dalam proses iradiasi berkas elektron. Namba melaporkan bahwa reaksi pengurangan konsentrasi gas NO_x bersifat sebagai reaksi radikal, sedangkan reaksi pengurangan gas SO_2 selain sebagai akibat reaksi radikal juga terjadi akibat reaksi thermal [16]. Reaksi *thermal* ini terjadi disebabkan gas SO_2 dapat langsung bereaksi dengan gas NH_3 , yang hal ini tidak terjadi pada reaksi antara gas NO_x dengan NH_3 . Hal ini yang mungkin menyebabkan penurunan konsentrasi SO_2 yang relatif besar di awal iradiasi, karena sebagian dari gas SO_2 langsung bereaksi dengan gas NH_3 . Reaksi-reaksi pengurangan gas NO_x dan gas SO_2 adalah dapat dijelaskan pada uraian berikut :

a. Pengurangan NO_x

Reaksi kimia yang terjadi pada proses iradiasi berkas elektron terhadap gas buang adalah sebagian



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi NH₃ terhadap penurunan konsentrasi SO₂ dan NO_x yang diiradiasi pada dosis 3,5 kGy diukur pada variasi konsentrasi NH₃ : 770; 1155; dan 1540 ppm masing-masing diukur pada selang waktu 40 menit.



Gambar 5. Pengaruh konsentrasi NH₃ terhadap efisiensi pengurangan Konsentrasi gas SO₂ dan NO_x yang diiradiasi pada dosis 3,5 kGy Diukur pada variasi konsentrasi NH₃ : 770; 1155; 1540 ppm, masing-masing diukur pada selang waktu 40 menit.

besar energi elektron yang dipanacarkan diserap oleh komponen utama gas buang yaitu nitrogen, oksigen, uap air membentuk banyak spesi aktif tetapi yang paling dominan dalam proses ini adalah radikal OH, O, OH₂. Kemudian spesi aktif ini akan bereaksi baik dengan gas SO₂ maupun NO_x. Reaksi-reaksi yang terjadi pada pengaruh berkas elektron dalam pengurangan gas NO_x adalah berdasarkan reaksi gas NO dengan radikal HO₂ diubah menjadi gas NO₂. Reaksi yang terjadi adalah

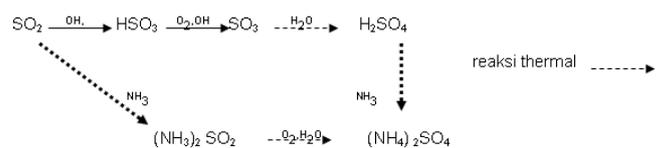
$$\text{NO} + \text{HO}_2 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{OH} \quad (5)$$

$$\text{NO}_2 + \text{OH} \longrightarrow \text{HNO}_3 \quad (6)$$

$$\text{HNO}_3 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3 \quad (7)$$

b. Pengurangan SO₂

Reaksi pengurangan gas SO₂ dapat terjadi melalui 2 cara, yaitu gas SO₂ dioksidasi melalui reaksi radikal OH dan O₂ membentuk SO₃, selanjutnya melalui reaksi *thermal* dioksidasi menjadi asam sulfat dan akhirnya diubah menjadi ammonium sulfat dengan adanya gas NH₃. Reaksi bentuk lainnya adalah gas SO₂ langsung bereaksi dengan ammoniak secara *thermal* membentuk (NH₃)₂SO₂ dan akhirnya membentuk ammonium sulfat. Reaksi yang terjadi pada pengurangan gas SO₂ dapat dijelaskan sebagai berikut :



Chmielewski *et al.* melaporkan bahwa efisiensi pengurangan konsentrasi SO₂ tidak hanya dipengaruhi dosis iradiasi dan konsentrasi NH₃, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu ruang iradiasi [14]. Kenaikan suhu akan mempercepat kenaikan pengurangan konsentrasi gas SO₂. Hal lain yang mempengaruhi efisiensi pengurangan konsentrasi gas yaitu besar-kecilnya energi berkas elektron yang diabsorpsi gas. Hal ini disebabkan pada proses iradiasi, sebagian energi dari berkas elektron akan berkurang karena adanya udara disekitar sumber berkas elektron, dan penyerapan energi pada dinding ruang iradiasi. Ketidakhomogenan gas yang masuk ke dalam ruang iradiasi juga mempengaruhi efisiensi khususnya pada konsentrasi gas yang relatif besar. Faktor ini mungkin yang menyebabkan iradiasi pada dosis rendah (3,5 - 5,5 kGy) pada konsentrasi NH₃ 770 ppm terhadap efisiensi pengurangan konsentrasi SO₂ relatif rendah atau sebab lain yang perlu diteliti lebih lanjut.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapatlah disimpulkan bahwa iradiasi berkas elektron dapat diaplikasikan untuk mengurangi konsentrasi gas buang baik SO₂ maupun NO_x secara efektif. Dengan naiknya dosis iradiasi hingga 8,8 kGy, persentase efisiensi pengurangan konsentrasi gas buang mencapai 98 % bagi pengurangan gas SO₂ dan 88 % bagi pengurangan konsentrasi gas NO_x. Naiknya konsentrasi NH₃ hingga 1540 ppm pada dosis iradiasi yang relatif rendah 3,5 kGy dapat menyebabkan kenaikan yang signifikan dalam efisiensi pengurangan konsentrasi gas SO₂ hingga ± 100 % dibanding gas NO_x yang kenaikan efisiensi pengurangan mencapai 70 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada Prof. dr. Hab inz Michalik, Direktur Institute of Nuclear and Technology, Ul. Dorodna 10, 03-195, Warsaw, Polandia yang telah memberikan kesempatan pada saya untuk melakukan penelitian dan DR. A. Pawelec, yang telah banyak membantu sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. IAEA dengan nomor kontrak C6/INS/05014 yang telah memberikan bantuan finansial serta Ir. Sugiharto APU yang telah banyak memberikan saran untuk perbaikan makalah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Tokunaga, O, Arai, H., and Hashimoto, S., 1992, *Proceedings of International Conference in Beam Applications*, 5-8
2. Pikaev, A.K., 1992, *Proceedings of the International Conference on Evolution in Beam application*, 15-18
3. Effendi, E.S., dan Wahid, A., 1995, *Kompas* 30 Juni 1995. 19
4. Ravi, K.S, Wojciech, J., and Carl, S, 2001, SO₂, *Environmental Progress*, 20 ,4 ,219-227
5. Markovic, V., 1987, *IAEA Bulletin*, 29,2,25
6. Alstom, A., 2004, *PEI magazine*, 36-37
7. Sedman, C.B., 1999, *Chem. Eng.*, 106,1, 82-88
8. Feeney, R., 1995, *Power*, 139, 8, 32-37
9. Dahlan, K.Z., 1990, *JAERI-M*, 90, 194, *JAERI , Japan*, 24
10. Saunders, C., Lopata, V., Barnard, J., Stepanik, T., 2000, *Radiat. Phys. and Chem.*, 57, 441-445
11. Lopata, V., Saunders, C., Singh, A., Janke, C, Wrenn, E.G., and Haven, J., 1999, *Radiat. Phys. Chem.*, 56, 405-415
12. Sun, Y.X., Hakoda, T., Chmielewski, A.G., Hashimoto, S., Zimek, Bulka, S., Ostapezuk, and Nichipo, H., 2001, *Radiat. Phys. and Chem.* 62, 353-360
13. Chmielewski, A.G., Sun, Y.X., Bulka, S., and Zimek, Z., 2004, *Radiat. Phys. Chem.* ,71, 437-440
14. Chmielewski, A.G., Licki, J., Pawelec, A., Tyminski, B., and Zimek, Z., 2004, *Radiat. Phys. Chem.*, 71, 441-444
15. Tokunaga, O., 1998, *Sci. Techn. In Japan*, 64, 47-50
16. Namba, H., 1995, *Radiat. Phys. Chem.* ,17-21