

PENENTUAN KEDALAMAN PENETRASI BERKAS ELEKTRON 800 keV DALAM GAS BUANG PLTU PADA SISTEM PENGOLAHAN GAS BUANG MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON

RANY SAPTAAJI

*Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan
Badan Tenaga Nuklir Nasional - BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 1008, Yogyakarta 55010*

Abstrak

PENENTUAN KEDALAMAN PENETRASI BERKAS ELEKTRON 800 keV DALAM GAS BUANG PLTU PADA SISTEM PENGOLAHAN GAS BUANG MENGGUNAKAN MESIN BERKAS ELEKTRON. Dalam tulisan ini disajikan hasil perhitungan kedalaman penetrasi berkas elektron 800 keV dalam bahan gas buang (*flue gas*) dari PLTU berbahan bakar batu bara. Proses *Electron Beam for Flue Gas Treatment* (EB-FGT) adalah proses pengolahan kering gas buang menggunakan berkas elektron yang secara simultan dapat mereduksi SO₂ dan NO_x. Iradiasi gas buang menghasilkan radikal-radikal aktif dan bereaksi dengan SO₂ dan NO_x membentuk asam sulfat dan asam nitrat. Dalam proses pengolahan ini dibutuhkan bejana proses yang berfungsi sebagai tempat/wadah terjadinya reaksi antara gas buang dengan berkas elektron. Untuk menentukan dimensi bejana proses perlu ditentukan/dihitung kedalaman penetrasi berkas elektron pada gas tersebut. Secara perhitungan diperoleh kedalaman penetrasi optimum berkas elektron 800 keV kedalam gas buang adalah 188,67 cm.

Kata kunci: gas buang, berkas elektron 800 keV, penetrasi, bejana proses.

Abstract

DETERMINATION OF PENETRATION DEPTH OF 800 keV ELECTRON BEAM INTO COAL FIRED POWER PLANT FLUE GAS AT IN A ELECTRON BEAM MACHINE FLUE GAS TREATMENT SYSTEM. Penetration depth calculation of 800 keV electron beam into flue gas from coal fired power plan is presented in this paper. Electron Beam for Flue Gas Treatment (EB-FGT) is a dry treatment process using electron beam to simultaneously reduce SO₂ and NO_x. Flue gas irradiation produces active radicals and then reaction with SO₂ and NO_x produces nitrate acid and sulphate acid. Process vessel is needed in this process as reaction container of flue gas with electron beam. The calculation of electron beam penetration depth into flue gas is used to determine the process vessel dimension. The result of calculation of optimum penetration depth of 800 keV electron beam into flue gas is 188,67 cm.

Keywords: flue gas, electron beam 800 keV, penetration, process vessel.

PENDAHULUAN

Indonesia termasuk salah satu penghasil batu bara di dunia (3,1% dari seluruh cadangan dunia). Kondisi batubara yang dihasilkan mempunyai kadar sulphur kurang dari 0,5% hanya sekitar 10% dari hasil total, sedangkan sebagian besar (90%) mempunyai kadar sulphur di atas 0,5%. Berdasarkan hasil evaluasi cadangan batubara nasional terutama dari cadangan lokasi eksplorasi PT Bukit Asam, dalam 10 sampai 20 tahun mendatang diperkirakan batubara dengan kadar belerang 0,7% masih tersedia dalam jumlah yang banyak^[1]. Sayangnya batubara dengan kadar belerang yang tinggi jika digunakan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menimbulkan gas beracun seperti SO₂ dan NO_x yang melebihi batas baku mutu emisi (BME 2000) yaitu maksimal 750 mg/m³ untuk SO₂ dan 850 mg/m³ untuk NO_x^[1]. Emisi gas buang dari pembakaran batubara yang tidak memenuhi BME dalam suatu PLTU akan menghasilkan SO₂ dan NO_x yang dapat menimbulkan polusi udara.

Emisi gas buang SO₂ dan NO_x ke udara dari aktivitas industri berat dan terutama dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak bumi pada pembangkit listrik merupakan salah satu sumber polusi dalam skala besar. Reaksi yang terjadi di udara akan menyebabkan hujan asam yang berbahaya bagi lingkungan. Keadaan ini diperparah dengan meningkatnya penggunaan batubara berkualitas rendah yang mengandung kadar belerang tinggi di dalam industri. Berbagai negara telah berusaha untuk mengurangi dan mengendalikan polusi udara. Unsur-unsur beracun dalam gas buang dapat bergerak lebih dari ribuan kilometer dan dapat menimbulkan masalah lingkungan tempat/negara lain. SO₂ dan NO_x merupakan penyebab utama hujan asam yang dapat menimbulkan kerusakan hutan, tanah pertanian, danau dan sebagainya yang berdampak pada semua makhluk hidup.

Berkas elektron dari Mesin Berkas Elektron (MBE) untuk pengolahan gas buang sejak dua dekade yang lalu telah dikembangkan di Jepang, Amerika, Jerman, Polandia dan China^[2]. Proses *Electron Beam for Fue Gas Treatment* (EB-FGT) adalah proses pengolahan kering gas buang (*flue gas*) menggunakan berkas elektron yang secara simultan dapat mereduksi SO₂ dan NO_x. Iradiasi gas buang menghasilkan radikal-radikal aktif dan bereaksi dengan SO₂ dan NO_x membentuk asam sulfat dan asam nitrat^[3].

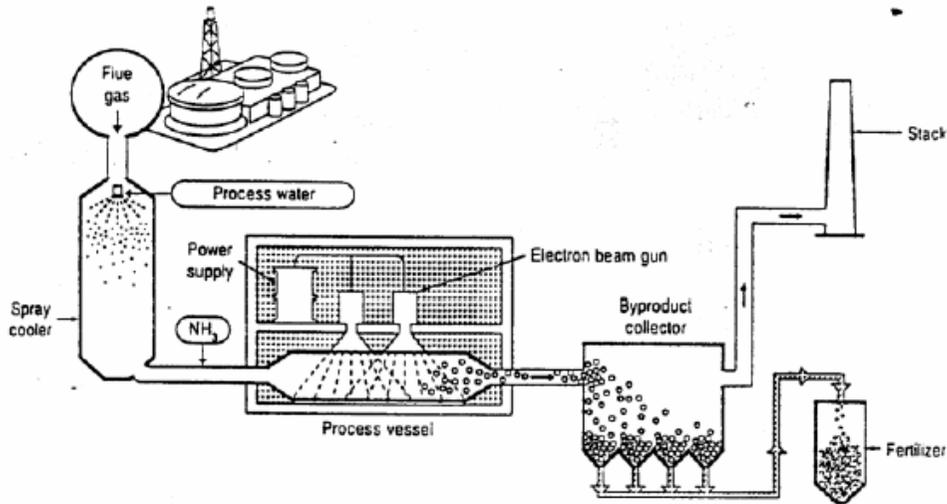
Salah satu program *Landmark* BATAN adalah membuat *Basic Engineering Design Package* (BEDP) untuk EB-FGT guna mereduksi kadar emisi gas buang SO₂ dan NO_x dari PLTU bebahan bakar batu bara. Dalam BEDP tersebut ditentukan berkas elektron dihasilkan dari MBE dengan energi 800 keV dan arus berkas 70 mA. Sejalan dengan program tersebut, maka salah satu kegiatannya adalah melakukan pengkajian untuk menentukan penetrasi berkas elektron di dalam gas buang sebagai dasar penentuan dimensi bejana proses (*process vessel*). Bejana proses berfungsi

sebagai tempat/wadah terjadinya reaksi antara gas buang dengan berkas elektron. Dengan melakukan perhitungan penetrasi berkas elektron diharapkan dapat memperoleh data untuk menunjang pembuatan bejana proses gas buang, sehingga dapat mendukung pembuatan BEDP EB-FGT.

Berkas Elektron untuk Pengolahan Gas Buang

Berbagai teknologi dan proses telah dikembangkan untuk mengurangi emisi SO_2 dan NO_x , di antaranya adalah FGD (*Flue Gas Desulphurisation*), SCR (*Selective Catalytic Reduction*) dan EB-FGT (*Electron Beam for Flue Gas Treatment*) menggunakan MBE (Mesin Berkas Elektron). Penerapan teknologi EB-FGT di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan bahan bakar batu bara merupakan solusi terbaik untuk memecahkan permasalahan yang berhubungan dengan peraturan mengenai pengelolaan lingkungan hidup karena keterbatasan lahan. Selain itu proses radiasi menggunakan MBE mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan proses konvensional (FGD dan SCR) antara lain: merupakan suatu sistem proses yang kompak karena dapat mengolah SO_2 dan NO_x secara serentak dengan tingkat efisiensi tinggi; sangat cocok untuk pengolahan gas buang dengan kandungan SO_2 yang tinggi dan membutuhkan air proses sedikit dibandingkan 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 produk pupuk dapat dikelola dengan baik; lahan yang dibutuhkan untuk instalasi ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan teknologi sejenis yang lain.

Pengolahan gas buang SO_2 dan NO_x menggunakan berkas elektron pada umumnya merupakan teknologi desulfurisasi dan denitrasi yang dikombinasi dengan penambahan gas amoniak yang dimasukkan ke dalam suatu bejana proses. Ketika gas buang teriradiasi oleh berkas elektron, komponen gas di dalam bejana tersebut bertumbukkan dengan elektron yang energinya cukup untuk menghasilkan ionisasi molekuler, atom bebas dan spesies radikal seperti O, OH, N dan HO_2 . Radikal bebas terbentuk sangat reaktif dan bila bertemu dengan sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) akan mengubahnya menjadi asam sulfat dan asam nitrat, dan dengan adanya penambahan amoniak akan menghasilkan produk samping berupa bahan pupuk pertanian. Ada berbagai parameter yang dapat mempengaruhi pengolahan gas buang menggunakan berkas elektron, antara lain: efisiensi pengambilan polutan (*removal efficiency*), energi berkas elektron, arus berkas, dan dosis radiasi. Distribusi dosis dan penetrasi berkas elektron memegang peran penting dalam proses iradiasi suatu bahan^[4].



Gambar 1. Skema *Flue Gas Treatment* Menggunakan Berkas Elektron^[2]

Iradiasi Berkas Elektron

Energi berkas elektron menentukan kedalaman penetrasi dalam suatu bahan yang diiradiasi. Semakin tinggi energi berkas elektron, semakin dalam penetrasinya. Namun elektron yang dipercepat, energinya akan semakin berkurang setelah menembus bahan dan akhirnya kehabisan energi dan berhenti pada kedalaman tertentu dalam bahan. Hubungan antara distribusi dosis yang diserap bahan dengan energi elektron secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan^[5].

$$D = 0,33 E/\rho \quad (\text{untuk iradiasi satu sisi permukaan}) \quad (1)$$

$$D = 0,88 E/\rho \quad (\text{untuk iradiasi dua sisi permukaan}) \quad (2)$$

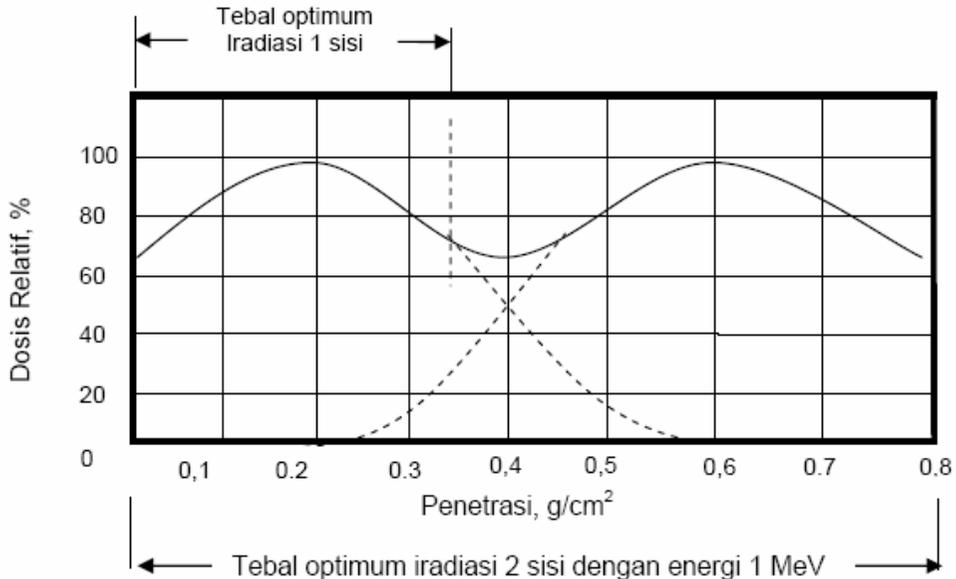
dengan:

D = dosis relatif

E = energi elektron

ρ = densitas bahan.

Untuk meningkatkan kedalaman penetrasi, iradiasi dapat dilakukan pada 2 sisi, yaitu dengan cara meradiasi bahan dari ke dua sisi. Gambar 2 menunjukkan kurva distribusi dosis terhadap kedalaman penetrasi jika suatu bahan diiradiasi^[6].



Gambar 2. Kurva Distribusi Dosis Relatif Terhadap Penetrasi Pada Iradiasi 1 Sisi dan 2 Sisi^[6]

Penentuan penetrasi berkas berguna untuk mengetahui sejauh mana berkas elektron dapat menembus suatu bahan. Hal ini perlu dilakukan karena penetrasi berkas merupakan parameter pengendalian dosis dalam melakukan iradiasi suatu bahan agar bahan menerima dosis serap yang homogen, sehingga bahan teriradiasi kualitasnya homogen, sedangkan dosis relatif menyatakan nilai dosis yang didasarkan pada perbandingan sembarang dosis terhadap dosis maksimum dalam suatu distribusi dosis serap.

Penetrasi Berkas Elektron

Jangkauan elektron (S) dalam materi adalah jarak tegak lurus dari permukaan bahan/materi ketika terjadi tumbukan sampai elektron berhenti memberikan energinya. Jangkauan elektron sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain: kerapatan/densitas bahan yang ditumbuk dan energi elektron yang menumbuk. Secara pendekatan rumusan jangkauan elektron dibedakan menjadi tiga kategori energi yaitu: energi rendah antara 10 – 100 keV, energi medium antara 100 keV – 1 MeV dan energi tinggi di atas 1 MeV^[3].

Pada rentang energi antara 10 keV $< e U_B < 100$ keV, jangkauan elektron:

$$S = 2,1 \times 10^{-12} U_B^2 / \rho \quad (3)$$

Rentang energi elektron antara 100 keV – 1MeV:

$$S = 6,67 \times 10^{-11} U_B^{5/3} / \rho \quad (4)$$

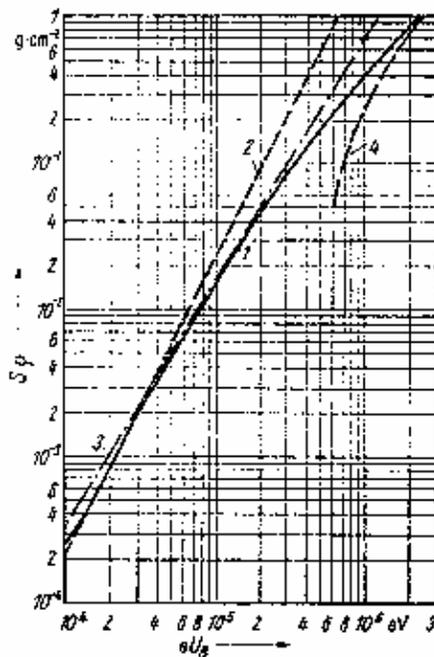
Rentang energi elektron di atas 1 MeV:

$$S = 1/\rho (5,1 \times 10^{-7} U_B) \tag{5}$$

dengan

- S = jangkau elektron (cm)
- ρ = densitas bahan (gr/cm³)
- U_B = tegangan pemercepat (Volt).

Dari rumus di atas terlihat bahwa makin besar energi elektron yang menumbuk, maka makin dalam jangkau elektron masuk ke bahan, demikian juga semakin besar densitas bahan, jangkau elektron akan semakin dangkal/pendek, di mana besar energi elektron sebanding dengan tegangan pemercepatnya. Secara umum kedalaman penetrasi merupakan perkalian antara jangkau elektron dengan densitas bahan yang dilewati, dan satuan penetrasi tidak terpengaruh oleh densitasnya. Pada Gambar 3 ditunjukkan hubungan antara kedalaman penetrasi pada bahan dengan berbagai energi elektron yang merupakan hasil pendekatan rumus di atas.



Gambar 3. Kedalaman Penetrasi $S\rho$ dengan Energi eU_B ^[7]

Energi yang terserap pada bahan mempunyai distribusi tidak merata, berarti daya yang terserap per satuan volume merupakan fungsi dari jarak. Secara pendekatan,

daya berkas yang diserap persatuan volume $p_A(z)$ pada jarak z dituliskan sebagai^[7].

$$P_A(Z)/P_{A \text{ maks}} = 1 - 9/4(z/S - 1/3)^2 \quad (6)$$

Dengan $p_{A \text{ maks}} = 4/3 \eta_A U_B J$ = nilai maksimum daya yang terserap per satuan volume pada jarak $z = S/3$ di permukaan, z = jarak dari permukaan bahan, S = jangkauan elektron, U_B = tegangan pemercepat, J = rapat arus berkas, dan η_A = bagian berkas yang terserap.

Jangkauan elektron (S) bergantung pada energi kinetik (E_k) dan dapat dihitung untuk bahan dengan nomor atom (Z) rendah menggunakan rumus empiris^[8].

$$S = 0,412 E_k^n \quad (7)$$

Dengan $n = 1,265 - 0,095 \ln E_k$ untuk $0,01 < E_k < 2,5$ MeV dan $n = 0,53 E_k - 0,106$ untuk $2,5 < E_k < 20$ MeV.

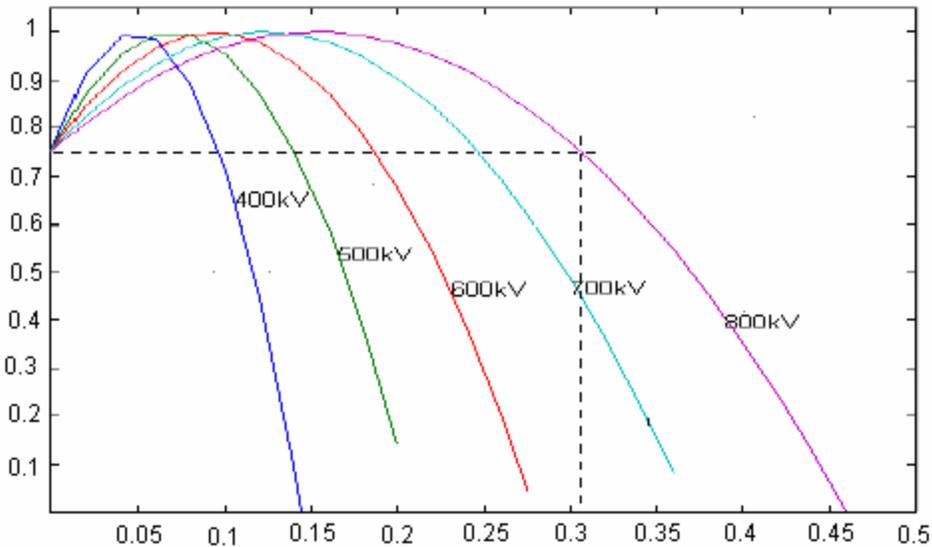
Berkas elektron yang terukur pada target hanya berkas yang mempunyai daya cukup untuk menembus jendela pemayar pada MBE dan udara atmosfer dari jendela pemayar sampai ke target. Selain itu distribusi kedalaman penetrasi pada suatu bahan tidak sama jangkauannya, tetapi distribusinya sesuai Persamaan (6).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pengolahan gas buang (SO_2 dan NO_x) menggunakan mesin berkas elektron, perlu adanya bejana proses (*process vessel*) yang berfungsi sebagai tempat/wadah terjadinya reaksi antara gas buang dengan berkas elektron. Dimensi bejana proses perlu diperhitungkan guna memperoleh hasil penanganan gas buang yang optimal. Adapun salah satu hal yang cukup berperan untuk menentukan dimensi bejana proses adalah kemampuan berkas elektron menembus gas buang atau biasa disebut kedalaman penetrasi berkas elektron di dalam materi/bahan. Selain penetrasi berkas elektron, untuk menentukan dimensi dan geometri bejana proses perlu disesuaikan dengan laju alir dari gas buang dan nilai dosis yang diterima gas buang selama berada di dalam bejana proses.

Dalam pembuatan BEDP untuk EB-FGT telah ditentukan spesifikasi MBE yang digunakan untuk pengolahan gas buang adalah MBE dengan kapasitas energi 800 keV, arus berkas elektron 70 mA, *window* MBE dan *window* bejana proses masing-masing dari bahan titanium dengan tebal 50 μm , dan celah udara antara *window* MBE dengan *window* bejana proses 5 cm. Untuk menentukan kedalaman penetrasi berkas elektron dalam gas buang, perlu dibuat distribusi dosis terhadap penetrasi berkas elektron secara umum. Dengan menggunakan

Persamaan (6) dan (7) dan parameter lainnya seperti energi berkas elektron 800 keV, jarak z dimulai dari 0 - 0,5 g/cm², maka dapat diperoleh nilai $p_A(z)/p_{A\text{ mak}} = \text{Dosis}(z)/\text{Dosis}_{\text{mak}}$ sehingga dapat dibuat kurva distribusi dosis terhadap penetrasi berkas elektron seperti ditunjukkan pada Gambar 4, dengan $\text{Dosis}(z)/\text{Dosis}_{\text{mak}}$ adalah dosis relatif.



Gambar 4. Dosis Relatif vs Penetrasi Berkas

Perhitungan Kedalaman Penetrasi Berkas Elektron 800 KeV

Besarnya kedalaman penetrasi (P_t) berkas elektron sebagai fungsi energi elektron dapat dilihat pada kurva Gambar 4, sedangkan besarnya penetrasi (P_{t_1}) setelah berkas melewati *window* dan celah udara adalah

$$P_{t_1} = P_t - ((\text{tebal}_{\text{window}} \times \rho_{\text{window}}) + (\text{tebal celah udara} \times \rho_{\text{udara}})) \quad (8)$$

Untuk mengetahui penetrasi berkas elektron dalam gas buang (P_{t_2}) dapat dihitung sebagai berikut

$$P_{t_2} = P_{t_1} / \rho \quad (9)$$

dengan ρ = densitas gas buang.

Dari data dosis relatif vs penetrasi berkas pada dosis relatif 0,75 (lihat Gambar 4), besarnya penetrasi (P_t) pada energi berkas 800 keV adalah 0,31 gr/cm², sehingga besarnya penetrasi berkas (P_{t_1}) setelah melewati *window* dan celah udara dapat dihitung menggunakan Persamaan (8).

$$P_{t_1} = P_t - ((\text{tebal}_{\text{window}} \times \rho_{\text{window}}) + (\text{tebal celah udara} \times \rho_{\text{udara}}))$$

dengan tebal *window* MBE = 50 μm , tebal *window* bejana proses = 50 μm , tebal celah udara = 5 cm, bahan *window* dari titanium, $\rho_{\text{titanium}} = 4,6 \text{ gr/cm}^3$, $\rho_{\text{udara}} = 0,00125 \text{ gr/cm}^3$, sehingga diperoleh besarnya penetrasi setelah berkas melewati *window* dan celah udara (Pt_1) adalah:

$$\begin{aligned} pt_1 &= 0,31 \text{ gr cm}^{-2} - \left((50 + 50) / 10000 \text{ cm} \times 4,6 \text{ gr cm}^{-3} + (5 \text{ cm} \times 0,00125 \text{ gr cm}^{-3}) \right) \\ &= 0,25885 \text{ gr cm}^{-2} \end{aligned}$$

Besarnya penetrasi dalam gas buang (Pt_2) dihitung menggunakan Persamaan (9)

$$pt_2 = pt_1 / \rho_{\text{gas buang}} \text{ dengan } \rho_{\text{gas buang}} = 0,001372 \text{ gr cm}^{-3}$$

$$pt_2 = 0,25885 \text{ gr cm}^{-2} / 0,001372 \text{ gr cm}^{-3} = 188,67 \text{ cm}$$

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa semakin besar energi berkas elektron maka kedalaman penetrasi semakin dalam, sehingga dapat dikatakan bahwa kedalaman penetrasi berbanding langsung dengan energi berkas elektron. Pada jarak $z = 0$ (permukaan bahan), dosis relatif sebesar 75 % disebabkan karena iradiasi elektron belum seluruhnya diserap oleh bahan. Hal ini karena ada sebagian dari berkas elektron yang terhambur pada saat berinteraksi dengan permukaan bahan. Pada kurva energi 800 keV, pada jarak z sekitar 0,15 g/cm^2 dosis relatifnya 100% atau maksimum. Ini berarti bahwa dosis terserap semua, hal ini akibat terjadinya serapan berkas elektron secara maksimal oleh bahan. Setelah jarak z melebihi 0,15 g/cm^2 kemudian turun secara eksponensial karena dosis mulai berkurang. Hal ini karena energi elektron berkurang, dan dosis adalah energi yang diserap per satuan volume. Hal ini berlaku untuk semua energi dari berkas elektron. Interaksi antara elektron dan bahan yang ditumbuk (gas buang) adalah interaksi atomik karena energi elektron di bawah 12 MeV.

Dari masing-masing kurva pada Gambar 4, dapat diketahui bahwa pada hakekatnya distribusi dosis meningkat dari nilai permukaan ke maksimum pada kedalaman tertentu pada bahan dan secara perlahan menurun kembali sampai harga terendah pada ujung dari jangkauan elektron. Titik di mana dosis keluar sama dengan dosis masuk akan menentukan batas ketebalan optimum untuk bahan yang diiradiasi satu sisi (*single-sided treatment*). Untuk iradiasi pada sisi berlawanan (iradiasi dua sisi), maka total tebal dapat 15% lebih besar dari 2 kali tebal optimum pada iradiasi satu sisi, karena adanya *overlap* ujung dari distribusi dosis-kedalaman (lihat Gambar 2). Tebal optimum ditentukan agar dalam bahan yang diiradiasi menerima dosis yang seragam. Dalam praktek khususnya dalam industri, perbandingan dosis maksimal/dosis minimal ($D_{\text{mak}}/D_{\text{min}}$) yang diterima oleh bahan dapat mencapai 1 sampai 1,5^[9]. Pada proses iradiasi tertentu perlu ditetapkan toleransi harga $D_{\text{mak}}/D_{\text{min}}$ yang dianggap masih dapat memberikan

hasil iradiasi yang baik. Hal ini tergantung kasus demi kasus terhadap perubahan kimia/fisika yang diinginkan terhadap bahan yang diiradiasi.

Perhitungan kedalaman penetrasi berkas elektron dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan berkas elektron masuk di dalam suatu bahan/materi, sehingga ketebalan optimum dari bahan yang diiradiasi dapat ditentukan. Dari hasil perhitungan kedalaman penetrasi berkas elektron dalam bahan (Gambar 4) terlihat bahwa semakin besar energi berkas, maka kedalaman penetrasi berkas semakin besar. Untuk energi 800 keV, besar dosis efektif yang dapat digunakan agar dapat memenuhi keseragaman dosis relatif $\geq 75\%$ atau $D_{\text{maks}}/D_{\text{min}}$ dapat mencapai 1 sampai 1,5, maka kedalaman penetrasi berkas optimum adalah $0,25885 \text{ gr cm}^{-2}$. Kedalaman penetrasi optimum ini selanjutnya digunakan untuk menghitung kedalaman penetrasi pada gas buang yang mempunyai $\rho_{\text{gas buang}} = 0,001372 \text{ gr cm}^{-3}$. Dari perhitungan di depan diperoleh kedalaman penetrasi berkas elektron 800 keV dalam gas buang adalah 188,67 cm. Dengan demikian maka untuk rancangan ukuran ketinnggian bejana proses tidak lebih dari 188,67 cm, agar dosis serap yang diterima gas buang masih homogen.

KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Teknologi MBE untuk pengolahan gas buang (*flue gas treatment*) bertujuan untuk mereduksi SO_2 dan NO_x secara simultan.
2. Tebal bahan yang dapat diiradiasi dengan berkas elektron berbanding langsung dengan energi berkas elektron dan berbanding terbalik dengan densitas bahan. Hal ini penting diperhatikan, khususnya untuk menentukan kedalaman penetrasi berkas elektron di dalam bahan.
3. Dari hasil perhitungan diperoleh kedalaman penetrasi berkas elektron 800keV dalam gas buang adalah 188,67 cm, sehingga ukuran ketinnggian bejana proses tidak lebih dari 188,67 cm.

DAFTAR PUSTAKA

1. DAGSTAN – INDONESIA POWER, 2002, "Executive Summary, Study Kelayakan Instalasi Pengolahan Gas Buang dengan Mesin Berkas Elektron UBP Suralaya", Desember.
2. ZBIGNIEW ZIMEK, 2005, "Introduction to Electron Beam Application in Flue Gas Treatment Process", National Training Course on Electron Machine Technology-BATAN, Yogyakarta, Indonesia.
3., 2005, "Proposal Pembuatan Spesifikasi Teknis Sistem Pengolahan Gas Buang PLTU Suralaya Menggunakan Mesin Berkas Elektron", BATAN.

4. MIRZAN T. RAZZAK, 2003, "Dosimetri Industri", Diktat Pelatihan Pekerja Akselerator, Pusdiklat BATAN, Jakarta.
5. DJOKO S. PUDJORAHARJO, 2006, "Dasar-dasar Teknologi dan Aplikasi Mesin Berkas Elektron", Diktat Batan Accelerator School -2006, P3TM –BATAN.
6. SUGIARTO DANU, 2004, "Dasar-dasar Aplikasi Mesin Berkas Elektron", Diktat Batan Accelerator School -2004, P3TM –BATAN.
7. SIEGFRIED SCILLER etc., 1982, *Electron Beam Technology*, John Willey & Sons, New York.
8. ZBIGNIEW ZIMEK, *Electron Accelerators For Environmental Protection*, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warsawa.
9. MARGA UTAMA, 2003, "Aplikasi Akselerator Untuk Industri", Diktat Pelatihan Pekerja Akselerator, Pusdiklat BATAN, Jakarta.

