

STRATEGI MENURUNKAN EMISI SO₂ PADA PLTU BATUBARA YANG TIDAK MEMILIKI DESULFURISASI

Cahyadi

Balai Besar Teknologi Energi - BPPT, PUSPIPTEK, Cisauk-Tangerang 15314, Indonesia
Email: cahyadi_mail@indo.net.id

Abstrak

Kep.Men LH no. 13/1995 untuk kegiatan PLTU batubara menunjukkan bahwa baku mutu emisi SO₂ adalah 750 mg/Nm³. Berdasarkan studi SO₂ yang dilakukan pada tahun 1999 ditemukan bahwa batubara dengan kandungan sulfur diatas 0.44% dan O₂ 3% akan menghasilkan emisi SO₂ diatas baku mutu lingkungan. Oleh sebab itu diperlukan upaya untuk menurunkan emisi ini. Permasalahan pada PLTU yang sudah dibangun adalah keterbatasan lahan untuk membangun perlengkapan desulfurisasi, sehingga tidak semua metode desulfurisasi dapat diterapkan. Makalah ini membahas strategi penurunan emisi SO₂ yang cocok untuk PLTU yang sudah dibangun yaitu: metode pencampuran batubara, metoda injeksi batu kapur dan kombinasi dari keduanya . Pencampuran 2 jenis batubara yang memiliki kandungan sulfur rendah dan tinggi dapat dilakukan untuk menurunkan kandungan sulfur dibawah 0.44%. Biaya investasinya relatif rendah dibandingkan metode lainnya. Metode injeksi batukapur pada tungku boiler dapat menurunkan emisi SO₂ sebesar 17% sampai 70% pada rasio molar Ca/S sebesar 1 hingga 3. Ukuran batukapur yang digunakan adalah 50 hingga 200 mesh. Injeksi batu kapur ini tidak memerlukan lahan yang luas dan investasinya lebih rendah dibandingkan metode desulfurisasi lain seperti *dry scrubber* atau *wet scrubber*. Metode pencampuran batubara, injeksi batu kapur atau kombinasi kedua metode tersebut dapat menjadi strategi penurunan SO₂ yang cukup menjanjikan bagi PLTU yang sudah ada.

Abstract

Indonesian emission standard as written in Kep.Men LH no. 13/1995 stated that SO₂ gas emission for coal fired power plant activities is 750 mg/Nm³. Previous study of SO₂ emission in 1999 show that sulfur content above 0.44% with the excess oxygen of 3% will emit SO₂ above this emission standard. Coal fired power plant that burning coal with high sulfur content needs to reduce SO₂ emission. Inadequate place is one common problem in the existing coal fired power plants causes difficulties in building desulphurization system. Therefore, not all desulphurization methods can be applied. This paper discussed a strategy to reduce SO₂ emission in the exiting coal fired power plant. Three methods are described: coal blending, limestone injection and combination of the first two. Coal blending between high sulfur and low sulfur coal will reduce the final sulfur content below 0.44%. The investment needed is relative low compare to the other desulphurization methods. Limestone injection into the furnace can reduce SO₂ emission in the range of 17%-70% at Ca/S molar ratio of 1 until 3. The sizes of limestone used are 50 until 200 mesh. Limestone injection system need only a small space and the investment needed is relative low compare to that of dry scrubber or wet scrubber. Coal blending and limestone injection or combination of them becomes a promising strategy to reduce SO₂ emission in the existing coal fired power plant.

I. PENDAHULUAN

Pemerintah telah menetapkan baku mutu emisi (BME) maksimum emisi gas sulfur dioksida untuk kegiatan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) berbahan bakar batubara tahun 1995 yaitu: 1500 mg/m³ m (Kep.Men LH: Kep.13/MenLH/3/1995). Angka ini lebih tinggi dari yang ditetapkan pada tahun 2000 yaitu 750 mg/m³.

Berdasarkan studi SO₂ yang dilakukan oleh Youvial M, Sastrawinata, Yurismono (1999), batubara yang dapat memenuhi syarat batas emisi maksimum (BME) sebesar 750 mg/Nm³ adalah batubara yang memiliki kandungan sulfur dibawah ~ 0,44% kering, sedangkan kandungan sulfur batubara yang ada saat bervariasi mulai dari 0.1 hingga diatas 1%.

Pada Tabel 1 ditunjukkan klasifikasi presentasi kandungan sulfur dalam batubara dari beberapa perusahaan tambang. Potensi batubara dengan kandungan sulfur diatas 0,44% cenderung lebih banyak dibandingkan dengan batubara yang memiliki kandungan sulfur rendah, sehingga perlu dilakukan langkah-langkah penurunan emisi SO₂ pada PLTU yang sudah ada, namun belum memiliki alat kontrol emisi SO₂.

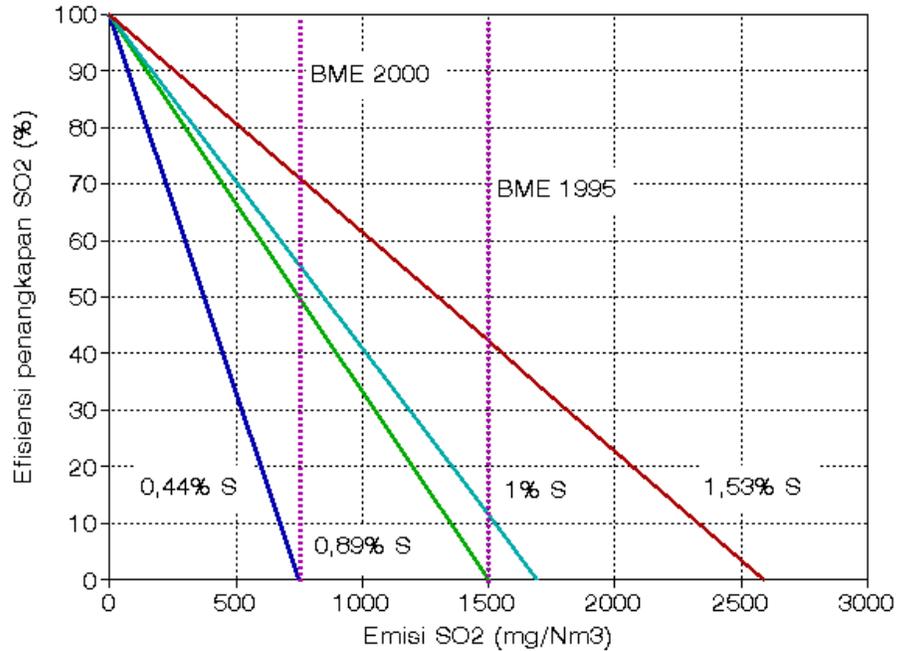
Untuk PLTU yang akan dibangun perlu dilengkapi dengan alat kontrol emisi SO₂ (desulfurisasi) agar memiliki fleksibilitas batubara umpan.

Tabel 1 Klasifikasi persentasi kandungan sulfur menurut perusahaan tambang
(Direktorat Batubara – ESDM, 2005)

| Kandungan Sulfur, % | Perusahaan Tambang Batubara |
|---------------------|---|
| < 0,1 | Adaro |
| 0,1 – 0,2 | Adaro, Kideco, Bentala |
| 0,2 – 0,3 | AGM, Gunung BP, Jorong BG |
| 0,3 – 0,4 | Indominco, KCM |
| 0,4 – 0,5 | Arutmin, BCS, Berau, KPC, FBS |
| 0,5 – 0,6 | PTBA Tanjung Enim, AGM, Kitadin, Fajar BS, KPC, Bukit Sunur |
| 0,6 – 0,7 | Berau, Danau MH, Bukit Sunur, AIC, PTBA Tanjung Enim |
| 0,7 – 0,8 | Kendilo, Berau, ex. Chung Hua, AIC, PTBA Tanjung Enim |
| 0,8 – 0,9 | Tanito H., Indominco, Arutmin, KCM, Inti Tirta |
| 0,9 – 1,0 | Gunung BP, Jorong BG, Bukit Baiduri, MHU, Tanito H, Arutmin |
| > 1,0 | AIC., Indominco , Riau B, Dharma PM, Perkasa I |

- AGM : Antang Gunung Meratus
- KCM : Kadya Caraka Mulia
- MHU : Multi Harapan Utama
- AIC : Allied Indo Coal
- BCS : Bahari Cakrawala Sebuku

Gambar 1 menunjukkan bahwa batubara dengan kandungan sulfur 0,44% (kering) akan menghasilkan emisi SO₂ sekitar baku mutu 750 mg/Nm³ (3%O₂), sedangkan kandungan sulfur antara 1% hingga 1,53% (kering) memerlukan teknologi penurunan emisi SO₂ dengan efisiensi penangkapan 55% hingga 70% agar memenuhi nilai baku mutu.



Gambar 1. Efek kandungan sulfur batubara untuk memenuhi baku mutu emisi
(Youvial M, Sastrawinata, Yurismo,1999).

2. PERCAMPURAN BATUBARA

Pada umumnya, pencampuran batubara adalah mencampur batubara yang nilai kalorinya lebih tinggi dengan batubara bernilai kalor lebih rendah agar diperoleh spesifikasi yang diinginkan secara homogen. Untuk menurunkan kandungan sulfur, selain mencampur batubara bersulfur tinggi dengan yang bersulfur rendah, juga perlu diperhatikan kandungan lainnya seperti nilai kalori, kandungan abu dan HGI agar tetap masuk dalam kisaran disain boiler. Sulfur merupakan salah satu parameter yang dapat tercampur dengan baik sehingga memudahkan perhitungannya. Namun demikian dalam prakteknya, pencampuran batubara perlu memperhitungkan segi efisiensi dan ekonomi serta memperhitungkan kandungan air, parameter pulverizing, kuantitas dan kualitas kandungan mineral dalam abu.

Contoh : Batubara A dan B mempunyai kandungan sulfur (kering) masing-masing adalah 0.7 % dan 0.1%. Apabila kedua tipe batubara tersebut diblending secara baik, dengan rasio 50:50 maka akan diperoleh produk akhir dengan kandungan abu sebesar : $(0.7\% \times 50/100) + (0.1\% \times 50/100) = 0.4\%$.

Ada 2 cara blending yang umum dilakukan selama ini, yaitu;

- Teknik pengaturan tumpukan (*stacking*) pada *stock pile*
- Teknik pengaturan laju batubara pada *conveyer*

2.1. Teknik pengaturan tumpukan (*Stacking*)

Pada prinsipnya hasil produk blending akan homogen apabila cara penyusunan lapisan batubara dalam pembentukan *stockpile* dilakukan secara baik. Makin banyak jumlah lapisan dan makin tipis ketebalan lapisan maka akan diperoleh hasil yang semakin baik. Cara penyusunan pelapisan dapat dikelompokkan dalam tiga tipe, yaitu:

- pelapisan tipe chevron,
- pelapisan tipe windrow
- pelapisan gabungan antara tipe chevron dan tipe windrow.



a. Pelapisan Chevron



b. Pelapisan Windrow



c. Pelapisan gabungan tipe chevron dan tipewindrow

Gambar 2. Pengelompokan pencampuran dengan pelapisan

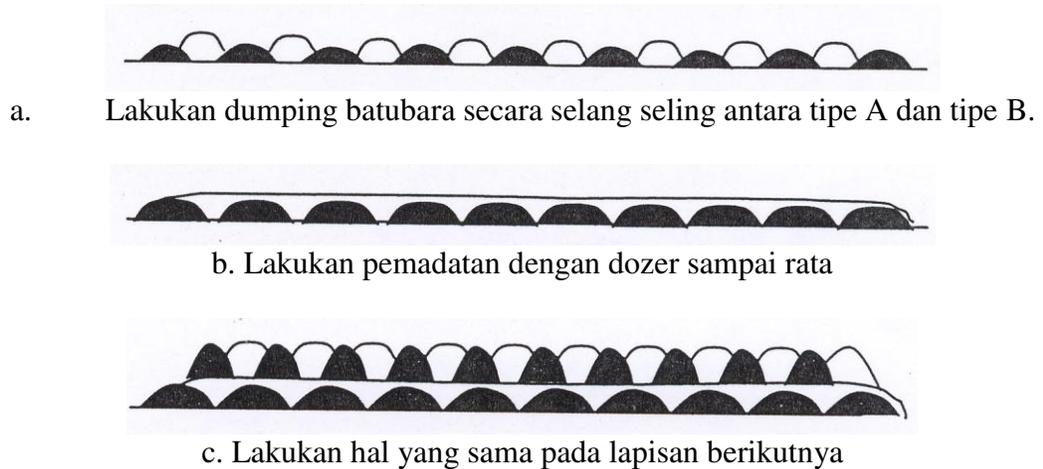
(Youvial M, Sastrawinata, Yurismono, 1999).

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa pelapisan tipe chevron membutuhkan butiran batubara yang ukurannya seragam, bila tidak maka batubara yang ukurannya lebih besar akan cenderung menumpuk dibagian bawah *stockpile*.

Dalam melaksanakan tumpukan dapat dilakukan dengan menggunakan *stracker reclaimers*. Dengan truk dan *dozer* tumpukan tipe windrow dapat dilakukan dengan baik.

Berikut ini ditampilkan gambaran cara melakukan tumpukan dari dua jenis batubara yang berbeda spesifikasinya (tipe A dan tipe B) dengan menggunakan truk dan *dozer*.

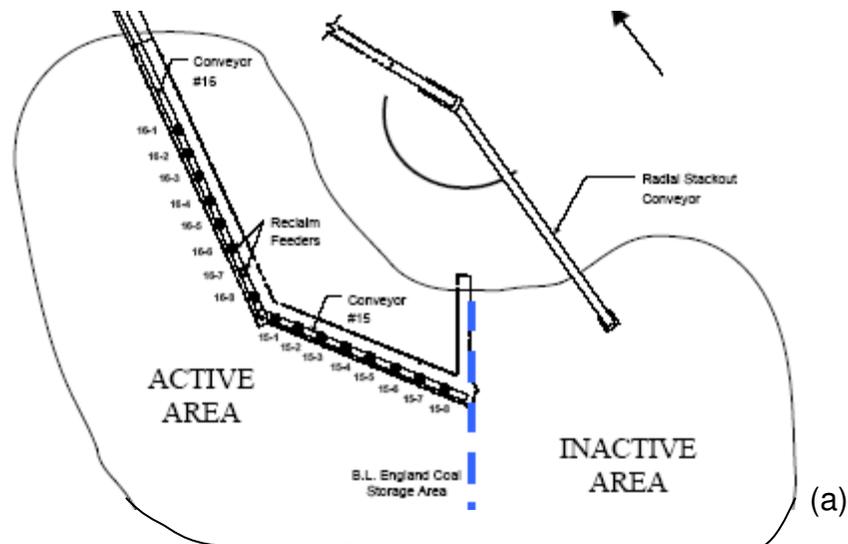
Ketebalan tumpukan dapat diatur dengan mengatur jarak titik dumping, semakin jauh jarak titik dumping maka semakin tipis ketebalan lapisan yang diperoleh setelah dipadatkan.

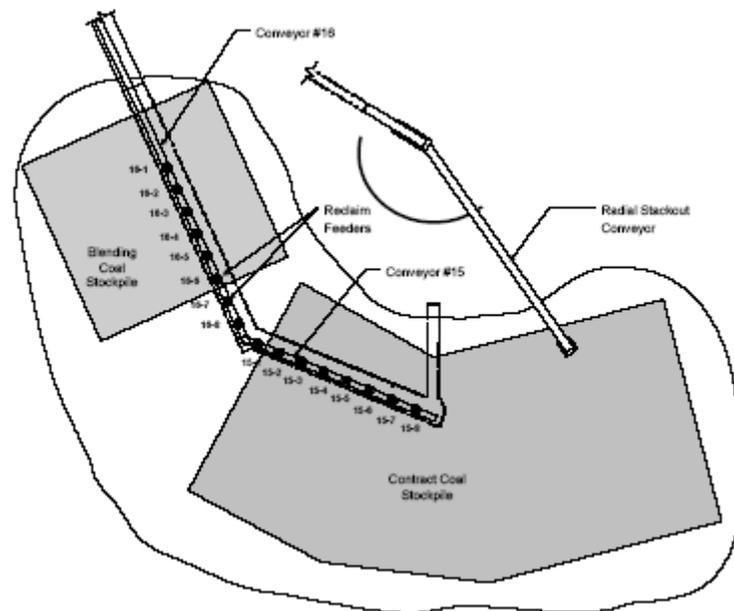


Gambar 3. Langkah pelapisan dengan menggunakan truk dan dozer.
(Youvial M, Sastrawinata, Yurismo, 1999)

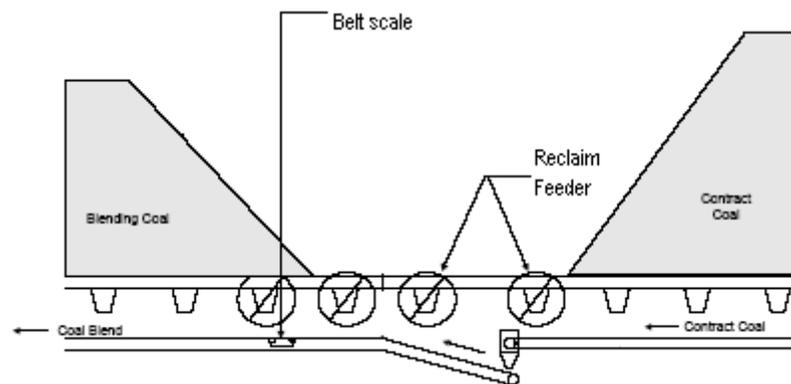
2.2. Teknik pengaturan laju batubara pada conveyer.

Pada umumnya teknik pencampuran pada conveyer dapat dibagi dua yaitu: - dengan hopper dan - tanpa hopper. Teknik pencampuran ini memerlukan peralatan seperti *staker-reclaimer*, *dozer*, *hopper* dan lainnya. Apabila proses pemindahan batubara dari *stockpile* ke *hopper* hanya dilakukan dengan *dozer* (tanpa *staker-reclaimer*), maka agar homogenitas tetap terjaga dan kecepatan pengisian ke hopper tidak terlambat biasanya dipakai minimal dua dozer: satu untuk mendorong dari bagian *stockpile* ke dasar dan selanjutnya mendekati ke hopper, sedangkan dozer yang satunya bertugas mendorong dan memasukkan batubara ke dalam hopper. Studi kasus pencampuran batubara di conveyer tanpa hopper dilakukan pada PLTU B.L.England Station, lihat Gambar 4a, b, c.





(b)



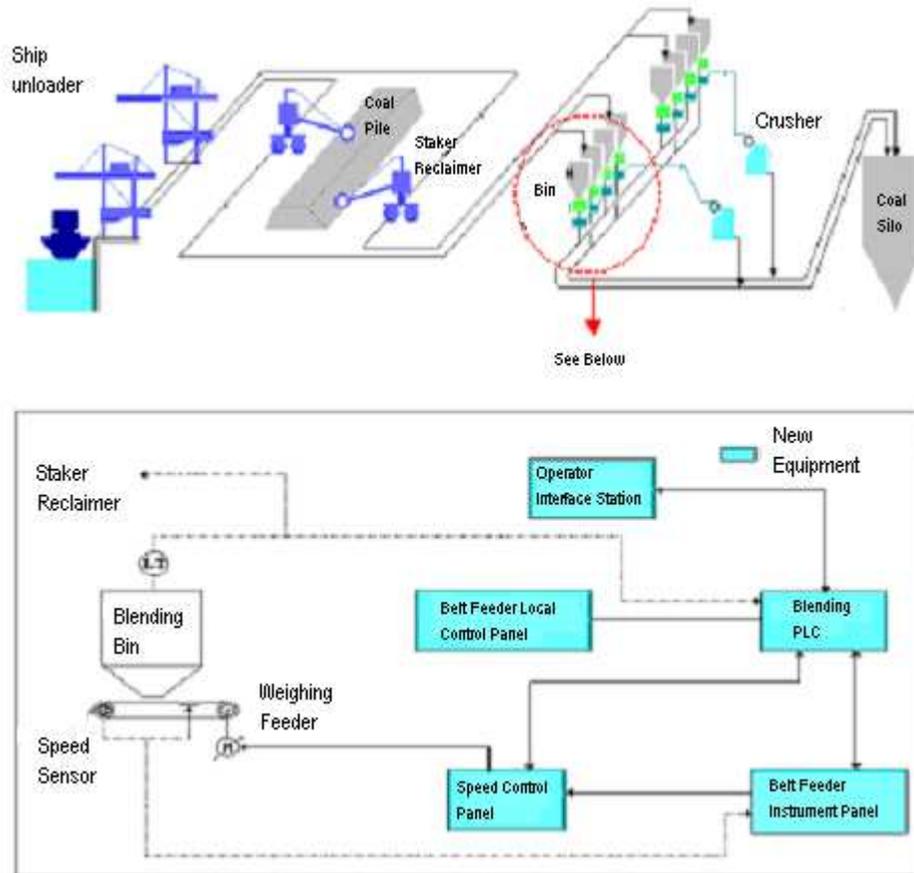
(c)

Gambar 4. Contoh kasus metode pencampuran pada conveyor dengan stacking reclaiming (tanpa hopper/bin) di B.L England Station, New Jersey.

Unit dibangun tahun 1960 oleh Babcock & Wilcox (Bhamidipati and Gibson , 2003).

(a) situasi awal, (b) situasi setelah diberlakukan blending, (c) pencampuran di conveyor

Pencampuran batubara di B.L.England Station diatur menggunakan *vibratory reclaim feeders*. Akurasi pencampuran bergantung pada kerja reclaim feeder dan pemasukan masing-masing batubara ke conveyor.



Gambar 5. Metode pencampuran batubara pada conveyer dengan hopper di Samchonpo Power Plant (Kim et al., 1999).

Studi kasus pencampuran batubara di conveyer dengan hopper dilakukan di salah satu PLTU besar di Korea Selatan yaitu Samchonpo Thermal Power Plant dengan total pembangkitan sebesar 3240MW yang terdiri dari 4 unit tipe drum masing masing sebesar 560MW dan 2 unit tipe supercritical once-trough masing masing sebesar 500MW. Samchonpo PP menggunakan sekitar 40 jenis batubara yang diimpor dari 7 negara seperti United States, Australia, Indonesia dan China. Unit 1- 4 didisain sekitar tahun 1970-an untuk umpan batubara bituminus tanpa fasilitas desulfurisasi. Lahan untuk pemasangan FGD tidak disediakan.

Blending di Samchonpo ini lebih akurat dibandingkan pada BL England, karena dua *staker-reclaimer* mengisi batubara ke masing-masing hopper dan pengaturan pencampuran batubara dilakukan dengan mengatur rasio laju batubara yang keluar dari kedua hopper yang masing-masing telah diisi jenis batubara yang berbeda.

Dari kedua sistem pencampuran pada conveyer terurai diatas, pencampuran pada conveyer akan lebih akurat apabila ditampung dalam hopper dan laju keluaran batubara masing-masing hopper diatur sesuai rasio yang diinginkan, seperti pada kasus Samchonpo PP. Pada power plant yang sistem penanganan batubaranya tidak memiliki hopper, maka untuk modifikasi dibutuhkan biaya yang besar. Pencampuran dengan pengaturan tumpukan di stockpile dan pencampuran pada conveyer tanpa hopper memiliki akurasi yang rendah sekitar 10-15%, sehingga pencampuran hanya dilakukan pada rasio 50:50 atau 40:60 saja. Pencampuran pada conveyer dengan hopper memiliki akurasi yang lebih tinggi sehingga rasio pencampuran dapat dilakukan lebih variatif seperti 30:70 atau 20:80.

3. METODE SISTEM INJEKSI BATU KAPUR

Injeksi batu kapur ke tungku adalah teknologi yang paling sederhana dimana batu kapur kering diinjeksikan ke bagian atas dari tungku agar bereaksi dengan SO_2 dalam gas hasil pembakaran. Temperatur kerjanya berkisar antara $750 - 1250^\circ\text{C}$ (Reuther, 1989). Sebagai zat penyerap SO_2 (*sorbent*) dapat digunakan batu kapur (*limestone*) CaCO_3 . Sampai dengan temperatur 750°C kapur / *sorben* akan bereaksi dengan SO_2 dan O_2 membentuk CaSO_4 yang akan ditangkap oleh alat kontrol partikulat. Bila temperatur melebihi 1250°C maka akan terjadi sintering pada *sorben* yang akan menutup pori-porinya sehingga menyebabkan berkurangnya daya reaktif dari sorben tersebut. Pada temperatur di bawah 750°C reaksi secara praktis terhenti.

3.1 Efisiensi Penangkapan Dengan Injeksi Batu Kapur

Uji pembakaran batubara dengan injeksi batu kapur dilakukan dengan variasi perbandingan rasio molar Ca/S mulai dari 1 hingga 3 dan variasi ukuran partikel batu kapur yaitu: 50 mesh, 150 mesh dan 200 mesh. Batu kapur diinjeksikan pada ruang bakar secara kontinyu mulai dari saat batubara terbakar sempurna hingga selesai. Gambar 6 menunjukkan efisiensi penangkapan SO_2 dengan injeksi tiga jenis ukuran batu kapur.

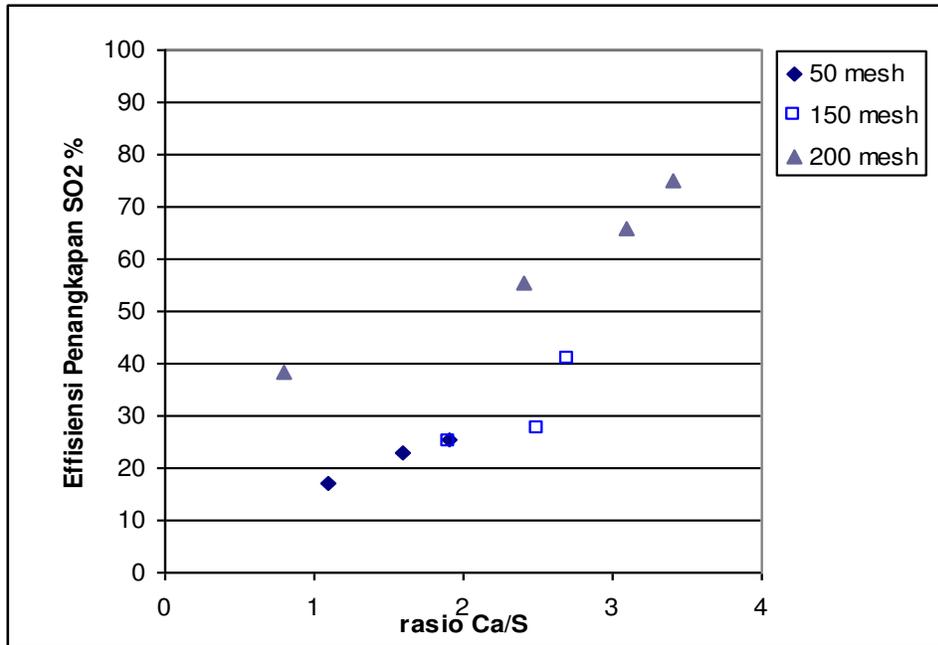
Pada batu kapur ukuran 50 mesh lolos 100% adalah 17,1%; 22,9% dan 25,6% pada masing-masing nilai rasio Ca/S adalah 1,1; 1,6 dan 1,9.

Pada batu kapur ukuran 150 mesh lolos 100%, efisiensi penangkapan SO_2 adalah 24,8%; 27,6% dan 40,7% pada masing-masing nilai rasio Ca/S adalah 1,9; 2,5 dan 2,7.

Untuk batu kapur ukuran 200 mesh lolos 100% efisiensi penangkapan SO_2 adalah 38,4%; 55,6%, 65,8% dan 74,8% pada masing-masing nilai rasio Ca/S adalah 0,8, 2,4; 3,1 dan 3,4. Berdasarkan penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi perbandingan stokiometri Ca/S, maka semakin tinggi efisiensi penangkapan SO_2 . Selain itu, ukuran partikel batu kapur yang semakin halus juga menjadikan efisiensi penangkapan SO_2 semakin tinggi.

3.2 Pengembangan Metode Injeksi Batu Kapur

Sistem injeksi batu kapur yang banyak dikembangkan saat ini adalah dengan menambahkan reaktor aktivasi untuk humidifikasi pada sisi gas buang sebelum penangkap debu (*electrostatic precipitator / bag filter*) sehingga kalsium oksida yang belum bereaksi diubah menjadi kalsium hidroksida yang dapat menangkap gas SO₂, dan akhirnya efisiensi penangkapan SO₂ total menjadi lebih tinggi dibandingkan sistem injeksi batu kapur saja. Proses ini dikenalkan dengan nama LIFAC (*Limestone Injection into the Furnace and Activation of Calcium Oxide*) yang diperkenalkan oleh POCOTEC dari Finlandia, lihat Gambar 7 (Ilari Ekman and Antti Ahti, 2004).



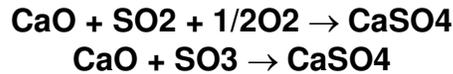
Gambar 6. Hasil pengujian injeksi batu kapur berbagai ukuran 50, 150 dan 200 mesh (Yurismono H., Cahyadi, Yenni Westi, 2003).

Ada proses yang agak mirip, yaitu yang disebut LIMB (Limestone Injection Multistage Burner) yang diperkenalkan oleh Babcock & Wilcox dari USA, namun tidak ada daur ulang material dari alat kontrol partikulat Electrostatic Precipitator (ESP) dan sistem digabungkan dengan low NO_x burner.

Proses LIFAC membutuhkan sistem injeksi tungku dan reaktor aktivasi yang dipasang antara boiler dan electrostatic precipitator, lihat Gambar 7. Pada tahap pertama, batu kapur yang sudah dihaluskan secara pneumatik ditiupkan dalam tungku boiler dimana temperatur berkisar antara 900 hingga 1250 °C. Batu kapur akan terdekomposisi membentuk kalsium oksida dan karbon dioksida (Ilari Ekman and Antti Ahti, 2004):

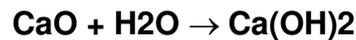


Sulfur dioksida dalam tungku dan semua sulfur trioksida dalam gas buang akan bereaksi dengan kalsium oksida, membentuk kalsium sulfat.

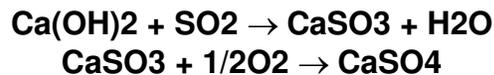


Campuran produk reaksi yang berbentuk partikulat dan abu terbang (*fly ash*) akan terbawa aliran gas buang masuk ke reaktor aktivasi.

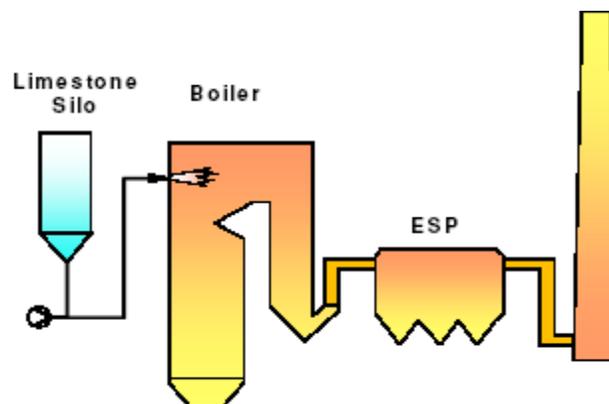
Pada fase kedua proses LIFAC adalah gas buang dihumidifikasi dengan menginjeksi air kedalam reaktor aktivasi. Dalam reaktor aktivasi, kalsium oksida yang ada dikonversi menjadi kalsium hidroksida:



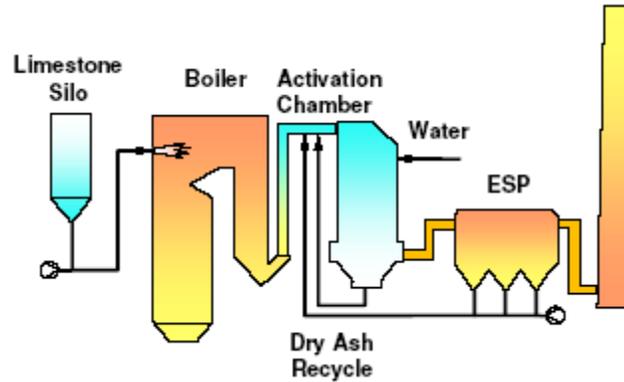
Sulfur dioksida bereaksi dengan cepat dengan bentuk kalsium hidroksida, sehingga membentuk kalsium sulfat, dimana sebagian teroksidasi menjadi kalsium sulfat:



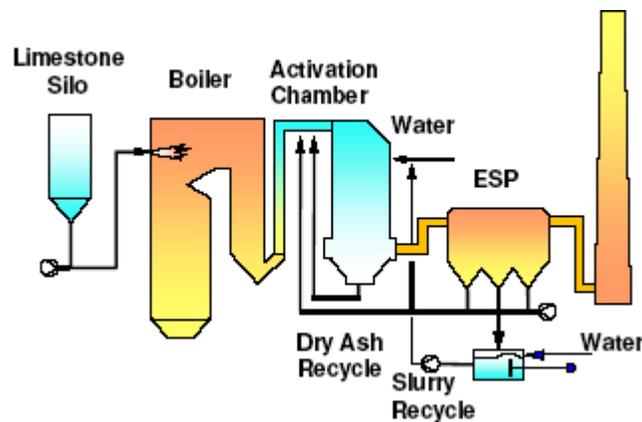
Produk reaksi proses ini adalah bubuk padat. Sebagian partikel akan terpisah pada dasar reaktor aktivasi dan sebagian lainnya tertangkap pada alat penangkap debu electrostatic precipitator. Partikel yang terkumpul pada dasar reaktor dan ESP dapat diumpan balik kedalam reaktor aktivasi.



a. Langkah pertama injeksi batu kapur pada tungku



b. Langkah kedua aktivasi dan daur ulang abu pada reaktor



c. Langkah ketiga pemanfaatan limbah air yang ada

Gambar 7. Langkah proses LIFAC yang lebih menyempurnakan sistem injeksi batu kapur sehingga efisiensi penangkapan SO₂ lebih tinggi (Ilari Ekman and Antti Ahti, 2004).

Limbah dari proses LIFAC berupa produk akhir yang kering dan stabil bersama dengan abu terbang (*fly ash*). Produk ini dapat digunakan untuk material pembuatan semen, corblok, dan sebagai material konstruksi jalan. Proses LIFAC tidak menghasilkan limbah cair. Reaktor aktivasinya dapat memanfaatkan limbah cair PLTU yang diinjeksikan sebagai pengganti air bersih (*fresh water*).

Aplikasi proses LIFAC di China adalah pada Nanjing Xiaguan Power Plant kapasitas 2x125 MW dan Qianqing Power Plant kapasitas 125 MWe boiler (Ilari Ekman and Antti Ahti, 2004). Efisiensi penangkapan SO₂ pada kedua PLTU ini adalah:

- 75 % (dengan rasio Ca/S 2.5) pada Nanjing Xiaguan, dan
- 65 % (dengan rasio Ca/S 2.35) pada Qianqing.

4. PERBANDINGAN DENGAN DESULFURISASI LAIN

Perbandingan efisiensi penangkapan SO_2 dan biaya investasi dari sistem pengendalian emisi SO_2 diberikan dalam Tabel 2.

Terlihat bahwa injeksi batu kapur dan pencampuran batubara membutuhkan nilai investasi yang rendah namun kandungan sulfur batubara yang bisa ditangani tidak boleh diatas 1%. Dengan mempertimbangkan kandungan sulfur dalam batubara Indonesia yang relatif rendah dan kebutuhan efisiensi penangkapan SO_2 sekitar 55%-70% serta pertimbangan biaya investasi yang rendah, maka injeksi batu kapur menjadi alat desulfurisasi yang efektif dan efisien khususnya pada PLTU batubara yang ada namun belum memiliki desulfurisasi. Selain itu, injeksi batu kapur juga dapat diterapkan pada PLTU yang menggunakan campuran batubara untuk menurunkan kandungan sulfurnya.

Tabel 2. Perbandingan Sistem Pengaturan Emisi SO_2

| Parameter | Injeksi Batu Kapur *) | FGD Kering **) | FGD Basah **) | Pencampuran Batubara *) | LIFAC /LIMB ***) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------------|------------------|
| Reagent | Batu kapur | Kapur | Batu Kapur | - | Batu Kapur |
| Produk Akhir | Gypsum/Landfill | Gypsum/Landfill | Gypsum /Landfill | - | Gypsum /Landfill |
| Sulfur | 1% | <2,5% | <6% | 1% | ~2.8% |
| Efisiensi Penangkapan | 30-70% | 90-95% | >95% | ~70% | 75-90% |
| Konsumsi Listrik | 0.7% | 0.7% | 1-2% | 0.5% | 1.0-1.5% |
| Biaya Reagent | \$15/ton | \$60/ton | \$15/ton | \$0/ton | \$15/ton |
| Nilai investasi | \$10-15/kWh | \$80-105/kWh | \$80-150/kWh | \$-40/kWh | \$30-80/kWh |

Sumber: *) Reuther (1989).

***) Rader P., J. Augeli.and S.Ahman S (2000).

***) Nolan PS (1998; 2000)

5. KESIMPULAN

Pencampuran batubara berpotensi dapat menurunkan emisi gas SO_2 hingga 70%. Besarnya nilai investasi yang dibutuhkan tergantung pada seberapa besar modifikasi fasilitas penanganan batubara yang telah dimiliki saat ini.

Secara kasar patokan peralatan untuk menurunkan emisi SO₂ adalah US\$ 40/kWh.

Penelitian skala laboratorium menunjukkan bahwa tingkat penurunan emisi SO₂ adalah bervariasi 17% hingga 70% pada rasio molar Ca/S 1 hingga 3 dan ukuran batukapur yang digunakan antara 50 hingga 200 mesh.

Perbandingan investasi menunjukkan bahwa metode injeksi batukapur ini lebih rendah dibandingkan metode lain seperti *dry scrubber* dan *wet scrubber*, yaitu sekitar US\$10-15/kWh.

Dengan mempertimbangkan kandungan sulfur dalam batubara Indonesia yang relatif rendah dimana kebutuhan efisiensi penangkapan SO₂ sekitar 55%-70%, dan mempertimbangkan biaya investasi yang rendah, serta pertimbangan lahan yang terbatas, maka injeksi batu kapur dan pencampuran batubara menjadi pilihan yang optimal khususnya pada PLTU batubara yang tidak memiliki desulfurisasi. Kedua metode ini dapat pula digabungkan agar didapat lebih menurunkan emisi SO₂.

DAFTAR PUSTAKA

- Youvial M, Sastrawinata, Yurismono (1999), *Laporan Akhir Studi Kelayakan Pengendalian Emisi SO₂*, UPT LSDE –BPPT, Maret 1999.
- Yurismono H., Cahyadi, Yenni Westi (2003), *Pengendalian SO₂ dengan Sistem Injeksi Batu Kapur pada PLTU Batubara*, Laporan Akhir RUT, UPT LSDE-BPPT.
- Bhamidipati V.N. and W.C. Gibson (2003), *Considerations for Low Sulfur Coal Blending*, B. L. England Station, US.
- Direktorat Batubara - ESDM (2005), *Data spesifikasi batubara perusahaan tambang batubara Indonesia tahun 2004*, Jakarta, Indonesia.
- Ilari Ekman and Antti Ahti (2004), *Experiences of LIFAC FGD In Chinese Boiler*, Proceeding China International deSO_x deNO_x Exhibition & Conference 2004, Beijing, P.R.China.
- Kim Y.Z., J.K. Han, H.K. Hong, S.K. Lee (1999), *A Coal Blending Experience for the Reduction of Power Plant SO_x Emission*, Samchonpo Thermal Power Site Division, KEPCO, KyongNam Province, Korea.
- Nolan P.S. (1998), *Flue Gas desulfurization in China*, Babcock & Wilcox, International Electric Power for China.
- Nolan P.S. (2000), *Flue Gas Desulfurization, Technologies for Coal-Fired Power Plant, Low Rank Coal Utilization*, ICS, Jakarta.
- Rader P., J. Augeli and S.Ahman (2000), *Alstom Power FGD Technologies: SO₂ Compliance for Low Rank Coals at the Lowest Life Cycle Cost*, Low Rank Coal Utilization, ICS, Jakarta.
- Reuther J.J. (1989), *Applied Coal Combustion Basic*, The Pennsylvania State University, USA.