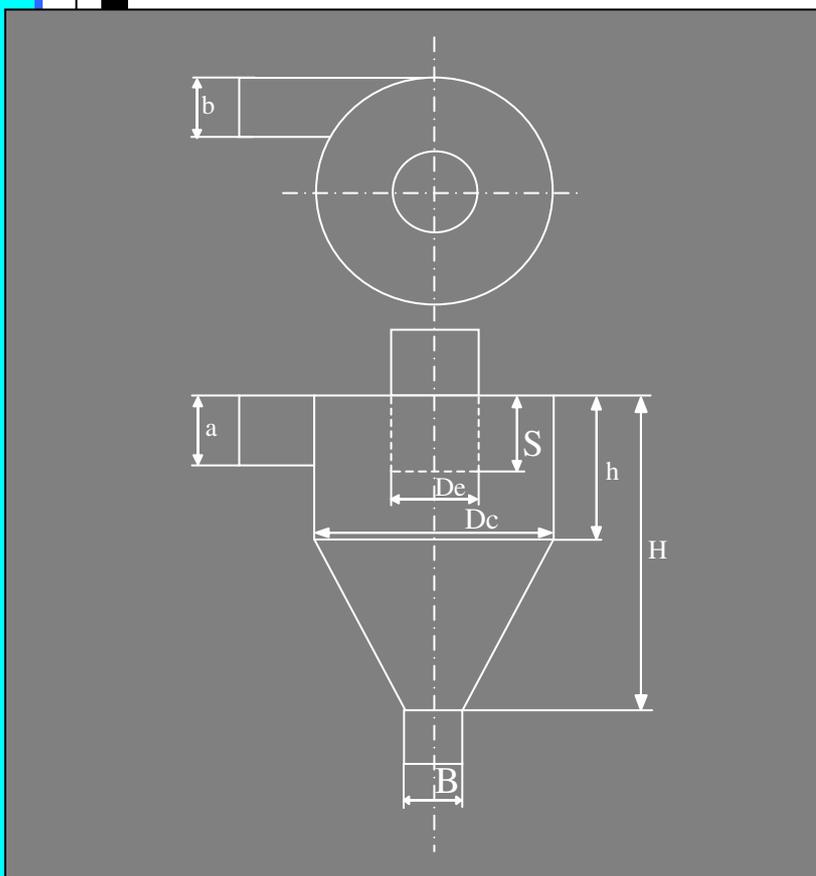


MESEKES

Jurnal Teknik Mesin
Volume 21 - No.1 - April 2006



EDITORIAL

EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua), A. Suwono,
D. Suharto, K. Bagiasna,
S. D. Jenie, S. S. Brodjonegoro,
Abdurrachim, I. Nurhadi,
R. Suratman, P. S. Darmanto.

MITRA BESTARI

I. P. Nurprasetio (ITB)
I. S. Putra (ITB)
A. I. Mahyuddin (ITB)
Y. Yuwana (ITB)
Z. Abidin (ITB)
P. Sutikno (ITB)
T. Hardianto (ITB)
T. A. F. Soelaiman (ITB)
N. P. Tandian (ITB)
S. Wiryolukito (ITB)
A. Basuki (ITB)

REDAKSI PELAKSANA

A. D. Pasek (Ketua), I. G. W. Puja,
Indrawanto, W. Adriansyah,
A. Wibowo, I. N. Diasta.

ALAMAT REDAKSI

Gedung LITBANG Sarana dan
Prasarana-Lt.III
Institut Teknologi Bandung
Jalan Tamansari 126
Bandung 40132
Tel. :(022)-2502342
Fax: (022)-2502342
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id

CARA BERLANGGANAN

Permintaan berlangganan dapat
dikirimkan ke alamat redaksi di
atas.

Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun
Bulan April dan Oktober.

Makalah pertama dalam Jurnal Mesin Volume 21 No.1 ini ditulis oleh Agusmian Partogi, Zainal Abidin dan Komang Bagiasna dari Laboratorium Dinamika Pusat Rekayasa Industri. Makalah ini menyajikan pengembangan model matematik dan simulasi pengaruh panjang dan waktu rekam terhadap besar kesalahan *magnitude* Fungsi Respon Frekuensi (FRF) pada pengujian dengan metode eksitasi kejut. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB pada empat model sistem getaran satu derajat kebebasan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa harga kesalahan *magnitude* FRF yang diperoleh sangat dekat dengan besar kesalahan yang dihitung dengan menggunakan model matematik yang dibuat.

Makalah kedua berjudul Modifikasi *Top Cyclone* untuk Meningkatkan Kinerja Suatu Pabrik Semen yang ditulis oleh Prihadi Setyo Darmanto dan Arief Syahlan dari Program Studi Teknik Mesin ITB. Pengaruh modifikasi terhadap pola aliran material dalam siklon disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.1. Modifikasi *Top Cyclon* ini dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan material yang berakibat pada peningkatan produksi, dan juga mengurangi kadar abu batubara dan menurunkan konsumsi panas spesifik. Hasil uji lapangan pada siklon yang dimodifikasi menunjukkan bahwa hal-hal yang diinginkan tersebut dapat dicapai.

Makalah ketiga ditulis oleh S.A. Widyanto dkk. dari Jurusan Teknik Mesin Universitas Gajah Mada. Makalah ini membahas keutamaan metoda *Indirect Pressure-less Sintering* untuk mendapatkan variasi kekuatan tarik yang terpanjang dari material PVC. Pengaruh variabel-variabel penting seperti temperatur dan waktu sintering dibahas pada makalah ini, dan besaran optimum diberikan sebagai kesimpulan.

Crack Detection Using Operating Deflection Shape merupakan judul makalah ke empat yang ditulis oleh Tran Khanh Duong, alumnus mahasiswa magister teknik mesin, Program Studi Teknik Mesin ITB, bersama dengan para mantan pembimbingnya. Makalah ini menyajikan hasil-hasil kajian numerik dan eksperimental terhadap metoda deteksi retak berbasis getaran yang dikembangkan. Data-data pengukuran yang diperoleh dari *Laser Doppler Vibrometer* (LDV) dianalisis dengan metoda *Operating Deflection Shape* (ODS) yang diusulkan. Hasilnya dibandingkan dengan kajian numerik dengan menggunakan program NASTRAN. Hasil-hasil kajian pada berbagai geometri 2D dan 3D menunjukkan bahawa metoda yang dikembangkan dapat digunakan untuk mendeteksi lokasi retakan.

Makalah kelima ditulis oleh Budi Hartono Setiamarga dkk. dari Laboratorium Teknik Metalurgi, Program Studi teknik Mesin ITB. Makalah yang berjudul *Pack Carburizing* pada *Sprocket* Sepeda Motor dengan Material Baja Karbon Rendah, membahas cara-cara dan hasil proses pengerasan permukaan dengan menggunakan karbon aktif pada sebuah sprocket sepeda motor. Sebagai Kesimpulan yang diberikan adalah parameter proses optimum dan material bantu yang digunakan untuk mendapatkan *effective case depth* yang hampir sama dengan *sprocket* asli buatan Jepang.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin ini dapat memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 21, No. 1, April 2006

Diterbitkan oleh : Program Studi Teknik Mesin, FTI
Institut Teknologi Bandung

Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

DAFTAR ISI

<i>Analisis besar kesalahan magnitude fungsi respon frekuensi hasil pengujian dengan metode eksitasi kejut akibat keterbatasan panjang waktu rekam</i> Agusmian Partogi, Zainal Abidin dan Komang Bagiasna	1
<i>Modifikasi top cyclone untuk meningkatkan kinerja suatu pabrik semen</i> Prihadi Setyo Darmanto dan Arief Syahlan	10
<i>Influence of sintering temperature and holding time on tensile strength and shrinkage of pvc specimen on indirect pressure-less sintering process</i> S.A. Widyanto, S. Riyadi, A.E. Tontowi, Jamasri and H.S. Rochardjo	16
<i>Crack detection using operating deflection shape</i> Tran Khanh Duong, Djoko Suharto, Komang Bagiasna, Zainal Abidin	21
<i>Pack carburizing pada sprocket sepeda motor dengan material baja karbon rendah</i> Budi Hartono Setiamarga, Novi Kurniawati dan Umen Rumendi	28

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 21, No. 1, April 2006

MODIFIKASI *TOP CYCLONE* UNTUK MENINGKATKAN KINERJA SUATU PABRIK SEMEN

Prihadi Setyo Darmanto⁽¹⁾ dan Arief Syahlan⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratorium Teknik Pendingin, Program Studi Teknik Mesin, FTI – ITB

⁽²⁾Institut Semen dan Beton Indonesia

Ringkasan

Peningkatan produksi suatu pabrik semen dapat dilakukan dengan cara meningkatkan rasio antara produk klinker dan laju umpan bahan baku (*clinker to kiln feed ratio - CKFR*). Salah satu metode untuk meningkatkan CKFR adalah dengan meningkatkan efisiensi pemisahan material dari siklon paling atas (*top cyclone*). Selain untuk meningkatkan produksi klinker, peningkatan efisiensi pemisahan siklon paling atas juga diikuti oleh akibat positif lain yaitu menurunkan konsumsi panas spesifik serta mengurangi kadar abu batubara karena biasanya gas yang keluar dari siklon dimanfaatkan untuk pengeringan batubara. Tulisan ini membahas modifikasi geometri siklon dengan cara sederhana dan murah di suatu pabrik semen dalam rangka meningkatkan kinerjanya. Usaha tersebut telah diaplikasikan di salah satu pabrik semen di Indonesia dan terbukti dapat meningkatkan kinerja pabrik antara lain peningkatan produksi, pengurangan konsumsi panas, dan peningkatan kualitas batubara yang dipakai sebagai bahan bakar utama.

Abstract

Clinker production of a cement plant can be increased by rising clinker to kiln feed ratio-CKFR. One of the methods for increasing CKFR is by improving the separating efficiency of the top cyclone. The increase of separating efficiency of the top cyclone causes not only the increase of production, but is also followed by the lowering of specific heat consumption and percentage of ash in the coal because the exit gas from the top cyclone is normally used for coal drying. This paper presents a simple and cheap modification of the top cyclone that has been applied in a Indonesian cement plant. The results show that the proposed modification can simultaneously increase clinker production, lower both of specific heat consumption and percentage of ash in the fine coal that used as the main fuel of the plant.

Keywords: *top cyclone, separation efficiency, specific heat consumption*

1. PENDAHULUAN

Sejak digulirkannya peningkatan pembangunan infrastruktur di Indonesia, kebutuhan semen dalam negeri meningkat dengan laju sekitar 10 hingga 15% per tahun. Dengan kapasitas produksi seluruh pabrik semen di Indonesia efektif sekitar 45 juta ton serta produksi tahun 2004 sekitar 36 juta ton, diperkirakan mulai tahun 2008 akan terjadi impor semen bila tidak segera dilakukan pembangunan pabrik baru atau peningkatan kapasitas pabrik yang ada [1]. Pembangunan pabrik baru selain memerlukan sekitar tiga tahun sejak studi kelayakan hingga produksi perdana, juga memerlukan biaya yang tinggi (sekitar 160 US \$ per ton produksi semen tahunan) [1]. Selain itu pada akhir-akhir ini harga bahan bakar meningkat sehingga mau tidak mau semua pabrik semen harus melakukan penghematan di berbagai sektor produksinya agar mampu menekan biaya produksi. Bagi pabrik semen, biaya energi (termal dan listrik) bisa mencapai 40 hingga 50% [1]. Dengan alasan waktu dan keterbatasan biaya, beberapa pabrik semen di Indonesia memilih cara meningkatkan produksi pabrik yang ada dengan berbagai cara. Batasan utamanya adalah biaya yang seminimal mungkin agar *break event point* perbaikan tidak terlalu panjang. Salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas produksi dan sekaligus

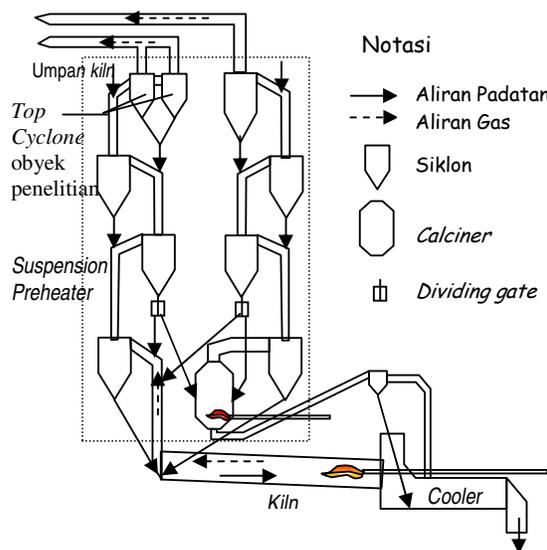
menurunkan biaya energi adalah dengan meningkatkan efisiensi pemisahan *top cyclone* dari sistem *suspension preheater*, yaitu tempat dimana bahan baku semen diumpankan. Sebagian besar bahan baku tersaring oleh *top cyclone* ini akan diproses menjadi klinker, dan yang tidak dapat disaring, karena terlalu lambat ukuran partikelnya, akan dikembalikan ke silo atau dicampur kembali dengan *fresh kiln feed* (bahan baku yang baru) setelah dipisahkan dari gas pembawa di *electrostatic precipitator* (EP).

Cara evaluasi efisiensi pemisahan sebuah siklon telah banyak dikemukakan oleh beberapa peneliti terdahulu [1-4]. Kebanyakan diturunkan secara empirik mengingat kompleksitas aliran aerosol di dalam sebuah siklon serta variasi geometri yang banyak. Beberapa model perhitungan efisiensi pemisahan sebuah siklon telah diusulkan, antara lain model pengendapan sentrifugal yang diusulkan oleh Rosin dan diperbaiki oleh Davies dan Lapple [5], model vorteks terpusat yang diusulkan oleh Stairmand [4], dan model pengendapan turbulen dengan pencampuran lateral sempurna yang diusulkan oleh Fuchs [2] dan kemudian diperbaiki oleh Leith dan Licht [6] untuk menyempurnakan beberapa konstanta yang dipakai.

Penelitian ini mempresentasikan suatu modifikasi sederhana geometri *top cyclone* dari suspension preheater suatu pabrik semen di Indonesia dengan tujuan utama untuk meningkatkan kapasitas produksi serta menurunkan konsumsi energi termal spesifik. Perhitungan parameter yang diubah untuk meningkatkan efisiensi pemisahan siklon mengacu pada model yang dikembangkan oleh Leith dan Licht [6].

2. SIKLON OBYEK PENELITIAN

Skematik peralatan utama dan aliran material di dalam sebuah pabrik semen dengan *suspension preheater* dua string dan satu kalsiner diberikan pada Gambar (1). Umpan kiln dimasukkan ke dalam sistem *suspension preheater* pada saluran gas yang menuju *top cyclone*. Umpan kiln tersebut kemudian terangkat oleh aliran gas sambil dipanaskan dan dikeringkan menuju *top cyclone* untuk kemudian dipisahkan kembali dari gas pembawa. Umpan kiln yang terpisah kemudian menuju siklon yang lebih bawah untuk dipanaskan lagi oleh gas yang lebih tinggi temperaturnya di dalam saluran dan siklon-siklon di bawah *top cyclone*. Akhirnya umpan kiln dipisahkan dari gas pembawanya oleh siklon paling bawah untuk kemudian dialirkan secara gravitasi menuju *kiln* dan *cooler*. Umpan *kiln* yang tidak dapat dipisahkan oleh *top cyclone* akan dipisahkan di *electrostatic precipitator* (EP). Semakin tinggi efisiensi pemisahan *top cyclone*, semakin banyak pula laju umpan kiln yang dapat diproses menjadi klinker, sekaligus meningkatkan efisiensi pemanasannya di *suspension preheater* sehingga berakibat penurunan konsumsi panas spesifik. *Top cyclone* yang menjadi obyek penelitian ditunjukkan dalam Gambar (1). *Top cyclone* tersebut merupakan dua siklon yang bekerja secara paralel. Desain seperti ini dimaksudkan untuk memperoleh efisiensi pemisahan yang tinggi, karena memiliki diameter badan siklon yang lebih kecil bila dibandingkan dengan desain hanya satu siklon.



Gambar 1. Skematik peralatan utama dan aliran material di sebuah pabrik semen

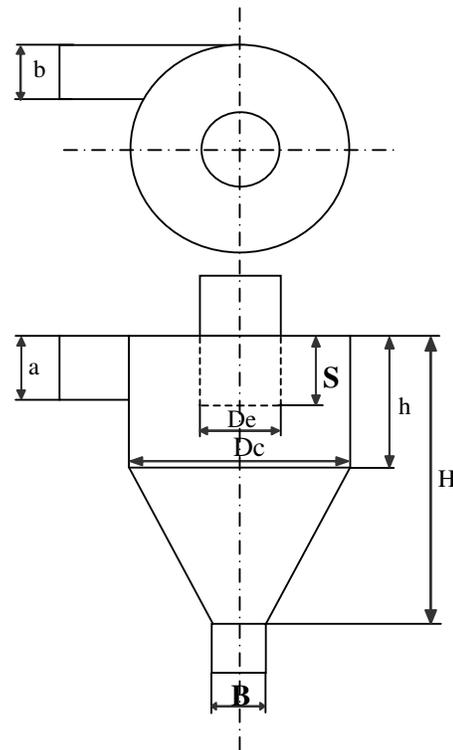
3. TEORI PENINGKATAN EFISIENSI PEMISAHAN SEBUAH SIKLON

Notasi dimensi siklon sederhana diberikan pada Gambar (2). Dengan mengacu notasi pada Gambar (2) tersebut, persamaan untuk mengevaluasi efisiensi pemisahan sebuah siklon yang diusulkan oleh Leith dan Licht [6] adalah:

$$\eta_c(x) = 1 - \exp \left[-C_1 \left(\frac{\tau G Q}{D_c^3} (n+1) \right)^{\frac{C_2}{(n+1)}} \right] \quad (1)$$

n adalah eksponen vorteks yang dinyatakan sebagai :

$$n = 1 - (1 - 0,683 \cdot D_c^{0,14}) \left(\frac{T}{294,44} \right)^{0,3} \quad (2)$$



Gambar 2. Dimensi siklon sederhana

dan Q , T , dan τ adalah berturut-turut debit aliran, temperatur gas dan waktu relaksasi. Untuk siklon konvensional nilai $C_1 = 2$ dan $C_2 = 0,5$. Faktor geometri G ditentukan berdasarkan persamaan:

$$G = \frac{8 K_c}{K_a^2 K_b^2}, \quad K_a = \left[\frac{a}{D_c} \right],$$

$$K_b = \left[\frac{b}{D_c} \right], \quad \text{dan} \quad K_c = \frac{(2 V_s + V)}{2 D_c^3} \quad (3)$$

dengan b adalah lebar saluran masuk dan D_c adalah diameter siklon. Volume ruangan bebas (V_s) di luar saluran gas keluar didefinisikan :

$$V_s = \frac{\pi(S - a/2)(D_c^2 - D_e^2)}{4} \quad (4)$$

dimana S , a , dan D_e berturut-turut adalah panjang saluran keluar dihitung dari atap siklon, tinggi penampang saluran masuk dan diameter saluran keluar siklon. Penulis dalam penelitiannya[7,8] menghasilkan

nilai konstanta pada Persamaan (1) yang berbeda dengan usulan Leith dan Licht. Untuk nilai fluks massa padatan antara 12 hingga 24 [kg/(s.m²)], kisaran nilai konstanta C₁ dan C₂ yang diperoleh adalah C₁ = 1,15 hingga 1,332 dan C₂ = 0,365 hingga 0,4. Namun demikian untuk distribusi partikel dalam aerosol seperti layaknya material baku semen, menurut Duda [1] belum pernah efisiensi pemisahan siklon di pabrik semen dapat mencapai lebih dari 96%.

Pada Persamaan (1), efisiensi pemisahan akan naik bila nilai $\left[C_1 \left(\frac{\tau G Q}{D_c^3} (n+1) \right)^{\frac{C_2}{(n+1)}} \right]$ meningkat. Ini berarti

bahwa efisiensi pemisahan suatu siklon meningkat bila D_c mengecil, dan atau C₁, C, Q, G, τ dan n meningkat. Khusus untuk G, nilainya akan meningkat bila K_c meningkat dan atau (K_a.K_b) berkurang, yang berarti pula luas penampang saluran aerosol masuk ke dalam siklon mengecil. Pengecilan penampang masuk inilah yang paling mudah dan murah dilakukan pada siklon yang sudah terpasang, selain waktu modifikasinya singkat sehingga tidak mengganggu operasi terlalu lama. Namun demikian pengecilan penampang saluran masuk, yang berarti meningkatkan kecepatan rata-rata aliran aerosol di penampang tersebut, berdampak meningkatkan tahanan aliran, yang berarti pula meningkatkan daya motor penggerak fan. Oleh sebab itu diperlukan optimasi agar hasil akhirnya tetap memberikan dampak positif terhadap kinerja pabrik. Hal inilah yang dilakukan dalam penelitian ini.

4. MODIFIKASI GEOMETRI DAN SIMULASI ALIRAN DI DALAM TOP CYCLONE

Pengukuran langsung untuk mengetahui efisiensi pemisahan *top cyclone* yang ada di lapangan tidak mungkin dilakukan mengingat *suspension preheater* merupakan rangkaian seri dari empat tingkat siklon. Oleh sebab itu perkiraan nilai efisiensi siklon sebelum dimodifikasi dilakukan dengan dasar tambahan debu pada batu bara akibat pengeringan oleh gas yang keluar dari *top cyclone* ini dan kebutuhan gas untuk pengeringan tersebut. Dengan mengetahui kedua besaran ini konsentrasi debu dalam gas yang keluar dari siklon dapat diperkirakan, sehingga efisiensi pemisahannya dapat diestimasi pula.

4.1. Evaluasi Efisiensi Pemisahan Top Cyclone Sebelum Modifikasi

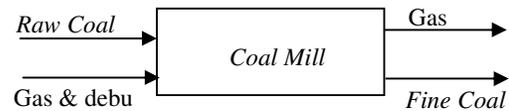
4.1.1. Pengukuran laju aliran gas

Pengukuran dilakukan pada saluran gas yang menuju ke peralatan penggilingan batu bara (*coal mill*) yang berdiameter 0,9 m. Temperatur gas sekitar 360°C atau 633 K. Pada temperatur tersebut massa jenis gas yang diasumsikan merupakan campuran antara CO₂ dan udara dengan perbandingan massa sekitar 2,5 : 1 adalah sekitar ρ_{gas} = 0,65 kg/m³. Pengukuran kecepatan aliran rata-rata gas dilakukan dengan menggunakan *Pitot Tube*. Hasil pengukuran menunjukkan kecepatan aliran gas rata-rata sebesar 26 sampai dengan 27 m/s. Dengan demikian debit aliran gas menuju *coal mill* adalah

sekitar 62000 m³/jam (perkiraan dari desainer sekitar 67000 m³/jam). Kapasitas *coal mill* saat pengukuran adalah 30 ton/jam (TPH) produk (*fine coal*).

4.1.2. Perkiraan konsentrasi debu dalam gas.

Perkiraan konsentrasi debu dalam gas dilakukan berdasarkan kenaikan kadar debu di dalam *fine coal* relatif terhadap umpan (*raw coal*). Perhatikan Gambar (3) yang merupakan skema aliran massa pada *coal mill* :



Gambar 3. Skema aliran material dalam Coal Mill.

Produksi *fine coal* adalah 30 ton/jam (TPH) dengan kadar air 3% (0,9 TPH), dan kadar debu (*ash*) sebesar 15,5 % (4,65 TPH). Dengan demikian produk *fine coal* saja adalah 81,5% (24,45 TPH). Data *raw coal* adalah sebagai berikut, kadar air 11% dan kadar debu (*ash*) 6% *dry basis*. Apabila dimisalkan tidak terjadi kebocoran material dalam sistem *coal mill*, maka *raw coal* saja yang diumpangkan juga harus sama nilainya dengan produk yang dihasilkan yaitu sebesar 24,45 TPH. Jika umpan *raw coal* termasuk air dan debu adalah X TPH, maka persamaan neraca massa dalam sistem *coal mill* adalah:

$$0,11 X + (0,89 \times 0,06) X + 24,45 = X \quad (5)$$

Dari Persamaan (5) diperoleh nilai X = 28,9 TPH. Dengan demikian massa debu (*ash*) dalam *raw coal* adalah = 0,06 x 0,89 x 28,9 TPH = 1,543 TPH. Jadi tambahan debu dari gas adalah sebesar = (4,65 – 1,543)/TPH = 3,1 TPH. Untuk aliran gas dengan debit 62000 m³/jam atau 40,3 TPH, akan diperoleh konsentrasi debu dalam gas sekitar = (3,1/40,3) x 100% = 7,7%.

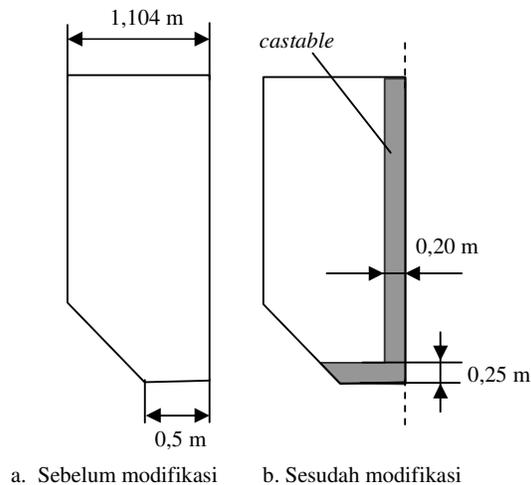
4.1.3. Perkiraan efisiensi pemisahan top cyclone

Pada umumnya berdasarkan neraca massa dan panas suatu pabrik semen [1], untuk kadar oksigen dalam gas yang keluar dari *top cyclone* sekitar 3 hingga 4 %, laju massa gas adalah sekitar 2,0 kg/kg produk klinker. Penelitian ini dilakukan pada suatu pabrik dengan produksi sekitar 4030 ton klinker/hari (TPD) atau 46,64 kg/s produk klinker. Untuk kapasitas produksi sebesar 4030 TPD tersebut, berdasarkan catatan timbangan pabrik diperlukan umpan *kiln* sekitar 66,4 kg/s dan laju massa gas yang keluar dari *top cyclone* total diperkirakan sebesar 93,4 kg/s gas. Dari umpan *kiln* sebesar 66,4 kg/s tersebut, pengumpanan dibagi ke dalam dua *string* pada *suspension preheater*. Berdasarkan data dari pabrik yang diteliti, pada *string* kiri Gambar (1) dimana *top cyclone* obyek penelitian berada diumpangkan sekitar 46%nya, yaitu sekitar 30,54 kg/s. Apabila aliran gas diasumsikan proporsional terhadap aliran material umpan *kiln* (karena kontrol proses dilakukan melalui temperatur gas keluar dari *top cyclone*), maka laju massa gas melalui *top cyclone string* kiri adalah sebesar 42,96 kg/s. Dengan kadar debu sekitar 7,7% akan diperoleh jumlah material bahan baku semen total yang tak tersaring di *top cyclone (return dust)* sebanyak 7,3 kg/s. Sedangkan yang tak

tersaring di string kiri adalah sekitar 46% dari 7,3 kg/s yaitu 3,36 kg/s. Dengan demikian perkiraan efisiensi dari *top cyclone string* kiri adalah sekitar 89%. Data-data laju aliran massa gas dan umpan kiln pada *string* kiri ini juga akan dipakai dalam simulasi aliran di dalam *top cyclone*.

4.2. Modifikasi Geometri

Modifikasi geometri dilakukan untuk memperoleh peningkatan efisiensi pemisahan lebih dari 89%. Berdasarkan gambar yang diperoleh dari pabrik yang diteliti, geometri setiap siklon sebelum dimodifikasi adalah $D_c = 3,408\text{m}$, $D_e = 2,05\text{m}$, $S = 1,9\text{m}$, $H = 11,236\text{m}$, $h = 7,547\text{m}$, $B = 0,5\text{m}$, $b = 1,104\text{m}$, dan $a = 2,125\text{m}$. Bentuk penampang saluran masuk *top cyclone* bukan merupakan segi empat. Bentuk penampang siklon yang ada di lapangan seperti pada Gambar (4) kiri, sehingga nilai a adalah tinggi penampang rata-rata. Bentuk tersebut dimaksudkan untuk memudahkan jatuhnya material tersaring.



Gambar 4. Geometri penampang saluran masuk siklon.

Modifikasi dilakukan dengan mengurangi luas penampang saluran masuk yaitu menutup salah satu sisi vertikal dan alas dengan *castable* masing-masing setebal 0,2 m dan 0,25 m. Dengan demikian luas penampang saluran berkurang dari 2,346 m² menjadi 1,8 m². Dampak dari pengurangan luas penampang ini menurut referensi [7] dan Persamaan (1) akan mengakibatkan kenaikan efisiensi siklon dari 89% menjadi sekitar 93%. Namun demikian evaluasi perubahan efisiensi yang didasarkan pada persamaan empirik ini masih perlu dicek ulang dengan perhitungan CFD melalui simulasi aliran menggunakan piranti lunak FLUENT 6.1.

4.3. Simulasi aliran material di dalam siklon

Simulasi aliran diperlukan untuk meyakinkan hasil perhitungan manual berdasarkan formulasi-formulasi empirik. Data yang diperlukan untuk simulasi adalah hasil perhitungan manual yaitu laju aliran gas 42,96 kg/s pada temperatur masuk siklon sekitar 600°C, laju massa material umpan kiln 30,54 kg/s pada temperatur sekitar 60°C. Distribusi ukuran partikel umpan kiln mengacu pada hasil penelitian laboratorium milik pabrik semen yang diteliti untuk kemudian didekati dengan persamaan Roshin-Ramler [4].

Simulasi aliran dimulai dengan memvalidasi nilai efisiensi pemisahan pada siklon sebelum dimodifikasi. Proses validasi ini diharapkan untuk memperoleh nilai efisiensi pemisahan siklon sebesar 89% sesuai dengan hasil perhitungan pada pasal 3.1. Setelah proses validasi pada siklon sebelum dimodifikasi selesai dilakukan, simulasi aliran dilanjutkan untuk siklon modifikasi. Hasil simulasi aliran saat proses validasi diberikan berturut-turut pada Gambar (5) dan Gambar (6) yang menunjukkan distribusi kecepatan partikel dan gas sepanjang lintasan di dalam siklon.

Sedangkan hasil simulasi aliran untuk siklon yang dimodifikasi penampang saluran masuk diberikan pada Gambar (7) dan Gambar (8).

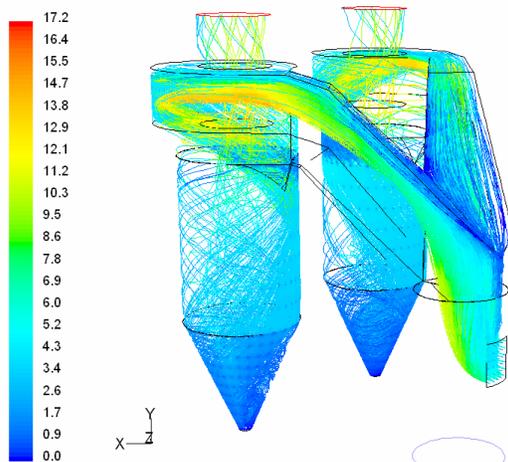
Hasil simulasi aliran tersebut memberikan perbandingan perubahan kinerja siklon antara sebelum dan sesudah modifikasi. Secara visual yang nampak dari gambar-gambar tersebut adalah bahwa kecepatan maksimum partikel maupun gas di dalam siklon. Hal ini ditandai dengan nilai maksimum kecepatan gas maupun partikel yang terlihat pada *legend* di sebelah kiri gambar. Pada kondisi eksisting, kecepatan maksimum gas maupun partikel adalah 17,2 m/s sedangkan pada kondisi modifikasi, kecepatan maksimumnya adalah 23,4 m/s. Perlu dicatat bahwa perhitungan manual hanya dapat mengevaluasi kecepatan rerata pada suatu penampang. Sedangkan dalam simulasi ini kecepatan setiap kumpulan partikel dan gas dapat ditampilkan lebih rinci. Kalau dilihat lebih detail lagi secara visual, kecepatan maksimum tersebut terjadi di lokasi dimana pengurangan luas penampang saluran terjadi.

Hal ini wajar dan menunjukkan bahwa dampak pengurangan luas penampang saluran masuk langsung berakibat kepada peningkatan kecepatan rata-rata gas maupun partikel.

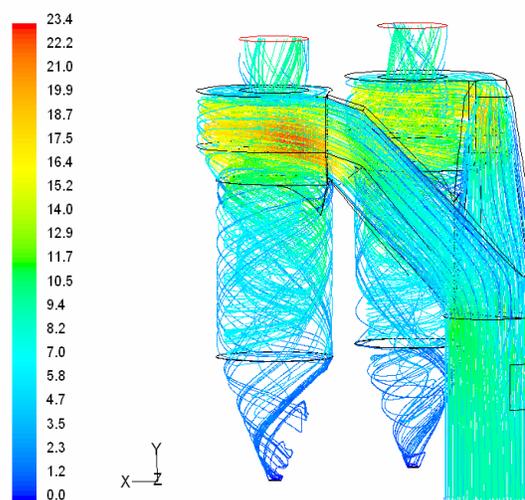
Perbandingan beberapa parameter kinerja siklon lainnya diberikan dalam Tabel (1). Dari Tabel (1) terlihat pula terjadi kenaikan tahanan aliran sekitar 1,2 mbar yang pada umumnya tidak banyak berarti bagi fan yang memiliki tekanan statik di sekitar 700 mbar. Sedangkan kenaikan efisiensi pemisahannya berkisar 3,5% yang sedikit menyimpang dari hasil evaluasi berdasarkan formulasi empirik. Berdasarkan hasil penelitian ini modifikasi dilakukan di lapangan serta diamati dampaknya terhadap kinerja pabrik.

Tabel 1. Perbandingan parameter kinerja siklon sebelum dan sesudah modifikasi.

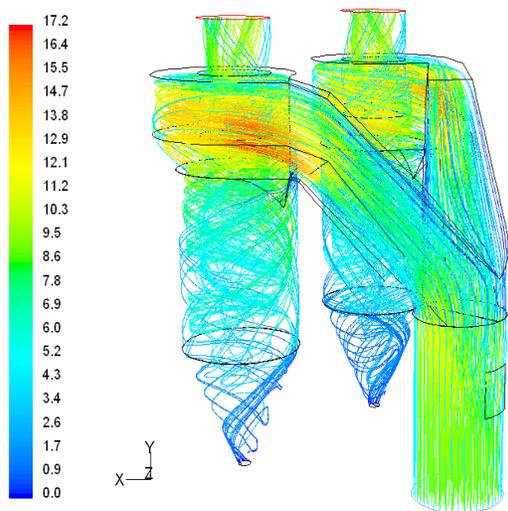
Parameter	Sebelum modifikasi	Sesudah modifikasi
Luas Penampang	2,343 m ²	1,798 m ²
Kecepatan gas rata-rata	12,15 m/s	14,86 m/s
Efisiensi Pemisahan	89,12 %	92,67 %
<i>Pressure drop</i>	230,6 Pa (2,28 mbar)	350,1 Pa (3,46 mbar)



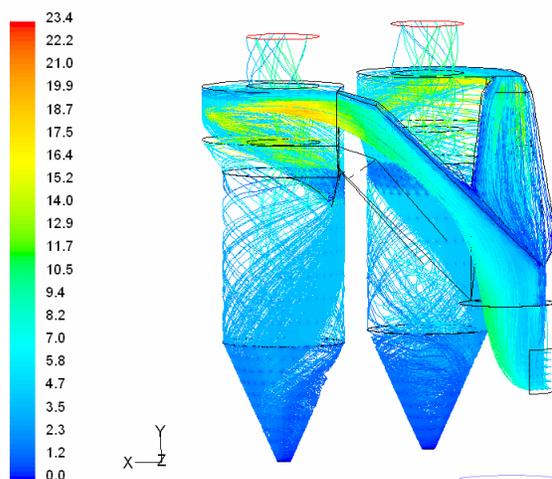
Gambar 5. Distribusi kecepatan partikel umpan *kiln* di dalam siklon sebelum modifikasi dalam satuan (m/s)



Gambar 8. Distribusi kecepatan gas di dalam siklon sebelum modifikasi dalam satuan (m/s).



Gambar 6. Distribusi kecepatan gas di dalam siklon sebelum modifikasi dalam satuan (m/s)

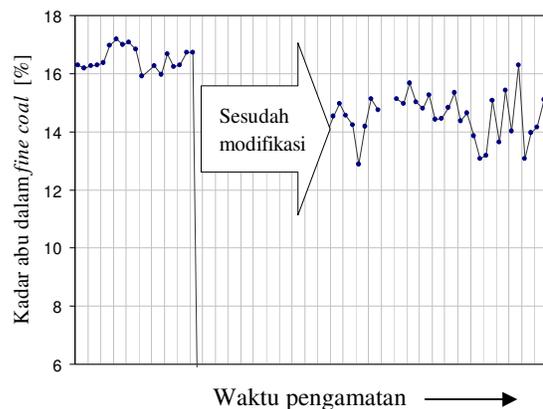


Gambar 7. Distribusi kecepatan partikel umpan *kiln* di dalam siklon sesudah modifikasi dalam satuan (m/s).

5. APLIKASI DI LAPANGAN DAN HASIL

5.1. Evaluasi Efisiensi Pemisahan Pasca Modifikasi

Evaluasi efisiensi siklon pasca modifikasi dilakukan dengan mengamati perubahan kadar abu di dalam fine coal seperti ditunjukkan pada Gambar (9). Penurunan kadar abu yang diperoleh secara rata-rata adalah sekitar 2% yaitu dari 16% menjadi 14%. Penurunan tersebut bermakna bahwa terjadi penurunan kadar debu di dalam gas pengering batubara yang berasal dari *top cyclone*. Dengan cara yang sama seperti dibahas dalam pasal 3.1, evaluasi efisiensi pemisahan *top cyclone* pasca modifikasi dilakukan dan diperoleh nilai sebesar 92,8%, sedikit lebih tinggi dari hasil simulasi numerik. Ini berarti terjadi kenaikan sekitar 3,8% dibanding pada kondisi sebelum dimodifikasi. Hasil ini menunjukkan pula terjadinya kenaikan umpan *kiln* yang diproses menjadi klinker untuk laju pengumpanan yang sama.



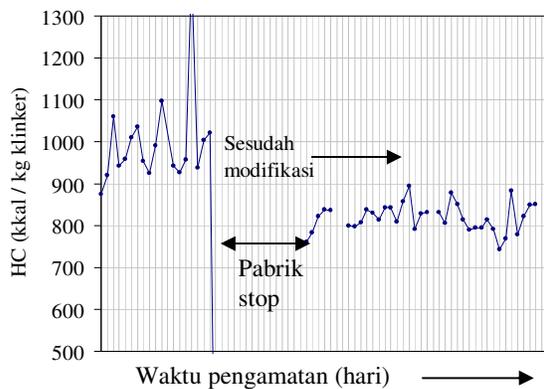
Gambar 9. Perubahan kadar abu di dalam *fine coal*.

5.2. Dampak Modifikasi Terhadap Kinerja Pabrik

Kenaikan efisiensi siklon mengakibatkan kenaikan produk secara proporsional. Dengan peningkatan efisiensi *top cyclone* sebesar 3,8% berarti terjadi pula kenaikan produksi sebesar 3,8%. Namun demikian

karena *top cyclone* yang dimodifikasi baru satu string (sebelah kiri dari *suspension preheater* Gambar (1)), maka kenaikan riil yang diperoleh di lapangan baru sebesar proporsional terhadap prosentase umpan kiln yang dimasukkan ke string kiri yaitu $46\% \times 3,8\% = 1,75\%$. Kenaikan ini cukup besar apabila dihitung secara harian yaitu sekitar 70 ton klinker per hari.

Dampak lain dari modifikasi *top cyclone* yang telah diterapkan adalah adanya penurunan konsumsi panas spesifik (*specific heat consumption*) seperti terlihat dalam Gambar (10). Hasil pengamatan menunjukkan penurunan konsumsi panas spesifik (HC) yang cukup signifikan yaitu sekitar 60 kkal/kg klinker. Hal ini berarti diperoleh penghematan biaya operasi yang cukup besar. Alasan yang dapat dikemukakan adalah akibat meningkatnya efektifitas perpindahan panas di *suspension preheater* sebagai konsekuensi meningkatnya umpan *kiln* yang diproses yang berarti pula meningkatkan turbulensi aliran.



Gambar 10. Perubahan konsumsi panas spesifik (HC) sebelum dan sesudah modifikasi *top cyclone*.

6. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan ini dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain:

1. Tujuan penelitian yaitu untuk meningkatkan kinerja pabrik dengan mengubah geometri *top cyclone* dapat dicapai.

2. Modifikasi geometri *top cyclone* yang diusulkan dan diterapkan di lapangan sangat sederhana dengan biaya murah dan waktu pengerjaan singkat yang dapat dilakukan saat *overhaule* terencana.
3. Peningkatan produksi harian yang diperoleh sekitar 70 ton/hari dan penurunan konsumsi panas spesifik sebesar lebih dari 60 kkal/kg klinker merupakan hasil yang signifikan.
4. Dengan usaha seperti ini pabrik semen dapat menurunkan biaya produksi yang sangat strategis di saat harga bahan bakar tinggi seperti saat ini.
5. Untuk melengkapi usaha peningkatan efisiensi pabrik akan lebih besar lagi manfaatnya apabila seluruh *top cyclone* dari kedua *string preheater* dimodifikasi sehingga diperoleh peningkatan produksi yang lebih tinggi (sekitar 3,8%).

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Duda, H Walte., *Cement-Data Book, International Process Engineering in the Cement Industry*, Bauverlag GMBH Wiesbadeen, Berlin, 1995.
2. N.A Fuchs., *The Mechanics of Aerosol*, Pergamon Press, 1964.
3. J.R Howard., *Fluidized Bed Technology, Principles and Applications*, Adam Hilger, 1976.
4. G Hetsroni., *Handbook of Multiphase Systems*, Hemisphere Corp., 1982.
5. C.E Lapple., *Process Use Many Collection Types*, *Chemical Engineering* Vol 58, No 5, 1951.
6. D Leith, and W Licht., *Air Pollution and It's Control*, A.I.Ch.E Symposium Series Vol. 68, No 126, 1972.
7. Prihadi Setyo Darmanto dan Katon Primanto, Pengembangan Perangkat Lunak Alat Bantu Perancangan Siklon Separator Hemat Energi, *Journal Teknik Mesin*, Vol 12, No 3, 1997.
8. Prihadi Setyo Darmanto dan Katon Primanto, Pengujian Karakteristik Kinerja Siklon Separator Hemat Energi, *Journal Teknik Mesin*, Vol XII, No 2, 1997.
9. J.C Stairmand., *The Design and Performance of Cyclone Separators*, *Trans. Inst. Chemical Engineers*, Vol 29, 1951.