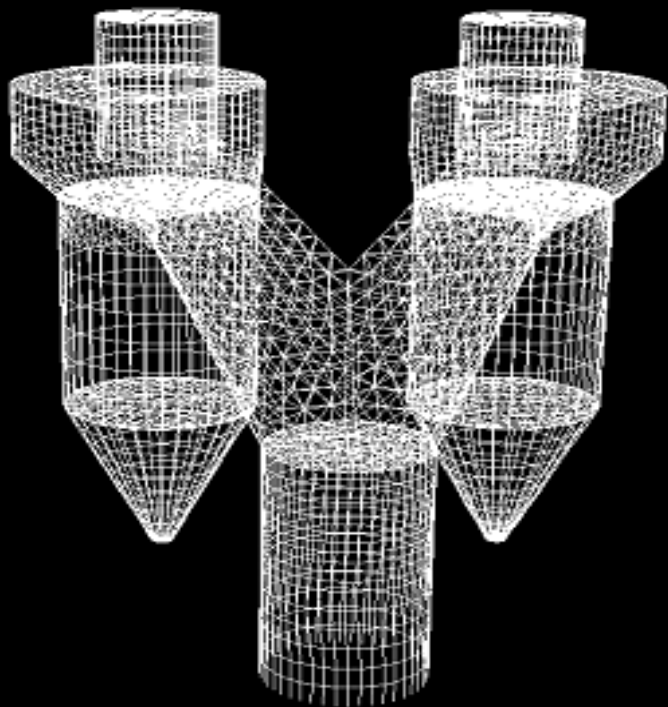


Jurnal Teknik Mesin

Jurnal Teknik Mesin
Volume XIX - No. 2 - Oktober 2004



EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua), A. Suwono,
D. Suharto, K. Bagiasna,
S. D. Jenie, S. S. Brodjonegoro,
Abdurrahim, 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
nono@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.

EDITORIAL

Pada Volume XIX no. 2, Jurnal mesin terbit dengan lima buah makalah. Makalah pertama yang berjudul Analisis Reaktor Kimia Berdasarkan Standar Inspeksi Berbasis Resiko API 581 ditulis oleh T.A. Fauzi Soelaiman dari Departemen Teknik Mesin ITB dan tim dari Departemen Pertambangan ITB. Makalah ini membahas pentingnya melakukan inspeksi resiko terhadap peralatan proses, dan hasil penerapan inspeksi resiko pada suatu reaktor kimia. Hasilnya menunjukkan bahwa metoda yang digunakan dapat dipakai untuk memprediksi resiko pada komponen-komponen reaktor kimia dengan cukup baik.

Makalah kedua berjudul Kaji Eksperimental dan Numerik Kinerja *Cyclo Dust Filter*, ditulis oleh Prihadi Setyo Darmanto dan Joko Sarsetyanto dari Departemen Teknik Mesin. Makalah ini membahas keandalan *Cyclo Dust Filter*, yang berupa gabungan siklon dan filter kain, dalam menyaring partikel dari aliran gas. Analisis keandalan dilakukan dengan kaji numerik dan eksperimen. Hasil analisis antara lain menunjukkan bahwa efisiensi pemisahan *Cyclo Dust Filter* dapat mencapai 99% yang menyamai efisiensi *electrostatic precipitator*. Disamping efisiensi, hasil analisis juga menunjukkan pengaruh parameter-parameter penting terhadap kinerja alat.

Carolus Bintoro, mahasiswa Departemen Teknik Mesin, beserta para pembimbingnya menulis makalah ketiga yang diberi judul: Kaji Komputasional Pengaruh Beban dan Keausan terhadap Kekakuan Bantalan Rol. Makalah ini membahas hasil kajian secara numerik pengaruh peningkatan keausan terhadap peningkatan kekakuan bantalan. Selain itu, kajian numerik yang dikembangkan juga berhasil memperlihatkan hubungan antara defleksi dan kekakuan serta gaya radial dan kekakuan sebagai fungsi dari keausan yang dinyatakan dalam *diametral clearance* (Cd).

Makalah keempat ditulis oleh Maria F. Sutanto yang merupakan mahasiswa program doktor yang melakukan penelitian di Laboratorium Termodinamika PPAU – IR ITB. Makalah ditulis bersama para pembimbingnya. Makalah ini membahas kaji eksperimen kinerja sudu turbin angin berbentuk silinder berputar yang dilengkapi dengan rotor Savonius. Hasil pengujian menunjukkan bahwa silinder yang berputar dapat digunakan sebagai sudu kincir angin karena adanya gaya angkat yang timbul dari efek Magnus yang terjadi pada silinder tersebut. Perbandingan panjang dan diameter silinder yang baik adalah 4.

Makalah terakhir ditulis oleh Ondřej Cundr dari Czech Technical University in Prague. Makalah yang berjudul *A Plausible Energy Yield from Palm Oil Mill Effluent*, membahas mengenai potensi limbah minyak kelapa sawit untuk dijadikan bahan bakar gas. Makalah ini memuat data-data potensi limbah yang dapat dimanfaatkan dan metoda gasifikasi yang mungkin diterapkan.

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

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. XIX, No. 2, Oktober 2004

No. ISSN: 0852-6095

Diterbitkan oleh : Departemen Teknik Mesin, FTI

Institut Teknologi Bandung

Surat ijin

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

DAFTAR ISI

<i>Analisis Resiko Reaktor Kimia Berdasarkan Standar Inspeksi Berbasis Resiko (Risk Based Inspection: RBI) API 581</i> T. A. Fauzi Soelaiman, Ahmad Taufik dan Tito Arya Soma	37
<i>Kaji Eksperimental dan Numerik Kinerja Cyclo Dust Filter</i> Prihadi Setyo Darmanto dan Joko Sarsetyanto	49
<i>Kaji Komputasional Pengaruh Beban dan Keausan Terhadap Kekakuan Bantalan Rol</i> Carolus Bintoro, Komang Bagiasna, Djoko Suharto dan Zainal Abidin	56
<i>Kaji Eksperimen Optimasi Koefisien Daya SKEA Jenis Poros Datar dengan Sudu Gabungan Silinder Berputar dan Rotor Savonius</i> Maria F. Soetanto, Aryadi Suwono, Prihadi S. Darmanto dan Ari D. Pasek	63
<i>A Plausible Energy Yield from Palm Oil Mill Effluent</i> Ing. Ondřej Cundr	70

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. XIX, No. 2, Oktober 2004

KAJI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIK KINERJA CYCLO DUST FILTER

Prihadi Setyo Darmanto dan Joko Sarsetyanto

Laboratorium Teknik Pendingin, Departemen Teknik Mesin, FTI-ITB

Ringkasan

Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi pemisahan debu suatu separator siklon (*cyclone separator*) adalah dengan menambahkan filter kain (*fabric filter*) pada saluran gas keluarnya. Gabungan antara siklon dan filter kain ini dikenal dengan nama *cyclo-dust filter*. Pada penelitian ini akan diuji kinerja *cyclo dust filter* dan aliran gas di dalamnya akan disimulasikan secara numerik dengan bantuan perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Dengan memvariasikan luas permukaan filter kain, efisiensi pemisahan debu dan tahanan aliran *cyclo dust filter* diukur. Dari hasil pengukuran diperoleh nilai efisiensi pemisahan lebih dari 99% pada alat ini. Suatu nilai efisiensi pemisah debu yang susah diperoleh pada siklon saja. Diperoleh pula bahwa tahanan aliran sistem bertambah dengan luas permukaan filter, namun kenaikannya tidak proporsional terhadap kenaikan luas permukaan. Dari simulasi aliran dapat diketahui pula posisi terbaik saluran aerosol saat memasuki siklon.

Abstract

One of the methods for increasing separation efficiency of a cyclone is to implement a fabric filter at its inner tube. The combination of cyclone separator and fabric filter is commonly called as *cyclo-dust filter*. This paper presents an experimental study of the performance test of *cyclo-dust filter* and CFD numerical simulation of the flow inside this apparatus. The experiment was conducted for some variation of filter area. The results show that the separation efficiency of more than 99% was observed. This value is normally very difficult to reach with a normal cyclone separator. The pressure drop rises with the increasing of fabric's area. However this increase of pressure drop is not proportional to the increase of the fabric's area. The CFD simulation was also used for determining the best position of inlet duct.

Key words: *cyclone separator, fabric filter, separation efficiency, pressure drop.*

I. PENDAHULUAN

Peraturan tentang baku mutu emisi partikulat dari industri yang mengeluarkan debu yang dapat mencemari lingkungan semakin ketat. Mulai tahun 2000, baku mutu emisi partikulat di Indonesia dibatasi maksimum 80 mg/Nm³. Ketatnya batasan emisi ini akan mendorong para peneliti untuk mencari solusi peralatan yang mampu menyaring aerosol hingga memenuhi batasan tersebut. Separator siklon merupakan alat pemisah debu yang telah lama dikenal. Metode desain separator siklon telah lama dikembangkan sejak Stairmand^[1,2]. Kemudian Lapple dan Leith & Licht^[3] menyempurnakan dengan berbagai bentuk geometri. Dengan meningkatnya berbagai masalah pencemaran lingkungan serta semakin pekanya masyarakat terhadap perlunya kelestarian dan kualitas udara yang baik, Koch & Licht^[4] mencoba mengusulkan metode desain yang memperhatikan peningkatan efisiensi pemisahan siklon. Namun demikian untuk ukuran partikel yang umumnya dipergunakan dalam industri semen, pencapaian efisiensi pemisahan di atas 95% masih sulit direalisasikan. Oleh karena itu, penulis dalam serangkaian penelitiannya telah ikut pula melakukan berbagai percobaan dalam rangka memperoleh suatu geometri

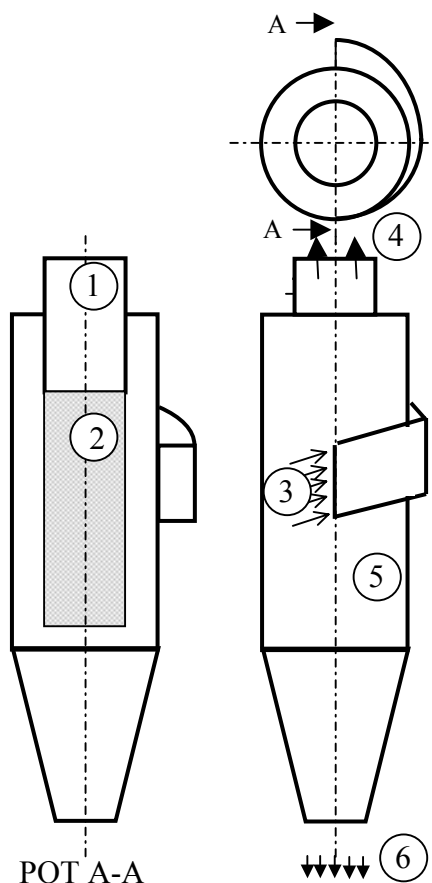
separator siklon yang hemat energi^[5]. Yang dimaksud dengan hemat energi di sini adalah tahanan aliran yang serendah mungkin untuk suatu nilai efisiensi pemisahan yang setinggi mungkin.

Untuk memenuhi kriteria baku mutu yang telah ditetapkan, acap kali separator siklon saja tidak dapat diterapkan. Beberapa industri memakai filter kain (*jet pulse* atau *vibrating filter*) atau elektrostatis presipitator sebagai salah satu solusinya. Namun demikian kelemahan dari filter kain ini selain mudah sobek akibat gaya perontokan debu terhadapnya, tahanan aliran yang ditimbulkan cukup tinggi sehingga tidak hemat energi. Perkembangan teknologi terakhir mengisyaratkan ide penggabungan antara siklon separator dan filter kain yang disebut dengan *cyclo dust filter*. Maksudnya adalah untuk meningkatkan efisiensi pemisahan siklon serta sekaligus mengurangi tahanan aliran dibandingkan dengan apabila yang digunakan sebagai penyaring adalah filter kain saja seperti pada *bag filter*. Dengan demikian diperoleh jalan tengah untuk tetap mendapatkan efisiensi pemisahan yang tinggi dengan tetap pada batasan hemat energi. Berlatar belakang pada keinginan di atas penelitian ini dilakukan.

Selain itu, optimasi penempatan saluran aerosol masuk ke dalam siklon juga diteliti secara numerik sehingga diperoleh tahanan aliran yang lebih rendah.

2. GEOMETRI CYCLO-DUST FILTER UJI

Seperti telah disebutkan di depan, *cyclo dust filter* merupakan gabungan antara siklon separator dengan filter kain.



Keterangan gambar :

1. Saluran keluar, 2. Filter kain, 3. Saluran masuk, (posisinya divariasikan dalam studi numerik), 4. Aliran aerosol tak tersaring, 5. Badan siklon, 6. Aliran debu tersaring keluar dari siklon.

Gambar 1. Geometri *cyclo dust filter* uji

Jenis siklon yang diuji adalah jenis aliran balik (*reversed flow cyclone*) yang merupakan hasil modifikasi siklon yang telah dikembangkan oleh penulis^[5] dengan bagian saluran masuk dibuat miring sebesar 15° terhadap garis horizontal. Filter kain dipilih jenis kain katun dengan porositas (ϵ) = 0,7 atau kepadatan kain (γ) = 0,3. Agar tidak terlalu mengganggu aliran di dalam siklon yang berpola berputar, bentuk filter dibuat silindris dan berdiameter sama dengan saluran keluar siklon (*inner tube*) dan dipasang pada bagian saluran keluar siklon. Geometri *cyclo dust filter* uji dapat dilihat pada Gambar 1.

Dengan konstruksi demikian partikel debu kasar akan tersaring terlebih dahulu oleh mekanisme siklon dan yang halus tersaring oleh filter kain. Dengan demikian secara umum diharapkan efisiensi pemisahan akan naik.

3. FORMULASI DASAR EFISIENSI PEMISAHAN SIKLON DAN FILTER KAIN

Mengingat kompleksitas aliran aerosol di dalam sebuah separator siklon, sangat sulit menyusun formulasi efisiensi pemisahan partikel secara analitik. Oleh karena itu banyak sekali formulasi empirik yang telah diusulkan oleh para peneliti terdahulu. Salah satu formulasi tersebut diusulkan oleh Leith dan Licht^[3] sebagai berikut :

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

n adalah eksponen vorteks dan Q adalah debit aliran. Untuk siklon konvensional nilai $C_1 = 2$ dan $C_2 = 0,5$. Faktor geometri G ditentukan berdasarkan^[9] :

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

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

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

$$V_s = \frac{\pi(S - a/2)(D_c^2 - D_e^2)}{4} \quad (3)$$

dimana S , a , dan D_e berturut-turut adalah panjang saluran keluar, tinggi saluran masuk dan diameter saluran keluar siklon. Penulis dalam penelitiannya^[5,6] 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 C_1 dan C_2 yang diperoleh adalah $C_1 = 1,15$ hingga 1,332 dan $C_2 = 0,365$ hingga 0,4. Namun demikian untuk distribusi partikel dalam aerosol seperti layaknya material baku semen, menurut penelitian penulis belum pernah efisiensi pemisahan siklon dapat mencapai lebih dari 96%^[5,6]. Oleh karena itu untuk meningkatkannya diperlukan tambahan filter kain. Efisiensi pemisahan debu oleh filter kain telah banyak diteliti. Mekanisme penimbunan partikel pada serat kain terjadi menurut lima cara yaitu secara impak (*impaction*), intersepsi (*interception*), difusi, pengendapan secara gravitasi dan elektrostatis. Hinds^[7] memberikan pendekatan untuk efisiensi pemisahan sebagai berikut:

Efisiensi secara impak (*impaction efficiency*) diberikan oleh Yeh dan Liu^[8] sebagai berikut:

$$E_I = \frac{j(Stk)}{2 Ku^2} \quad (4)$$

dengan nilai $j = (29,6 - 28 \gamma^{0,62}) R^2 - 27,5 R^{2,8}$ dan

$$Stk = \frac{\tau U_o}{d_f} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c U_o}{18 \mu d_f}$$

dimana C_c , γ , τ , U_o , ρ_p , dan d_p adalah berturut-turut faktor koreksi slip, soliditas filter, waktu relaksasi, kecepatan aliran, massa jenis partikel, dan diameter rerata partikel.

Efisiensi penimbunan serat tunggal secara intersepsi (*interception efficiency*) adalah:

$$E_R = \frac{1}{2Ku} \left[2(1+R)\ln(1+R) - (1-R) + \left(\frac{1}{1+R} \right) \right] \quad (5)$$

dimana Ku adalah faktor hidrodinamik Kuwabara yang merupakan faktor tak berdimensi yang mencakup efek distorsi medan aliran di sekitar serat akibat sangat dekatnya jarak antar satu serat dengan serat lainnya.

$$Ku = -\frac{\ln \gamma}{2} - \frac{3}{4} + \gamma - \frac{\gamma^2}{4} \quad \text{dan} \quad R = \frac{d_p}{d_f} \quad (6)$$

dimana d_f diameter serat kain, sedangkan $\varepsilon = 1 - \gamma$, dengan ε adalah porositas kain.

Efisiensi penimbunan serat tunggal secara difusi diberikan oleh Davies^[1]:

$$E_D = 2 P_e^{-2/3} \quad (7)$$

P_e adalah bilangan Peclet :

$$P_e = \frac{d_f U_o}{D} \quad (8)$$

D adalah koefisien difusi partikel.

Untuk memperkirakan efisiensi total berdasarkan efisiensi serat tunggal, perlu diperhitungkan pula penimbunan karena intersepsi partikel yang berdifusi:

$$E_{DR} = \frac{1,24 R^{2/3}}{(KuPe)^{1/2}} \quad (9)$$

untuk $Pe > 100$.

Efisiensi penimbunan serat tunggal pada proses pengendapan gravitasional adalah :

$$E_G = G(1 + R) = \frac{\rho_p d_p^2 C_c g}{18 \mu U_o} (1 + R) \quad (10)$$

Efisiensi penimbunan serat tunggal secara elektrostatis diberikan oleh Davies^[1] :

$$E_q = \left(\frac{\theta - 1}{\theta + 1} \right)^{1/2} \left(\frac{q^2}{3 \pi \mu d_p d_f^2 U_o (2 - \ln R_{ef})} \right)^{1/2} \quad (11)$$

dimana θ adalah konstanta dielektrik dan q adalah muatan partikel. Pada kasus $q = 0$, penimbunan partikel secara elektrostatis tidak terjadi.

Sedangkan untuk menghitung efisiensi total filter kain dari efisiensi serat tunggal tersebut diberikan (tanpa adanya efek elektrostatis)^[1] :

$$E_{tot} = \exp \left(\frac{-4 \alpha E_{\Sigma} t}{\pi d_f} \right) \quad (12)$$

dengan $E_{\Sigma} = E_R + E_I + E_D + E_{DR} + E_G$

Dari penurunan perumusan di atas, terlihat bahwa formulasi pemisahan debu cukup rumit untuk dirumuskan. Pada penelitian ini efisiensi pemisahan debu diukur.

4. TAHANAN ALIRAN

Tahanan aliran ditunjukkan oleh perbedaan tekanan statis fluida antara sisi masuk dengan sisi keluar gas pada *cyclo dust filter* uji. Perbedaan tekanan tersebut mewakili energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida melalui siklon. Jadi penghematan energi dapat dilakukan dengan mendesain siklon yang rugi tekanannya serendah mungkin tanpa menurunkan efisiensi pemisahan yang signifikan. Hal-hal yang mempengaruhi tahanan aliran tersebut adalah^[4] :

- Ekspansi aliran saat aerosol masuk ke dalam siklon.
- Energi yang dibutuhkan untuk menimbulkan aliran pusar (*vortex*).
- Gesekan dengan dinding siklon.

Secara teoritik Barth^[3] menurunkan hubungan untuk menentukan rugi tekanan (ΔP) sebagai fungsi faktor gesekan (Ψ) dan kecepatan tangensial V_e sebagai berikut:

$$\Delta P = \Psi \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_e^2 \quad (13)$$

dengan

$$\Psi = 2 + 3 U^{4/3} + U^2, \quad U = \frac{V_e}{V_{e0}}, \quad \text{dan} \quad V_{e0} = \frac{Q}{\pi/4 \cdot D_e^2}$$

Peneliti lain menyatakan tahanan aliran sebagai fungsi dari D_c/D_e , D_c/h_i dan λ ^[12]:

$$\Delta P = f \left[Q, \left(\frac{4 ab}{\pi D_c^2} \right), \left(\frac{D_c}{h_i} \right) \right] \quad (14)$$

Hasil eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan tahanan aliran lebih dipengaruhi oleh pembentukan *vortex* dibanding gesekan dengan dinding^[12].

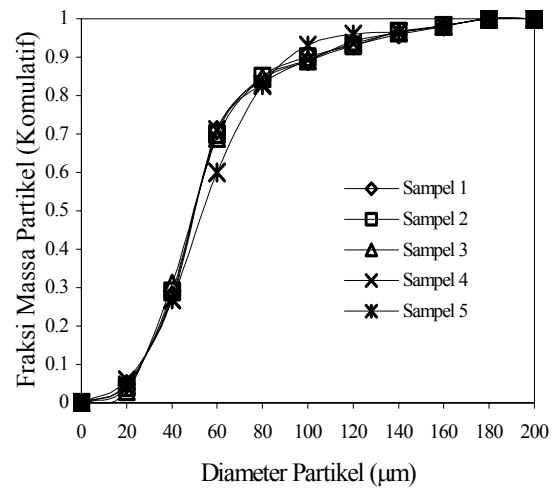
Tahanan aliran filter kain merupakan akibat efek kombinasi dari masing-masing serat kain terhadap aliran yang melaluinya. Rugi tekanan didasarkan pada total *drag force* dari seluruh serat yang oleh Davies^[9] diberikan sebagai berikut :

$$\Delta P = \frac{\mu t U_o f(\gamma)}{d_f^2} \quad (15)$$

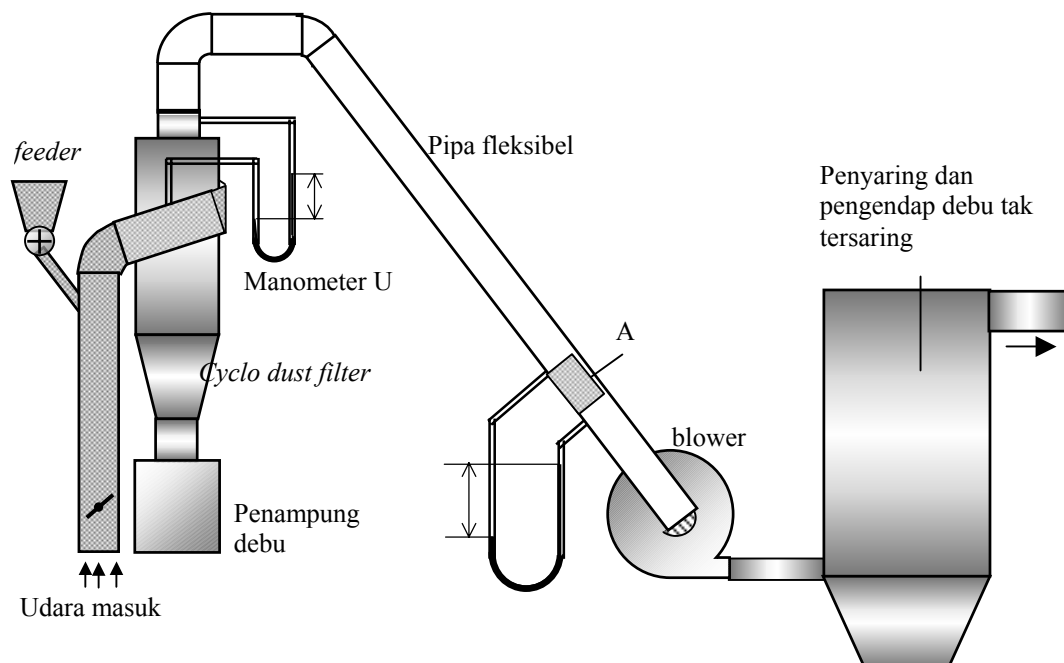
dengan $f(\gamma) = 64 \alpha^{1,5} (1 + 56 \gamma^3)$ dan $0,006 < \gamma < 0,3$ dimana γ adalah faktor soliditas kain dan μ adalah viskositas aerosol. Pada penelitian ini tahanan aliran *cyclo dust filter* uji diukur.

5. METODE DAN PERANGKAT PENGUJIAN

Pengujian karakteristik kinerja *cyclo dust filter* dimaksudkan untuk mendapatkan efisiensi pemisahan debu dan tahanan aliran untuk berbagai variasi laju aliran aerosol, panjang filter, dan konsentrasi debu dalam aerosol. Sedangkan partikel dalam aerosol merupakan partikel bahan baku semen dengan distribusi ukuran partikel berdasarkan hasil pengujian di laboratorium suatu pabrik semen adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Debu tersebut memiliki massa jenis *bulk* sebesar 1210 kg/m^3 .



Gambar 2. Distribusi ukuran partikel debu dalam aerosol.



Gambar 3. Skema perangkat pengujian.

Skema perangkat pengujian diberikan pada gambar 3. Panjang filter kain yang diuji terdiri dari tiga ukuran yaitu 8 Cm, 18 Cm, dan 28 Cm.

Disamping itu dengan filter yang lebih panjang berarti luas permukaan filter juga makin besar, sehingga mempunyai daya tampung deposit partikel yang lebih banyak. Dengan demikian secara keseluruhan efisiensi pemisahan pada model dengan panjang filter 28 cm dan 18 cm tersebut masih lebih baik dari pada dengan panjang filter 8 cm.

Urutan proses pengujian yang dilaksanakan adalah sebagai berikut:

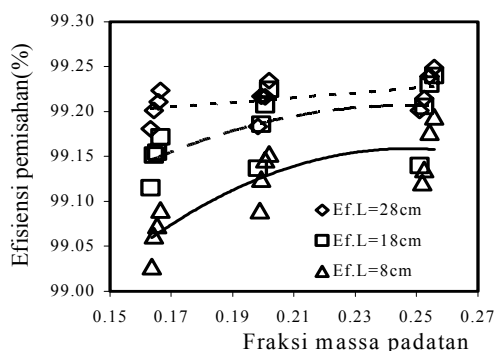
1. Pertama kali dilakukan pengujian tanpa debu yang menghasilkan data tahanan aliran pada setiap variasi

kecepatan yang dilakukan, untuk selanjutnya hasil pengujian ini disebut sebagai data awal percobaan/pengujian.

2. Kemudian dilakukan pengujian dengan debu dan menghasilkan data tahanan aliran sejak awal hingga akhir percobaan. Pencatatan data dilakukan setiap perbedaan tinggi kolom air pada pipa U pengukur kecepatan aliran mencapai $54 \text{ mmH}_2\text{O}$ yang berarti penunjukan kecepatan aliran masuk *cyclo dust filter* (V_i) adalah sebesar $9,6 \text{ m/s}$.
3. Pada kondisi di atas dan setelah pencatatan data tahanan aliran dilakukan, percobaan dihentikan dan penimbangan debu yang tersaring oleh siklon maupun oleh filter kain dilakukan.
4. Efisiensi pemisahan dihitung dengan membandingkan massa debu yang dipisahkan oleh alat dengan massa debu yang diumpankan melalui pengumpan (*feeder*).

6. HASIL PENGUJIAN DAN DISKUSI

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa dari tiga geometri model “*cyclo dust filter*” (CDF) yang diuji yaitu model dengan panjang filter 28 cm, 18 cm, dan 8 cm, efisiensi pemisahan model dengan panjang filter 28 cm kelihatan sedikit lebih baik dibandingkan dengan dua model lainnya. Pengamatan pada saat percobaan menunjukkan bahwa partikel yang bergerak dengan kecepatan rendah memiliki daya tembus yang lemah terhadap filter kain yang dipakai sehingga kemungkinan tertangkap pada serat kain makin besar. Sebaliknya partikel yang mempunyai kecepatan tinggi makin besar kemungkinan untuk lolos dari filter kain. Fenomena ini yang terjadi pada model dengan panjang filter 18 cm dan 8 cm yang keduanya tepat berada pada daerah yang berkecepatan tinggi. Sedangkan pada panjang filter 28 cm bagian bawah filter berada pada daerah yang berkecepatan aliran relatif lebih rendah sehingga memiliki daya tembus yang rendah pula.



Gambar 4. Efisiensi pemisahan untuk berbagai nilai fraksi massa padatan.

Disamping itu dengan filter yang lebih panjang berarti luas permukaan filter juga makin besar, sehingga mempunyai daya tampung deposit partikel yang lebih banyak. Dengan demikian secara keseluruhan efisiensi pemisahan pada model dengan panjang filter 28 cm dan 18 cm tersebut masih lebih tinggi dari pada dengan panjang filter 8 cm.

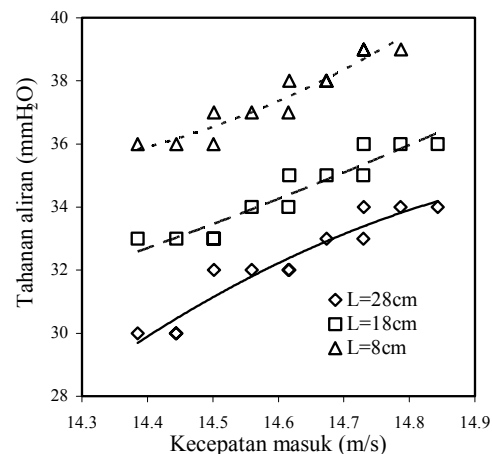
Dalam memperkirakan efisiensi pemisahan baik pada siklon maupun pada filter kain, faktor konsentrasi debu dalam *aerosol* tidak tampak. Pengamatan Eksperimental menunjukkan bahwa konsentrasi debu berpengaruh terhadap efisiensi pemisahan (Gambar 4). Korelasi empiris yang diberikan oleh Zenz^[10] memperlihatkan pengaruh perubahan konsentrasi debu terhadap efisiensi pemisahan siklon dengan persamaan berikut:

$$\frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_1} = \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{0,182}$$

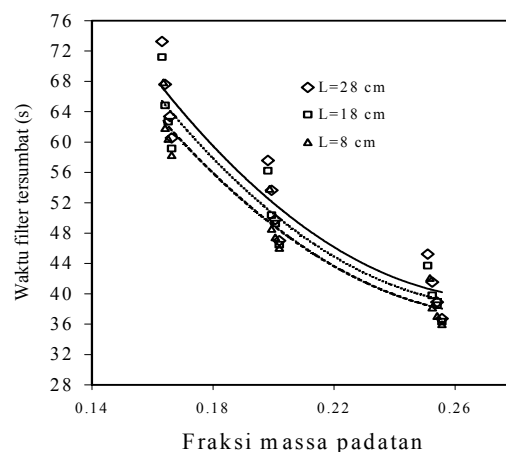
Jika konsentrasi debu berubah dari c_1 menjadi c_2 dengan $c_2 > c_1$, maka efisiensi pemisahan meningkat dari η_1 menjadi η_2 .

Dari Gambar 4 terlihat bahwa efisiensi pemisahan (η) dipengaruhi oleh variabel panjang filter (l) dan fraksi massa padatan (c).

Tahanan aliran juga meningkat dengan meningkatnya luas permukaan filter, seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Namun demikian peningkatan tahanan aliran tidak sebanding dengan peningkatan luas filter. Peningkatan luas permukaan sekitar 50% hingga 125% berakibat pada peningkatan tahanan aliran sekitar 6% hingga 13%. Waktu tersumbatnya filter juga dipengaruhi oleh fraksi debu dalam aerosol seperti diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Tahanan aliran pada berbagai kecepatan aliran aerosol masuk *cyclo dust filter*



Gambar 6. Waktu yang dibutuhkan hingga filter tersumbat pada berbagai nilai fraksi massa padatan.

Semakin tinggi konsentrasi debu, semakin cepat pula kain tersumbat. Hal ini menunjukkan bahwa debu yang menempel pada kain (di industri disebut *dust cake*) perlu dirontokkan secara periodik. Semakin tinggi konsentrasi debu semakin sering pula frekuensi perontokan *dust cake* yang harus dilakukan.

7. SIMULASI ALIRAN

Simulasi aliran dimaksudkan untuk mengetahui pola aliran dan tahanan aliran sehingga dapat dipergunakan sebagai alat bantu dalam merancang peralatan yang optimal. Dalam simulasi ini akan dilihat pengaruh posisi saluran masuk siklon (atas, tengah, dan bawah seperti diperlihatkan pada Gambar 7 dan Gambar 8) terhadap pola dan tahanan aliran. Simulasi dimulai dengan pembentukan *grid* dan dilanjutkan dengan pendefinisian persamaan yang mengatur aliran^[11,12] yaitu:

1. Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{U}) = 0 \quad (16)$$

2. Persamaan kekekalan momentum:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (17)$$

3. Persamaan kekekalan energi:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla T \right] = k \nabla^2 T + T \beta \frac{dp}{dt} + \phi + \psi \quad (18)$$

dengan notasi pada ketiga persamaan di atas seperti yang umum dipergunakan dalam CFD misalnya ρ , C_p , $\mathbf{U}$, T , p , β , ψ , ϕ , dan t berturut-turut adalah massa jenis fluida, panas jenis pada tekanan tetap, kecepatan aliran, temperatur, tekanan, koefisien ekspansi termal volumetrik, pencetus energi dan dissipasi viskos.

Asumsi yang diambil untuk menyederhanakan simulasi adalah bahwa aerosol diwakili dengan fluida satu fasa bermassa jenis sama dengan massa jenis gabungan antara udara dan padatan ρ_s .

$$\rho_s = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho \quad (19)$$

dimana ρ_p , ρ , dan ϕ berturut-turut massa jenis partikel, massa jenis udara, dan fraksi massa partikel. Selain itu fluida dianggap merupakan fluida Newton dengan viskositas μ_s sebesar:

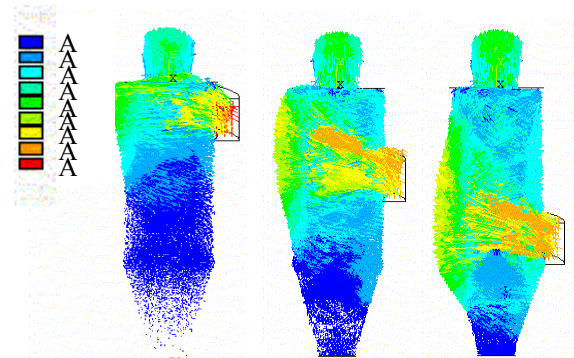
$$\mu_s = \bar{\mu} + 150 a^2 \bar{\rho}_p \mu_s^* \quad (20)$$

dengan $\mu_s^* = \frac{4,61}{4^l} \left(\frac{\phi}{\phi_o + \phi} \right)^2$, $\phi_o = 0,6$

Untuk menyimulasikan aliran, data yang diperlukan adalah sebagai berikut:

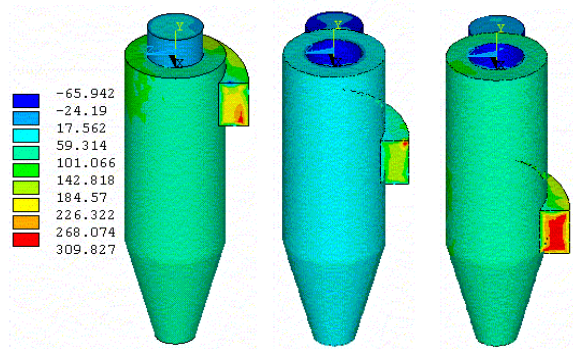
- Massa jenis partikel: 1210 kg/m³ (*bulk*).
- Massa jenis udara: 1,23 kg/m³.
- Temperatur rata-rata: 30°C
- Viskositas udara: 1,5 x 10⁻⁵ kg/m.s
- Diameter partikel rata-rata: 50 μ m.
- Fraksi massa padatan: 25 %.
- Kecepatan aerosol masuk: 15 m/s (diasumsikan seragam)
- Kekasaran permukaan: *smooth wall*.
- Tekanan statis di sisi keluar: 0 N/m² (*gauge*)
- Filter kain diasumsikan sebagai media porous dengan porositas 30%.

Software aplikatif yang dipergunakan adalah Ansys 5.4. Hasil simulasi kecepatan aliran diberikan pada Gambar 7, sedangkan untuk distribusi tekanan diberikan dalam Gambar 8. Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan pola aliran yang terjadi. Model dengan saluran masuk di atas, pada bagian bawah tempat saluran debu keluar hampir tidak ada aliran. Hal ini merupakan hal yang menguntungkan karena menjamin agar tidak terjadi *re-entrainment* dari debu yang sudah terpisahkan. Sedangkan pada model dengan saluran masuk di tengah dan di bawah dapat dilihat masih ada aliran yang cukup signifikan sehingga lebih memungkinkan terjadinya *re-entrainment*. Sebagai akibatnya efisiensi pemisahan akan turun. *Re-entrainment* harus diusahakan untuk dihindari dalam suatu desain *cyclo dust filter* karena dapat mempengaruhi efisiensi pemisahan. Dari Gambar 8 terlihat bahwa rugi tekanan pada model dengan saluran masuk di bagian atas paling rendah dibanding dengan kedua model yang lain. Tahanan aliran pada model dengan saluran masuk di atas, tengah, dan bawah adalah berturut-turut $\Delta p = 258,383$ N/m², $\Delta p = 370,664$ N/m² dan $\Delta p = 368,97$ N/m². Dari ketiga model tersebut model dengan saluran masuk terletak di atas menghasilkan tahanan aliran terendah. Hal ini disebabkan oleh panjang lintasan aliran aerosol yang semakin pendek.



Gambar 7. Distribusi kecepatan aliran [m/s]

Dalam penelitian ini juga dilakukan simulasi aliran untuk berbagai panjang filter. Apabila diteliti lebih dalam dari hasil distribusi kecepatan aliran dapat diketahui bahwa distribusi kecepatan tangensial diantara ketiga model dengan panjang filter berbeda tersebut, panjang filter 28 cm (yang terpanjang) menunjukkan harga kecepatan tangensial lebih tinggi dibandingkan dengan dua panjang filter lainnya. Dengan demikian dapat disimpulkan efektivitas pemisahan partikel padat untuk model dengan panjang filter 28 cm adalah yang terbaik, seperti yang telah ditunjukkan dari hasil eksperimental.



Gambar 8. Distribusi tekanan [N/m²]

7. KESIMPULAN

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

- Secara umum *cyclo-dust filter* dapat menyaring aerosol hingga lebih dari 99%, suatu nilai yang mendekati kinerja *electrostatic precipitator*. Dengan demikian peralatan ini sangat menguntungkan sebagai alternatif pemisah debu yang efektif.
- Penempatan saluran masuk lebih tinggi dari posisi filter merupakan desain terbaik karena akan menghasilkan tahanan aliran rendah (hemat energi) sebagai akibat memendeknya lintasan aliran aerosol.
- Percobaan yang dilakukan dapat dipakai untuk menentukan waktu tersumbatnya filter sehingga sangat bermanfaat untuk menentukan periode perontokan *dust cake* yang menempel pada kain.
- Simulasi aliran fluida sangat membantu dalam proses optimasi desain dan memperkirakan kinerja.

8. DAFTAR PUSTAKA

1. Starmaid, J.C., *Filtration and Separation*, Vol.7no.1, 1951.
2. Starmaid, J.C. *The Design and Performance of cyclone Separators*, Trans. Inst. Chemical Engineering Vol.29, 1951.
3. Hestroni, G., *Handbook of Multiphase Systems*, Hemisphere Crp. , 1982.
4. Koch, W.H. & Licht, W. *New Design Approach Boost Cyclone Efficiency*, Chemical Engineering, 1977.
5. Prihadi Setyo Darmanto dan Katon primanto, *Pengembangan Perangkat Lunak Alat Bantu Perancangan Siklon Separator Hemat Energi*, Journal Teknik Mesin, Vol XII, No 3, 1997.
6. Prihadi Setyo Darmanto dan Katon primanto, *Pengujian Karakteristik Kinerja Siklon Separator Hemat Energi*, Journal Teknik Mesin, Vol XII, No 2, 1997.
7. Hind, W.C., *Aerosol Technology* , John Wiley & Sons, 1982.
8. Leith, D. & Licht, W., *Air Pollution and It's Control*, A.I.Ch.E. Symposium Series Vol.68no.126, 1972.
9. Davies, C.N., *Air Filtration*, Academic Press, 1973.
10. Kalen, B. & Zenz, F.A., *Theoretical Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design*, A.I.Ch.E. Symposium Series Vol. 70-no137, 1974.
11. Versteeg, H.K. & Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, John Wiley & Sons Inc., 1995.
12. Zhou, L.X. & Soo, S.L., *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors* , Powder Technology Vol.63, Elsevier, 1990.