



**PENGARUH GEOMETRI TINGGI KONIS PADA SIKLON PERSEGI
TERHADAP EFISIENSI PENGUMPULAN DAN PENURUNAN
TEKANAN MENGGUNAKAN METODA CFD (*COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMIC*)**

¹Novi Sylvia, ²M. Zulfadhli, ³Fikri Hasfita, ⁴Yazid Bindar, ⁵Mariana, ⁶Elwina,
^{1,2,3} Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Malikussaleh
⁴ Departemen Sistem Energi dan Proses, Fakultas Teknik Industri, ITB
⁵ Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Malikussaleh
⁶ Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Lhokseumawe
Korespondensi: HP: 085260046742, e-mail: nxsylvia@gmail.com

Abstrak

Artikel ini memaparkan hasil penelitian yang diperoleh melalui aplikasi komputasi dinamika fluida (*Computational Fluida Dynamic, CFD*) untuk mensimulasi medan alir di dalam siklon persegi. Perangkat lunak Gambit digunakan sebagai pre-processor untuk menggambar konfigurasi, diskritisasi, dan pendefinisian kondisi batas siklon. Panjang Sisi siklon yang digunakan 0,2 m menyesuaikan dengan diameter siklon silinder Lapple, dengan kondisi operasi ditentukan pada laju alir gas sebesar $0,1\text{m}^3/\text{s}$ sementara beban partikel dalam laju alir gas sebesar $0,01\text{kg}/\text{m}^3$. Perangkat lunak CFD FLUENT 6.2.16 digunakan untuk simulasi medan alir dan dinamika partikel dalam siklon. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh geometri dengan bervariasi tinggi konis dan diameter ash hopper pada siklon persegi terhadap medan alir, efisiensi dan penurunan tekanan. Prediksi yang dihasilkan memberikan informasi mengenai medan alir berupa kecepatan axial dan tangensial di dalam siklon serta informasi efisiensi dan penurunan tekanan. Hasil kajian menunjukkan bahwa Hasil penelitian ini diperoleh efisiensi tertinggi yaitu 90,35% dengan kecepatan alir umpan 20m/s dan nilai kehilangan tekanan terendah (*Pressure Drop*) 13747,044 Pa dengan kecepatan alir umpan 5m/s pada siklon persegi yang mempunyai perbandingan tinggi konis L_c/a 2,25.

Kata kunci: Siklon persegi, geometri siklon, dinamika fluida komputasi, efisiensi, dan penurunan tekanan.

1. Pendahuluan

Siklon merupakan salah satu peralatan yang paling umum digunakan untuk mengendalikan emisi debu dari aliran gas pada proses industri. Meskipun perkembangan rekayasa saat ini telah memungkinkan untuk mengaplikasikan siklon, misalnya sebagai pengering dan reaktor, namun aplikasi utama siklon tetap

pada bidang pengendalian pencemaran udara di mana efisiensi yang tinggi diperlukan untuk memenuhi peraturan yang diterapkan. Dibandingkan dengan alat pengendali polusi udara yang lain, siklon lebih disukai karena kesederhanaan dari desainnya, tidak mahal, biaya pemeliharaan rendah, dan kemampuan beradaptasi untuk berbagai kondisi operasi seperti pada suhu dan tekanan tinggi. Meskipun siklon sering digunakan sebagai tempat akhir pengumpulan di mana partikel yang berukuran besar ingin dipisahkan, siklon juga umum digunakan sebagai pra-pembersih sebagai kolektor yang lebih efisien seperti elektrostatik presipitator, *scrubber* atau kain saringan (Swamee dkk, 2009).

Siklon memiliki empat bagian utama yaitu; pemasukan (inlet), badan siklon, sistem pengeluaran debu, dan outlet, yang kesemuanya mempengaruhi efisiensi siklon. Prinsip pemisahan siklon cukup sederhana yaitu aliran campuran gas-padatan diarahkan ke siklon melalui pemasukan di bagian atas. Badan siklon yang berbentuk silinder menyebabkan partikel berputar, sehingga mendorong partikel bertabrakan dengan dinding silinder. Gas terus menyusuri badan siklon hingga ke bagian kerucut, yang memiliki kecepatan rotasi gas yang cukup untuk membuat partikel tetap bertabrakan dengan dinding siklon. Di bagian bawah kerucut, gas merubah arah dari bawah ke atas. Pusaran yang naik memasuki tabung disebut *vortex finder* dan keluar dari siklon. Sementara itu, kumpulan partikulat jatuh ke dalam *hopper*, dimana secara berkala akan dipindahkan.

Kinerja utama siklon dinilai dari efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan. Terlepas dari desain dan operasi yang sederhana, namun perilaku aliran dan dinamika partikel dalam siklon cukup rumit. Hal ini memerlukan model matematis yang efisien untuk memberikan prediksi yang akurat mengenai efisiensi dan penurunan tekanan di dalam siklon baik untuk tujuan desain maupun untuk kebutuhan operasi siklon.

Model empiris dikembangkan berdasarkan data geometri siklon tertentu, seperti penelitian tentang analisa pengaruh tangensial *inlet* (Avci dan karagoz, 2005), sementara Hsu dkk (2014) sudah melakukan eksperimen tentang peningkatan kinerja desain siklon Stairmand dengan menganalisa pengaruh tinggi konis, diameter konis dan siklon tanpa konis. Hasilnya menunjukkan bahwa

proporsi tinggi konis ditingkatkan dari 60 mm menjadi 70 mm dan diameter konis dikecilkan dari 9 mm menjadi 4 mm dapat meningkatkan faktor kualitas dari siklon tersebut.

Roufi dkk (2008) melakukan simulasi dan optimasi vortex finder pada siklon konvensional menggunakan CFD. Roufi dkk (2009) melakukan penelitian dengan mengkaji dua jenis siklon persegi yang berbeda geometrinya secara CFD. Hasilnya menunjukkan bahwa perbandingan antara penurunan tekanan dari siklon persegi yang diperoleh dalam penelitian ini dengan persamaan empiris yang diberikan dalam literatur untuk siklon konvensional, menunjukkan bahwa penurunan tekanan dalam siklon persegi lebih kecil dari pada siklon konvensional. Shafikhani dkk (2011) melakukan penelitian terhadap siklon persegi dan siklon silinder secara numerik. Hasilnya menunjukkan bahwa penurunan tekanan berdasarkan peningkatan laju alir pada siklon persegi lebih kecil jika dibandingkan dengan siklon silinder. Sementara efisiensi berpengaruh terhadap laju alir. Semakin tinggi laju alir maka efisiensinya semakin tinggi. Hal ini berlaku pada kedua jenis siklon. Untuk itu siklon persegi bisa menjadi pilihan untuk laju alir yang tinggi.

Meskipun mayoritas model empiris dikembangkan berdasarkan data eksperimen terhadap geometri siklon tertentu, kesalahan substansial antara prediksi dan data yang diukur dalam efisiensi siklon adalah bukti karena penggunaan asumsi yang berbeda terhadap kondisi geometri. Sebagai konsekuensinya, penggunaan model semi-empiris memiliki keterbatasan dalam memprediksi kinerja siklon. Karena itu, metode numerik diusulkan untuk pemodelan medan aliran dan dinamika partikel dalam siklon silinder untuk tujuan memprediksi efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan.

Walaupun banyak usaha secara numerik dilakukan terhadap siklon konvensional namun kajian secara numerik pada siklon persegi masih sedikit. Untuk menjawab hal ini, penelitian ini akan menfokuskan kepada modifikasi badan siklon dari silinder menjadi bentuk persegi karna selama ini siklon yang banyak digunakan di industri berbentuk silinder. Secara umum tujuan penelitian ini mengkaji pengaruh parameter geometri terhadap kinerja siklon persegi secara

Dinamika komputasional Fluida ditinjau dari medan alir, efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini Mengkaji kinerja siklon persegi secara Dinamika komputasional Fluida ditinjau dari medan alir, efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan.

Efisiensi pengumpulan pada umumnya merupakan perbandingan antara massa debu yang terkumpul dan massa debu yang masuk siklon. Efisiensi pengumpulan dipengaruhi oleh kandungan padatan yang terkandung pada gas yang masuk. Gambar 2.3 menunjukkan hubungan antara efisiensi pengumpulan dan kandungan padatan yang terkandung pada gas. Efisiensi pengumpulan menurut Lapple (1951) dihitung menurut *cut diameter*. Cut diameter merupakan diameter partikel padatan yang mempunyai peluang 50% terkumpul pada bagian bawah siklon. Diameter partikel minimum yang bisa terkumpul oleh siklon secara (teoritis) ditunjukkan menurut persamaan 1.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{\pi \cdot N_s \cdot v_{in} \cdot (\rho_s - \rho_f)}} \quad (1)$$

dimana: v_{in} = kecepatan masuk gas (m/s), N_s = jumlah putaran gas dalam siklon (tergantung kecepatan gas masuk atau keluar) oleh Lapple diperkirakan $N_s = 5$, B_c = lebar inlet (m), ρ_s = Densitas partikel padatan (kg/m^3), ρ_f = Densitas fluida (kg/m^3), μ = viskositas fluida (kg/m.s), d_{50} = cut diameter (μm)

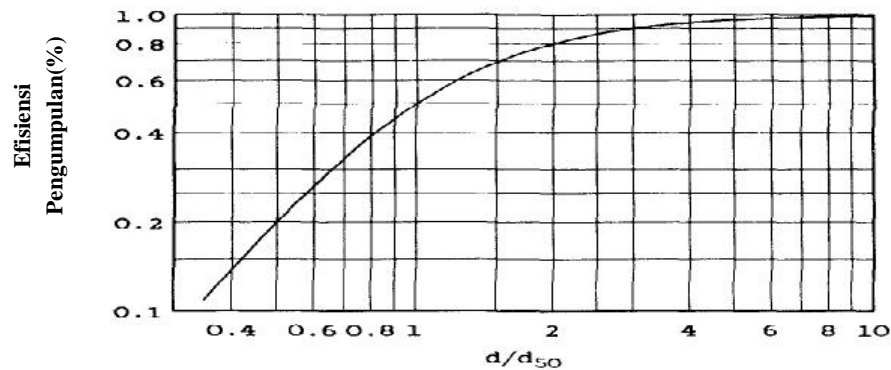
Dari Persamaan di atas tampak bahwa semakin besar lebar inlet B_c maka semakin besar d_{50} sehingga partikel yang berukuran $< d_{50}$ akan mempunyai peluang terkumpul $< 50\%$. Oleh karena itu, penambahan jumlah siklon dilakukan ketika kapasitas diperbesar, bukan memperbesar ukuran siklon. Memperbesar kapasitas dapat dilakukan dengan cara memperbanyak jumlah siklon dengan catatan bahwa ukuran siklon tetap.

Efisiensi siklon untuk ukuran partikel tertentu dapat dihitung dengan membandingkan cut diameter dan diameter partikel. Gambar 1 menunjukkan

kurva efisiensi versus d/d_{50} menurut Lapple (1951). Hubungan antara efisiensi total siklon dengan d/d_{50} dapat dihitung menggunakan persamaan 2 (Dullien, 1989).

$$\eta_T = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d}\right)^2} \quad (2)$$

dimana: η_T = efisiensi pengumpulan (%), d_{50} = cut diameter (μm) dan \bar{d} = diameter rata-rata (μm).



Gambar 1. Efisiensi siklon sebagai fungsi perbandingan ukuran partikel (Dullien, 1989).

Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*) merupakan parameter penting di dalam evaluasi kinerja siklon. Penurunan tekanan terjadi disebabkan oleh kontraksi aliran fluida yang keluar, ekspansi bagian masuk siklon, dan friksi pada permukaan dinding siklon. Pada umumnya penurunan tekanan sebanding dengan kecepatan fluida masuk, seperti yang ditunjukkan dengan persamaan 3.

$$\Delta P = \alpha \frac{\rho_g v_i^2}{2} \quad (3)$$

dimana: ρ_g = densitas gas (kg/m^3), v_i = kecepatan fluida masuk (m/s), ΔP = penurunan tekanan (Pa). Sedangkan nilai α ditentukan oleh Lapple (1951) menggunakan pada persamaan 4.

$$\alpha = 16 \frac{ab}{D_r^2} \quad (4)$$

dimana : a= tinggi inlet siklon (m), b= lebar inlet siklon (m) dan D_g = diameter keluaran gas dari siklon (μm).

Total penurunan tekanan terdiri dari kehilangan tekanan pada inlet, outlet dan badan siklon. Bagian utama penurunan tekanan terjadi pada bagian dalam siklon yaitu sekitar 80% . Hal ini disebabkan oleh stress viskos pada aliran turbulen (Ogawa, 1984). Sisanya 20% penurunan tekanan disebabkan oleh kontraksi aliran fluida pada bagian outlet dan inlet. Dalam studi simulasi yang dilakukan Gimbut dkk (2004) menunjukkan perbedaan tekanan sebagai selisih antara tekanan statik inlet dan outlet.

Variabel –variabel dalam Penelitian

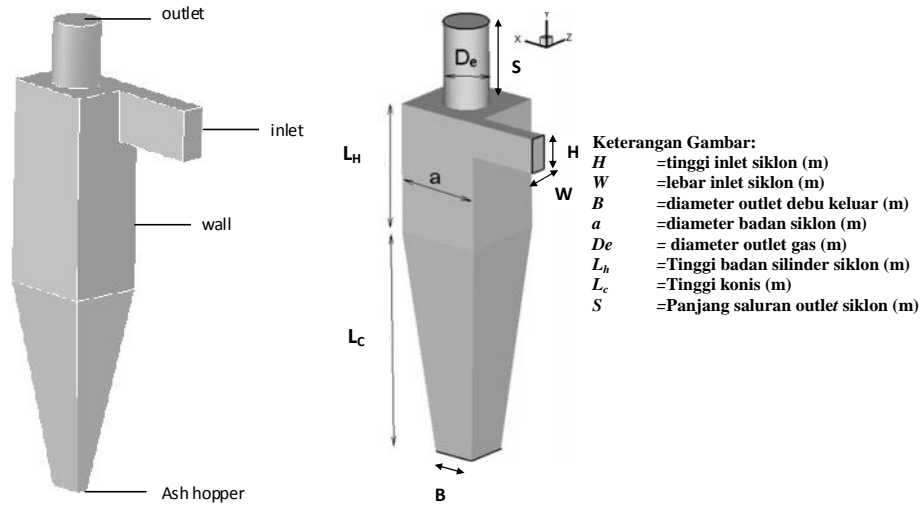
Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Variabel-variabel dalam penelitian

Variabel tetap	Variabel berubah	Variabel response
- Pressure: 1 atm - Temperatur umpan: 25 °C	- Kecepatan alir umpan (m/detik): 5, 10, 15, 20 dan 25 - Perbandingan Tinggi Konis (m): L_c/a 1,75; L_c/a 2.0; L_c/a 2,25	- Efisiensi Pengumpulan Partikel () - Kehilangan Tekanan pada Siklon (p)

Geometri dan Kondisi Batas Siklon

Geometri dan kondisi batas siklon digambarkan menggunakan perangkat lunak Gambit. Dimensi geometri siklon yang dikaji merupakan model siklon persegi menyesuaikan dengan data siklon silinder Lapple yang digunakan Wang dkk (2005) sebagai validasi. Geometri siklon yang akan digambarkan ditunjukkan pada gambar 2 beserta perbandingan geometrinya pada tabel 2. Sementara data material yang digunakan tertera pada tabel 3.

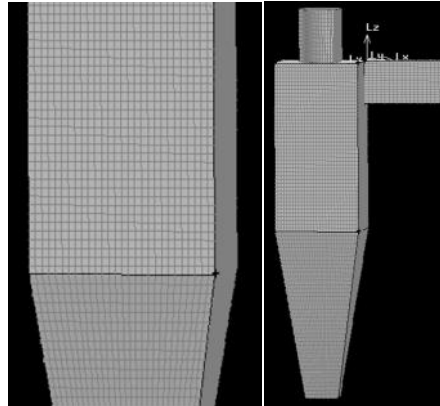


Gambar 2 Geometri siklon persegi

Tabel 2 Geometri siklon yang digunakan (a=0.2 m) pada penelitian

W/a	H/a	De/a	S/a	L _H /a	L _c /a	B/a
0.25	0.5	0.5	0.625	2.0	2.0	0.25

Konfigurasi siklon kemudian digambarkan dalam bentuk geometri 3 dimensi seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Setelah membuat geometri, langkah berikutnya adalah melakukan pembagian objek menjadi bagian-bagian kecil atau meshing. Meshing yang dilakukan disini diawali dengan *mesh* bidang (*mesh face*) tipe map setelah itu dilakukan *mesh volume* dengan tipe cooper dan heksahedral. Dari beberapa jenis elemen mesh volume, elemen heksahedral dan *cooper* lebih disukai karena dapat mengurangi kesalahan diskritisasi dan mengurangi jumlah elemen. Bentuk geometri volume yang rumit harus dipisah-pisahkan menjadi bentuk yang sederhana agar dapat dipakai mesh tersebut. Tipe elemen yang terdapat pada mesh face dan volume yang digunakan ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Tipe mesh bidang dan mesh volume yang digunakan

Setelah penggambaran geometri dan meshing kemudian dilakukan pendefinisian kondisi batas. Disini kondisi batas didefinisikan sebagai *inlet*, *outlet*, *wall* dan *ash hopper*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 (kiri). Semua data geometri dan *meshing* dari model siklon disimpan sebagai *mesh* atau *grid file* agar dapat diekspor ke perangkat lunak FLUENT, sebagai tahapan *Preprocessor*. Konfigurasi siklon kemudian digambarkan dalam bentuk geometri 3 dimensi seperti yang ditunjukkan Gambar 2 (kanan).

Tabel 3. Data material yang digunakan

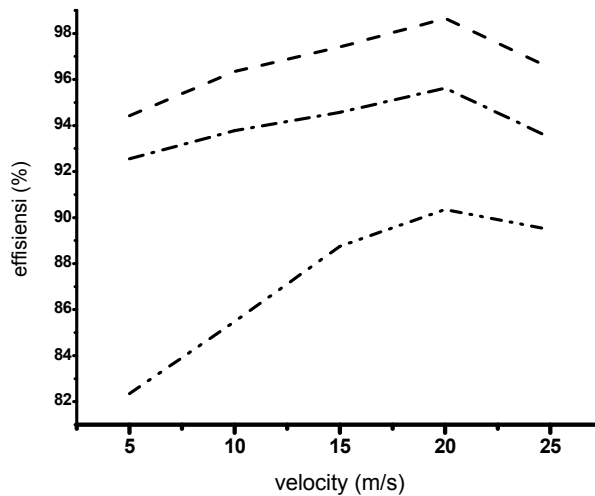
Temperatur aliran udara	25 ⁰ C
Min. diameter partikel	5 μm
Max. diameter partikel	200 μm
Mean diameter partikel	29.90 μm
<i>Spread parameter</i>	0.806
Densitas Abu	3320 kg/m ³
Densitas Udara	1,225kg/m ³

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Pengaruh geometri terhadap Efisiensi

Geometri panjang konis L_c/a sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan penurunan tekanan, seperti pada eksperimen Hsu dkk (2014) yang mengkaji pengaruh konis. Hasilnya menunjukkan bahwa proporsi tinggi konis ditingkatkan

dari 60 mm menjadi 70 mm dan diameter konis dikecilkan dari 9 mm menjadi 4 mm dapat meningkatkan faktor kualitas dari siklon tersebut. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4 penelitian ini.



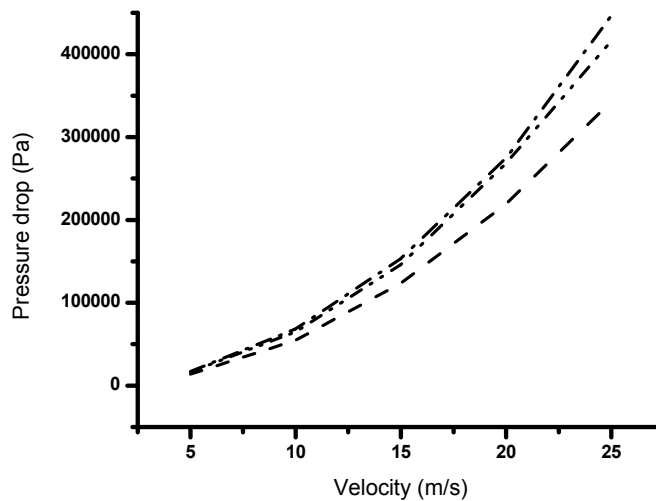
Gambar 4 Prediksi efisiensi pada variasi tinggi konis siklon persegi (garis; – – L_c/a 2.25; – · – L_c/a 2.0; – · · – L_c/a 1.75;)

Perbedaan efisiensi yang didapat dari variasi tinggi konis yang berbeda pada siklon persegi. Untuk perbandingan tinggi konis L_c/a 1.75 diperoleh nilai efisiensi tertinggi pada kecepatan alir umpan masuk 20m/s yaitu 68,79%, dan nilai efisiensi terendah pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s yaitu 63,64%. Untuk perbandingan tinggi konis L_c/a 2,0 diperoleh nilai efisiensi tertinggi pada kecepatan alir umpan masuk 20m/s yaitu 80,34%, dan nilai efisiensi terendah pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s yaitu 71,24%. Dan untuk perbandingan tinggi konis L_c/a 2,25 diperoleh nilai efisiensi tertinggi yaitu 90,35% pada kecepatan alir umpan masuk 20m/s, dan nilai efisiensi terendahnya 82,35% pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s. Dari keseluruhan hasil di atas diperoleh efisiensi tertinggi yaitu 90,35% pada siklon dengan perbandingan tinggi konis L_c/a 2,25. Hal ini membuktikan dengan semakin tingginya konis partikel akan terlempar ke arah luar dan membentur dinding yang disebabkan oleh gaya sentrifugal dan gaya inersia sehingga partikel bergerak turun ke dasar siklon. Dan

gas yang masuk bersama partikel akan balik dan bergerak ke atas dalam bentuk spiral.

3.2 Kehilangan Tekanan(*Pressure Drop*)

Kehilangan tekanan(*Pressure Drop*) merupakan parameter penting yang harus diperhatikan pada siklon. Semakin besarnya kehilangan tekanan yang terjadi pada siklon maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk siklon tersebut sehingga tidak efisien digunakan di dalam industri kalau ditinjau secara ekonomi. Hasil perhitungan untuk *pressure drop* dengan variasi tinggi konis ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5 Prediksi efisiensi pada variasi tinggi konis siklon persegi (garis; – – L_c/a 2.25; - - - L_c/a 2.0; - · - L_c/a 1.75;)

Perbedaan *pressure drop* yang didapat dari variasi tinggi konis dan diameter *ash hopper* yang berbeda pada siklon persegi. Untuk perbandingan tinggi konis L_c/a 1.75 diperoleh nilai *pressure drop* terendah pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s yaitu 16506,863 Pa, dan nilai *pressure drop* tertinggi pada kecepatan alir umpan masuk 25m/s yaitu 416152,11 Pa. Untuk perbandingan tinggi konis L_c/a 2,0 diperoleh nilai *pressure drop* terendah pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s yaitu 17106,266 Pa, dan nilai *pressure drop* tertinggi pada kecepatan alir umpan masuk 25m/s yaitu 446382,03 Pa. Dan untuk perbandingan

tinggi konis L_c/a 2,25 diperoleh nilai *pressure drop* terendah yaitu 13747,044 Pa pada kecepatan alir umpan masuk 5m/s, dan nilai *pressure drop* tertingginya 342871,21 Pa pada kecepatan alir umpan masuk 25m/s. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan ukuran tinggi konis mengakibatkan terjadinya perbedaan *pressure drop* yang diperoleh. Dari data keseluruhan yang diperoleh, nilai *pressure drop* yang terendah terdapat pada siklon dengan perbandingan ukuran tinggi konis L_c/a 2,25 yaitu 13747,044 Pa. *Pressure drop* yang terjadi pada siklon persegi juga akan semakin meningkat dengan meningkatnya kecepatan alir umpan masuk dan tekanan *statis* pada siklon persegi.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Efisiensi pengumpulan tertinggi diperoleh dari siklon persegi dengan perbandingan tinggi konis L_c/a 2.25 yaitu 90,35% dengan kecepatan alir umpan 20m/s.
2. Kehilangan tekanan(*Preassure Drop*) terendah pada siklon persegi yaitu 13747,044 Pa dengan kecepatan alir umpan 5m/s yang terdapat pada siklon dengan perbandingan tinggi konis L_c/a 2.25.
3. Tinggi konis yang berbeda pada siklon persegi menyebabkan tinggi-rendahnya nilai efisiensi pengumpulan dan *pressure drop* yang diperoleh.

5. Daftar Pustaka

1. Boysan, F., Ayers, W.H., dan Swithenbank, J.A. (1982), Fundamental mathematical modeling approach to cyclone design. *Trans IChemE*, 60: 222-230.
2. FLUENT 6.2.16, (2005), User's Guide. FLUENT Incorporated.
3. Lapple, C.E (1951), Process uses many collector types. *Chem.Eng*, 58:114
4. Shepherd, C.B., dan Lapple, C.E. (1939), A Design Approach In Cyclones. *Air pollution control*, 2: 127-139.
5. Wang, B., Xu, D.L., Xiao, G. X., dan Yu, A.B., (2005), Numerical study of gas-solid flow in a Siklon. *Applied Mathematical Modelling*, 30:1326-1342.

6. A. Raoufi, M. Shams, M. Farzaneh, R. Ebrahimi, Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder, *Chemical Engineering and Processing*, 2008, 47, 128–137.
7. A. Raoufi, M. Shams, H. Kanani, CFD analysis of flow field in square cyclones, *Powder Technology*, 2009, 191, 349–357.
8. H. Safikhani, M. Shams, S. Dashti, Numerical simulation of square cyclones in small sizes, *Advanced Powder Technology*, 2011, 22, 359–365.
9. I. Karagoz dan Avci, A, Modelling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39, 857–865.
10. P.K. Swamee, N. Aggarwal, and K. Bhobhiya, “Optimum design of cyclone separator”. *AIChE*, vol. 55, pp. 2279–2283, 2009.
11. Dullien, F.A.L., (1989), *Introduction to Industrial Gas Cleaning*, Academic Press, San Diego.