



ANALISIS EFISIENSI DAN PENURUNAN TEKANAN PADA SIKLON PERSEGI MENGGUNAKAN CFD

Novi Sylvia¹, Yazid Bindar²

¹Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Malikussaleh

²Departemen sistem energi dan proses, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung

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. Geometri siklon silinder Lapple dan persegi ditinjau dari volume yang sama. Diameter siklon yang digunakan 0,2 m menyesuaikan dengan diameter siklon silinder Lapple yang digunakan Wang pada eksperimennya, dengan kondisi operasi ditentukan pada laju alir gas sebesar 0,1m³/s sementara beban partikel dalam laju alir gas sebesar 0,01kg/m³. Perangkat lunak CFD FLUENT 6.2.16 digunakan untuk simulasi medan alir dan dinamika partikel dalam siklon. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh geometri 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 kecepatan tangensial mendominasi medan alir di luar garis tengah siklon, sementara kecepatan aksial mendominasi medan alir di daerah garis tengah siklon. Penurunan tekanan yang terjadi pada siklon persegi lebih tinggi dari siklon silinder, namun efisiensi untuk siklon persegi lebih tinggi dibandingkan siklon Lapple.

Kata kunci: Siklon persegi, siklon silinder, 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. Banyak peneliti telah mengembangkan model-model semi-empiris untuk memprediksi efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan dalam siklon. Leith (1990) meringkas sejumlah model ini, termasuk yang dikembangkan oleh Stairmand (1951), Barth (1956), Lapple dan Shepherd (1939), Lapple (1951), Leith dan Licht (1972). 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 untuk tujuan memprediksi efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan.

Setelah kajian pertama simulasi siklon secara numerik menggunakan teknik dinamika fluida komputasi (CFD) oleh Boysan (1982), mulai muncul sejumlah penelitian secara numerik terhadap kinerja siklon. Elsayed dan Lacor (2010) mengoptimasi geometri siklon yang bertujuan untuk memperoleh penurunan tekanan minimum menggunakan metoda tanggap permukaan. Mereka menggunakan model turbulensi Reynolds Stres untuk mewakili medan alir di dalam siklon dan mendapatkan bahwa parameter geometris yang paling signifikan adalah diameter *vortex finder*, lebar bagian inlet, tinggi bagian inlet dan tinggi total siklon.

Hasil kajian kinerja berbagai model turbulensi terhadap prediksi medan alir, efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan memberikan jawaban model turbulen yang sesuai untuk simulasi siklon Lapple dengan badan siklon berbentuk silinder (siklon silinder yang dilakukan oleh Wang dkk (2005) dilakukan oleh Novi (2011) dalam tesis menunjukkan model turbulen RSM yang sangat sesuai untuk siklon. Namun hasil tersebut belum memberikan jawaban secara tuntas dan masih menjadi kajian bagi para peneliti untuk menjawab bagaimana pengaruh desain bentuk dan parameter geometri siklon terhadap efisiensi pengumpulan dan penurunan tekanan. 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 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 kndungan 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.

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

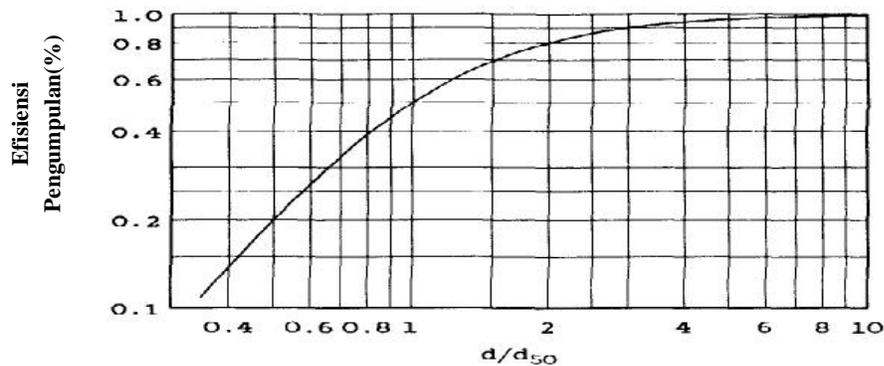
dimana: v_{in} = kecepatan masuk gas (m/s), N_s = jumlah putaran gas dalam siklon (tergantung kecepatan gas masuk atau keluar) oleh Lapple diperkirakan $N_s = 5$, B_c = lebar inlet (m), ρ_s = Densitas partikel padatan (kg/m³), ρ_f = Densitas fluida (kg/m³), μ = viskositas fluida (kg/m.s), d_{50} = cut 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/menurut Lapple (1951). Hubungan antara efisiensi total siklon dengan/dapat dihitung menggunakan persamaan 2 (Dullien, 1989).

$$\eta_T = \frac{1}{1 + \dots} \quad (2)$$

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.

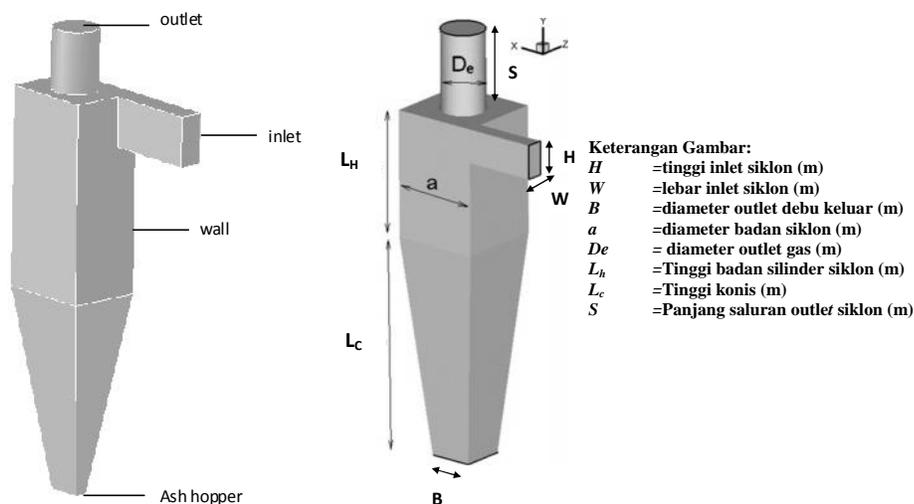
$$\alpha = 16 \frac{ab}{D_g^2} \quad (4)$$

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

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 eksperimen yang digunakan Wang dkk (2005) sebagai validasi. Geometri siklon yang akan digambarkan ditunjukkan pada gambar 2 beserta perbandingan geometrinya pada tabel 1. Sementara data material yang digunakan tertera pada tabel 2.

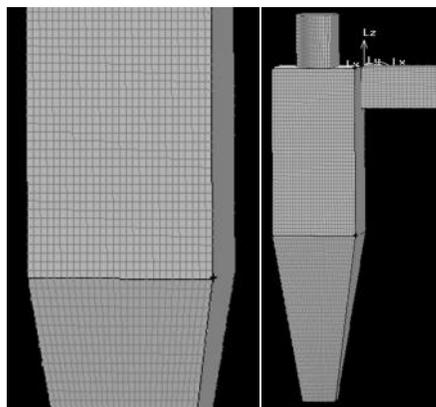


Gambar 2 Geometri siklon persegi

Tabel 1 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.

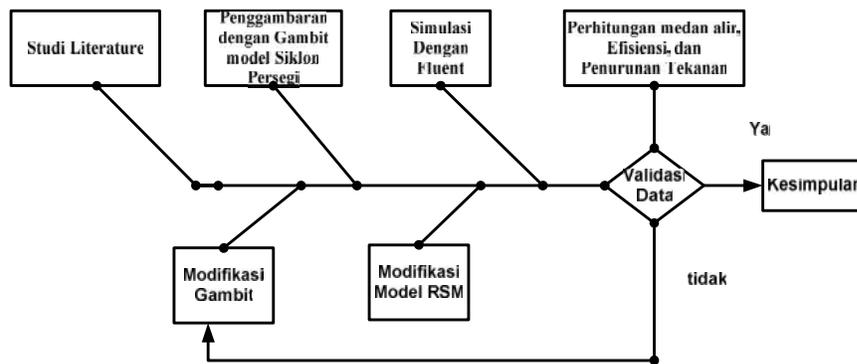


Gambar 3 Tipe mesh bidang dan mesh volume yang digunakan

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*. Bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 4 konfigurasi siklon kemudian digambarkan dalam bentuk geometri 3 dimensi seperti yang ditunjukkan Gambar 2 (kanan).

Tabel 2. 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

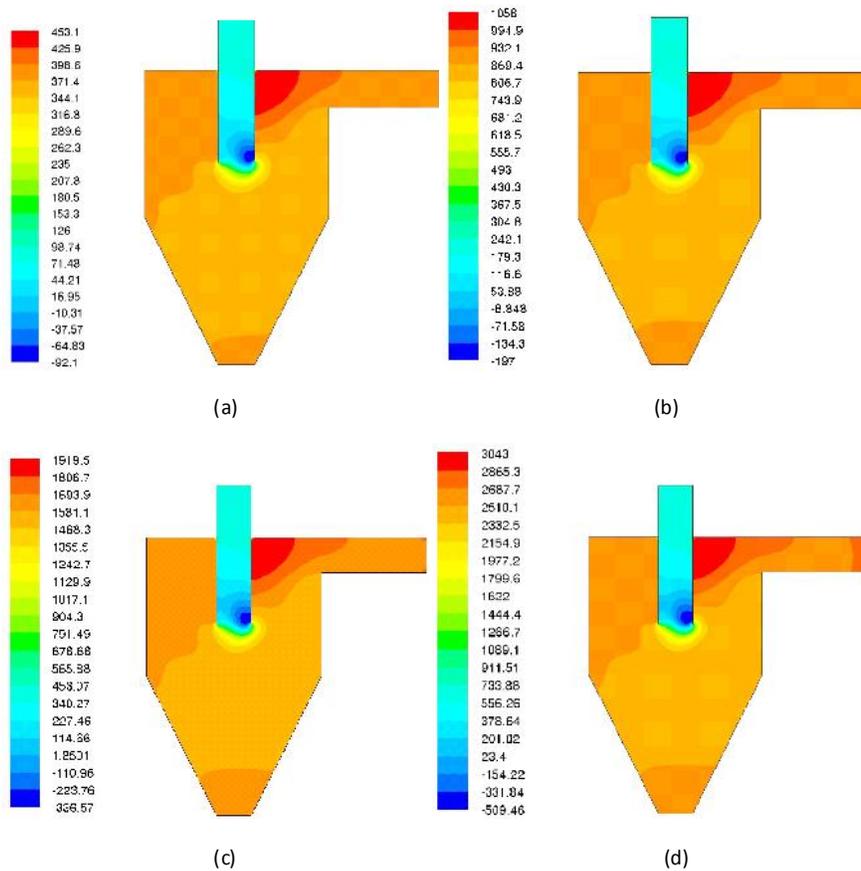


Gambar 4 Bagan alir penelitian

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Penurunan Tekanan Pada Siklon Persegi

Penurunan tekanan yang terjadi pada siklon persegi semakin meningkat seiring meningkatnya kecepatan inlet dan tekanan static dari siklon. Pada kecepatan inlet $v=10$ m/s tekanan statik menduduki nilai terendah yaitu sebesar 4750 Pa, sementara pada kecepatan inlet $v = 25$ m/s tekanan static mengalami peningkatan secara signifikan yaitu sebesar 33278 Pa. Kontur tekanan statik dapat dilihat pada gambar 5.



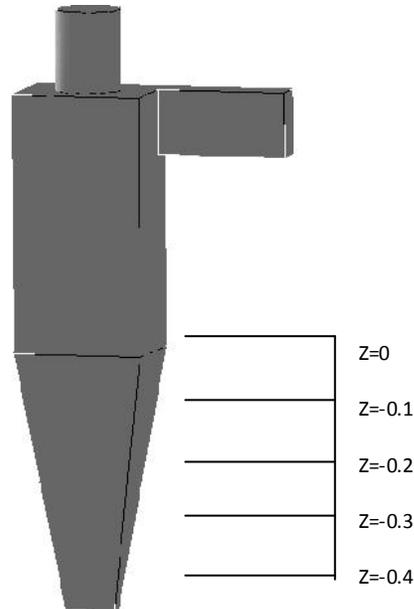
Gambar 5 Kontur Tekanan Statik pada berbagai kecepatan inlet (a) $v = 10$ m/s, (b) $v = 15$ m/s, (c) $v = 20$ m/s, (d) $v = 25$ m/s

3.2 Efisiensi Siklon Persegi

Siklon persegi memiliki efisiensi yang tinggi rata-rata 97% dibandingkan siklon biasa dalam hal ini siklon lapple. Namun pada kenyataannya siklon persegi memiliki penurunan tekanan yang tinggi dibandingkan siklon lapple. Unjuk kerja dari siklon itu sendiri dilihat dari penurunan tekanan yang serendah-rendahnya dan efisiensi yang tinggi. Untuk itu perlu kajian kembali dalam mendesain badan siklon persegi ini. Di sinilah perlu tahapan optimasi dalam mendesain geometri siklon guna mendapatkan unjuk kerja siklon persegi terbaik.

3.3 Prediksi Medan alir dalam siklon persegi

Pada sub bab ini akan diprediksikan medan alir pada berbagai posisi siklon persegi. Posisi prediksi di dalam siklon ditunjukkan pada Gambar 6, dimana $z=0$, $z=0,1$, $z=0,2$, dan $z=0,3$ berada pada bagian konis siklon.

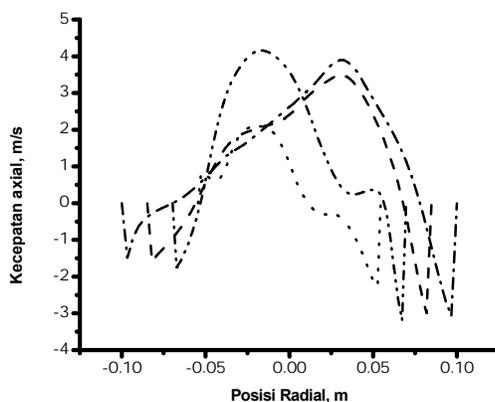


Gambar 6 Posisi prediksi kecepatan aksial dan tangensial pada siklon persegi

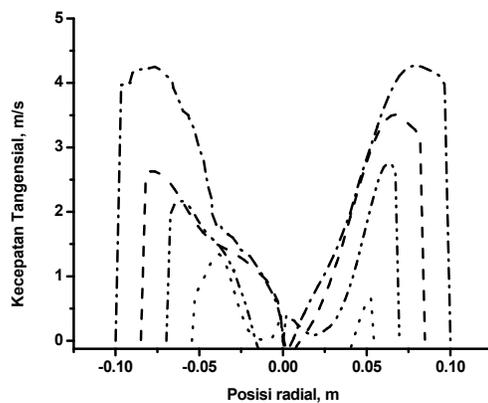
Prediksi kecepatan aksial pada berbagai posisi ditunjukkan pada gambar 7. Dari gambar 7 menjelaskan bahwa kecepatan aksial meningkat dari $z=0$ sampai $z=0,2$, sedangkan pada $z=0,3$ kecepatan aksial menurun. Hal yang menarik adalah bahwa di dalam bagian konis ditunjukkan bahwa kecepatan axial sangat kecil, pada $z=0,3$ berarti gerakan fluida lebih cenderung ke bawah mendorong partikel jatuh. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan aksial sama sekali tidak memainkan peran di daerah $z=0,3$.

Prediksi kecepatan tangensial pada berbagai posisi ditunjukkan pada gambar 8. Dari gambar 8 menjelaskan bahwa kecepatan tangensial menurun dari $z=0$ sampai $z=0,3$. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan tangensial sama sekali tidak memainkan peran di daerah $z=0,3$. Kecepatan positif pada gambar

tersebut menunjukkan orientasi gerakan, artinya aliran menuju ke atas, sedangkan tanda minus menyatakan gerakan yang berlawanan, yaitu ke bawah.



Gambar 7 Kecepatan aksial yang diprediksi pada empat posisi $z=0$, $z=0,1$, $z=0,2$ dan $z=0,3$ (garis = hasil prediksi; $-\cdot-\cdot-$ $z=0$; $- -$ $z=0,1$; $- \cdot \cdot -$ $z=0,2$; \cdots $z=0,3$)



Gambar 8. Kecepatan tangensial yang diprediksi pada empat posisi $z=0$, $z=0,1$, $z=0,2$ dan $z=0,3$ (garis = hasil prediksi; $-\cdot-\cdot-$ $z=0$; $- -$ $z=0,1$; $- \cdot \cdot -$ $z=0,2$; \cdots $z=0,3$)

4. Simpulan dan Saran

1. Geometri siklon Lapple dan persegi ditinjau dari volume yang sama.
2. Hasil simulasi numerik mendukung fakta eksperimen bahwa kecepatan tangensial mendominasi medan alir di luar garis tengah siklon, sementara kecepatan aksial mendominasi medan alir di daerah garis tengah siklon.
3. Secara numerik, nilai kecepatan aksial lebih kecil dari nilai kecepatan tangensial, sehingga secara keseluruhan kecepatan tangensiallah yang mengendalikan medan alir di dalam siklon.
4. Penurunan tekanan yang terjadi pada siklon persegi lebih tinggi dari siklon silinder, namun efisiensi untuk siklon persegi lebih tinggi dibandingkan siklon Lapple.

5. Daftar Pustaka

1. Barth, W. (1956), Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. *Brennstow-Waerme-Kraft*, 8 :1–9.
2. Boysan, F., Ayers, W.H., dan Swithenbank, J.A. (1982), Fundamental mathematical modeling approach to cyclone design. *Trans IChemE*, 60: 222-230.
3. Elsayed, Khairy., dan Lacor, Chris. (2010), Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*, 65: 6048–6058.
4. FLUENT 6.2.16, (2005), User's Guide. FLUENT Incorporated.
5. Griffiths, W.D dan Boysan F. (1996), Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the Performance of a number of cyclone samplers. *J. Aerosol Sci*, 27: 281 -304
6. Hoekstra, A. J., Derksen, J. J. dan Van den Akker, H. E. A. (1999), An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. *Chem Eng Sci*, 54: 2055±2065.
7. Lapple, C.E (1951), Process uses many collector types. *Chem.Eng*, 58:114
8. Shepherd, C.B., dan Lapple, C.E. (1939), A Design Approach In Cyclones. *Air pollution control*, 2: 127-139.
9. 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.