

ANALISIS PENGARUH DIMENSI COMPOUND VORTEX FINDER TERHADAP KECEPATAN DAN KINERJA PEMISAHAN PADA STAIRMAND CYCLONE SEPARATOR BERBASIS METODE CFD-DEM

*Fahmi Syahputra¹, Eflita Yohana², Mohammad Tauviquirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: fahmisyahputra31@gmail.com

Abstrak

Vortex finder merupakan elemen geometris yang sangat menentukan pada *cyclone separator* dan secara dominan mengatur struktur medan aliran serta efektivitas pemisahan partikel. Kajian-kajian sebelumnya pada umumnya meninjau geometri *vortex finder* konvensional melalui pendekatan *Discrete Phase Model* (DPM) yang tidak mengakomodasi interaksi antar-partikel secara eksplisit, sehingga fenomena *re-entrainment* maupun penumpukan partikel di *dustbin* sulit dimodelkan secara akurat. Penelitian ini menelaah secara numerik dampak variasi panjang *compound vortex finder* (0,25D; 0,35D; 0,45D; dan 0,55D) terhadap medan aliran serta kinerja pemisahan pada *Stairmand cyclone separator*. Fase gas direpresentasikan dengan *Reynolds Stress Model* (RSM) di ANSYS Fluent, sementara dinamika fase partikel dihitung melalui pendekatan *one-way coupling Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method* (CFD–DEM). Hasil simulasi mengungkapkan bahwa perpanjangan *vortex finder* secara konsisten mengintensifkan kecepatan tangensial dan aksial pada inti pusaran, sekaligus menaikkan *pressure drop* akibat meningkatnya gesekan permukaan dan disipasi energi turbulen. Efisiensi pengumpulan total dari keseluruhan variasi terhimpun dalam rentang yang sempit (sekitar 55%), yang mengindikasikan bahwa keragaman kinerja lebih ditentukan oleh mekanisme *short-circuiting* dan *re-entrainment* ketimbang semata-mata besarnya gaya sentrifugal. Konfigurasi dengan panjang *vortex finder* sebesar D memberikan keseimbangan paling baik karena sanggup meniadakan *short-circuiting* serta menekan *re-entrainment* pada tingkat konsumsi energi yang masih wajar. Temuan ini diharapkan berkontribusi bagi pengembangan rancangan *cyclone separator* yang lebih efisien.

Kata kunci: cfd-dem; collection efficiency; cyclone separator; pressure drop; vortex finder

Abstract

The vortex finder constitutes a critical geometric element of a cyclone separator that predominantly governs the internal flow field and the efficiency of particle separation. Earlier investigations have largely examined conventional vortex finder geometries through the Discrete Phase Model (DPM), which does not explicitly resolve inter-particle interactions and therefore struggles to reproduce re-entrainment and particle accumulation within the dustbin accurately. The present work numerically examines how variations in the compound vortex finder length (0.5D, 0.75D, D, and 1.25D) affect the flow field and the separation performance of a Stairmand cyclone separator. The gas phase was represented using the Reynolds Stress Model (RSM) in ANSYS Fluent, whereas the particle-phase dynamics were resolved through a one-way coupling Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method (CFD–DEM) scheme. The simulations reveal that lengthening the vortex finder consistently intensifies the tangential and axial velocities within the vortex core while simultaneously raising the pressure drop, owing to greater wall friction and turbulent energy dissipation. The overall collection efficiency across all configurations stays within a narrow band (approximately 55%), indicating that the variability in performance is governed more by short-circuiting and re-entrainment mechanisms than by centrifugal force intensity alone. The configuration with a vortex finder length of D delivers the most favourable balance, suppressing short-circuiting and minimising re-entrainment at a moderate energy cost. These results are anticipated to support the development of more efficient cyclone separator designs.

Keywords: cfd-dem; collection efficiency; cyclone separator; pressure drop; vortex finder

1. Pendahuluan

Cyclone separator merupakan teknologi pemisahan partikulat yang mengandalkan gaya sentrifugal pada aliran turbulen berputar untuk menyisahkan partikel padat dari aliran gas. Dibandingkan perangkat pemisah berbasis gravitasi, alat ini lebih unggul berkat rancangannya yang sederhana, pengoperasian yang mudah, kebutuhan daya yang rendah, serta keandalannya pada kondisi suhu dan tekanan ekstrem [2]. Kinerja alat ini lazimnya dinilai melalui dua parameter utama

yang saling terkait, yakni penurunan tekanan (*pressure drop*) yang mencerminkan kehilangan energi, dan efisiensi pengumpulan (*collection efficiency*) yang bergantung pada karakteristik partikel dan rancangan geometri *cyclone* [2].

Keberhasilan proses pemisahan sangat ditentukan oleh distribusi medan aliran di dalam *cyclone*. Komponen kecepatan tangensial berperan dominan dalam membangkitkan gaya sentrifugal sesuai model *Rankine vortex*, sedangkan kecepatan aksial memfasilitasi perpindahan partikel menuju penampung debu sekaligus pelepasan gas bersih melalui *vortex finder*. Di antara beragam komponen geometris, *vortex finder* dikenali sebagai elemen kritis yang secara signifikan memengaruhi medan aliran dan kinerja *cyclone* secara menyeluruh [3]. Beberapa studi telah menelaah pengaruh diameter *vortex finder* yang berkontribusi terhadap peningkatan kinerja [3, 4], sementara kajian terhadap variasi panjang *vortex finder* memperlihatkan bahwa perpanjangan cenderung menaikkan *pressure drop* seraya mempertahankan efisiensi yang tinggi [5, 6]. Optimasi geometri *vortex finder* dengan demikian menjadi salah satu strategi utama dalam meningkatkan performa *cyclone separator* [7].

Kompleksitas pola aliran berputar mendorong penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebagai pendekatan numerik untuk memprediksi karakteristik aliran, lintasan partikel, dan *pressure drop*. Dalam pemodelan turbulensi, *Reynolds Stress Model* (RSM) terbukti lebih akurat daripada model yang berlandaskan asumsi isotropik dalam menggambarkan aliran berputar kuat [8]. Akan tetapi, pendekatan *Discrete Phase Model* (DPM) konvensional kurang memadai untuk kondisi aliran gas-padat pekat karena mengabaikan interaksi dan tumbukan antar-partikel secara eksplisit [9]. Pengintegrasian *Discrete Element Method* (DEM) ke dalam kerangka *coupling* CFD–DEM menerapkan hukum gerak Newton pada tiap partikel dengan memperhitungkan gaya kontak, gesekan, dan rotasi, sehingga mampu menggambarkan fenomena seperti *re-entrainment* maupun penumpukan partikel di *dustbin* secara lebih realistis [10]. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh inovasi geometri *compound vortex finder* dengan beragam variasi panjang terhadap medan aliran serta performa *cyclone* (*pressure drop* dan efisiensi pengumpulan) melalui pendekatan *one-way coupling* CFD–DEM, dengan geometri rujukan *high-efficiency Stairmand cyclone* [1].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Desain *cyclone separator* merujuk pada standar geometri *Stairmand high-efficiency* disertai modifikasi utama berupa inovasi *compound vortex finder* yang memadukan profil meruncing di sisi eksternal dengan profil silindris di sisi internal. Variasi disusun berdasarkan rasio panjang *vortex finder* terhadap diameter badan *cyclone* (D), yakni V1 (0,25D), V2 (0,35D), V3 (0,45D), dan V4 (0,55D). Fase gas dihitung berdasarkan persamaan kekekalan massa dan momentum untuk aliran inkompresibel dengan model turbulensi RSM pada perangkat lunak ANSYS Fluent yang berbasis *Finite Volume Method* (FVM) dalam kondisi transien (total durasi 10 detik, *time step* 0,5 detik) dengan skema SIMPLEC, PRESTO!, dan QUICK. Dinamika fase partikel dimodelkan melalui DEM dengan meninjau gaya kontak antar-partikel maupun partikel–dinding yang dikopel secara *one-way* terhadap medan aliran gas, dengan gaya *drag* mengikuti hukum Schiller & Naumann [12] serta gaya angkat mengikuti hukum Mei [13] [11]. Kondisi batas yang ditetapkan berupa *velocity inlet* berkecepatan seragam 7.5 m/s, *pressure outlet* pada *overflow*, dan *no-slip wall* di seluruh permukaan dinding, dengan partikel teh berbentuk *sphere* berdiameter 5-25 μm yang diinjeksikan bersama aliran udara. Domain didiskretisasi memakai *mesh* hibrida *poly-hexcore*, dan kemandirian *grid* tercapai pada kisaran 875.000 elemen. Verifikasi model dilakukan terhadap data eksperimen dan numerik rujukan [14, 15] dengan galat (*error*) maksimum parameter performa di bawah 5%, sehingga konfigurasi model dianggap valid untuk seluruh simulasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis dipusatkan pada karakteristik medan aliran melalui grafik profil radial hasil simulasi serta kinerja pemisahan dari keempat variasi panjang *compound vortex finder* (V1–V4). Secara umum, pembahasan menekankan kecenderungan (*trend*) yang teramati tanpa mengulas rincian kuantitatif tiap variasi secara spesifik.

3.1 Medan Aliran Kecepatan

Profil kecepatan aksial dalam arah radial pada bagian *body* ($z = -350$ mm) memperlihatkan bahwa seluruh variasi menampilkan pola khas *Rankine vortex*, yaitu zona *inner vortex* bernilai positif (aliran ke atas) di pusat serta *outer vortex* bernilai negatif (aliran ke bawah) di dekat dinding. Secara umum, perpanjangan *vortex finder* mengintensifkan *upward flow* di pusat *cyclone*, di mana konfigurasi terpanjang (V4) mencatat puncak kecepatan aksial tertinggi akibat efek isapan yang terpusat di dekat ujung *vortex finder*. Penguatan inti pusaran naik yang lebih stabil ini memperpanjang waktu tinggal partikel; meskipun demikian, perpanjangan yang berlebih berpotensi memicu *re-entrainment* karena gaya angkat aksial beraksi terlalu dekat dengan area *dustbin*.

Profil kecepatan tangensial pun secara konsisten membentuk pola *inverted-W* yang mencerminkan struktur *Rankine vortex*, yang terdiri atas zona *forced vortex* di inti dengan kenaikan kecepatan secara radial sampai mencapai puncak, serta *free vortex* di bagian luar yang menurun seiring membesarnya jari-jari. Secara umum, perpanjangan *vortex finder* memperbesar magnitudo puncak kecepatan tangensial, dengan konfigurasi terpanjang (V4) menghasilkan nilai tertinggi. Karena kecepatan tangensial menentukan besarnya gaya sentrifugal yang bekerja pada partikel, penguatan ini secara teoretis menguntungkan bagi proses pemisahan, khususnya pada *conical section* tempat jari-jari *cyclone* menyusut.

3.2 Distribusi Tekanan dan Pressure Drop

Profil tekanan statis dalam arah radial pada bagian *body* ($z = -350$ mm) memperlihatkan distribusi berbentuk “V” simetris pada seluruh variasi, dengan tekanan maksimum di dekat dinding serta tekanan minimum bernilai negatif pada inti pusaran yang menandai keberadaan *forced vortex core*. Secara umum, perpanjangan *vortex finder* memperdalam tekanan negatif di inti sekaligus menaikkan tekanan di dekat dinding, sehingga gradien tekanan radial menjadi kian tajam. Gradien tekanan radial inilah yang berperan sebagai faktor utama dalam mekanisme pemisahan partikel dan berkorelasi langsung dengan akumulasi kerugian tekanan total sistem.

Akumulasi kerugian tekanan total sistem memperlihatkan bahwa nilai *pressure drop* cenderung naik secara bertahap seiring bertambahnya panjang *vortex finder*. Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya luas permukaan *vortex finder* yang memperbesar gesekan permukaan (*skin friction*) terhadap fluida berputar, serta intensitas pusaran yang lebih tinggi sehingga memicu disipasi energi kinetik rotasional yang lebih besar. Dengan demikian, rancangan dengan *vortex finder* terpanjang menghasilkan pusaran yang lebih kuat tetapi menuntut kebutuhan energi operasional yang lebih tinggi.

3.3 Performa Pemisahan Partikel

Nilai efisiensi pengumpulan menyeluruh (*overall collection efficiency*) memperlihatkan bahwa seluruh variasi memiliki efisiensi pada rentang yang sempit (sekitar 55%) dengan deviasi antar-variasi di bawah 1%. Hal ini menegaskan bahwa pada rentang panjang yang ditinjau, keragaman efisiensi makroskopis lebih ditentukan oleh kestabilan medan aliran—terutama mekanisme *short-circuiting* dan *re-entrainment*—dibandingkan sekadar intensitas gaya sentrifugal. Konfigurasi terpendek (V1) memang mencatat efisiensi numerik tertinggi, tetapi disertai *short-circuiting* yang persisten pada fraksi partikel halus, sementara konfigurasi terpanjang (V4) tidak memberikan tambahan keuntungan tangkapan meskipun mengonsumsi energi tertinggi. Konfigurasi V3 ($H_b = 0.45D$) dengan demikian dipandang paling menguntungkan karena menghasilkan kualitas pemisahan terbaik di seluruh rentang diameter partikel dengan kompensasi konsumsi energi yang masih wajar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis dampak variasi panjang *compound vortex finder* (0,25D; 0,35D; 0,45D; dan 0,55D) terhadap medan aliran dan kinerja pemisahan pada *Stairmand cyclone separator* melalui pendekatan *one-way coupling* CFD–DEM. Secara umum, perpanjangan *vortex finder* mengintensifkan kecepatan tangensial dan aksial di inti pusaran serta mempertajam gradien tekanan radial, namun pada saat yang sama menaikkan *pressure drop* akibat bertambahnya gesekan permukaan dan disipasi energi turbulen. Efisiensi pengumpulan menyeluruh dari seluruh variasi berada pada rentang yang sempit (sekitar 55%), sehingga kinerja makroskopis lebih ditentukan oleh kestabilan medan aliran dan mitigasi *short-circuiting* serta *re-entrainment* ketimbang semata-mata besarnya gaya sentrifugal. Konfigurasi dengan panjang *vortex finder* sebesar D (V3) memperlihatkan keseimbangan terbaik karena mampu meniadakan *short-circuiting* serta menekan *re-entrainment* pada konsumsi energi yang masih wajar, sehingga direkomendasikan sebagai konfigurasi yang paling menguntungkan secara mekanika fluida pada rentang yang ditinjau.

5. Daftar Pustaka

- [1] Yohana, E., Tauviqirrahman, M., Laksono, D.A., Charles, H., Choi, K.H., Yulianto, M.E., 2022, “Innovation of Vortex Finder Geometry (Tapered in-Cylinder out) and Additional Cooling of Body Cyclone on Velocity Flow Field, Performance, and Heat Transfer of Cyclone Separator,” *Powder Technology*, 399: 117235.
- [2] Hoffmann, A.C., Stein, L.E., 2003, “Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation,” Springer, Berlin.
- [3] Brar, L.S., Sharma, R.P., Dwivedi, R., 2015, “Effect of Vortex Finder Diameter on Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators,” *Particulate Science and Technology*, 33(1): 34–40.
- [4] Elsayed, K., Lacor, C., 2011, “Numerical Modeling of the Flow Field and Performance in Cyclones of Different Cone-Tip Diameters,” *Computers & Fluids*, 51(1): 48–59.
- [5] Ficici, F., Ari, V., Kapsiz, M., 2010, “The Effects of Vortex Finder on the Pressure Drop in Cyclone Separators,” *International Journal of the Physical Sciences*, 5(6): 804–813.
- [6] Tian, J., Ni, L., Song, T., Zhao, J., 2020, “CFD Simulation of Hydrocyclone-Separation Performance Influenced by Reflux Device and Different Vortex-Finder Lengths,” *Separation and Purification Technology*, 233: 116013.
- [7] Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., Ebrahimi, R., 2008, “Numerical Simulation and Optimization of Fluid Flow in Cyclone Vortex Finder,” *Chemical Engineering and Processing*, 47(1): 128–137.
- [8] Griffiths, W.D., Boysan, F., 1996, “Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers,” *Journal of Aerosol Science*, 27(2): 281–304.
- [9] Chen, X., Wang, J., 2014, “A Comparison of Two-Fluid Model, Dense Discrete Particle Model and CFD-DEM Method for Modeling Impinging Gas–Solid Flows,” *Powder Technology*, 254: 94–102.
- [10] Chu, K.W., Wang, B., Xu, D.L., Chen, Y.X., Yu, A.B., 2011, “CFD-DEM Simulation of the Gas-Solid Flow in a Cyclone Separator,” *Chemical Engineering Science*, 66(5): 834–847.

-
- [11] Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., 2011, "Multiphase Flows with Droplets and Particles," 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton.
 - [12] Schiller, L., Naumann, A.Z., 1933, "Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung," Verein Deutscher Ingenieure, 77: 318–320.
 - [13] Mei, R., 1992, "An Approximate Expression for the Shear Lift Force on a Spherical Particle at Finite Reynolds Number," International Journal of Multiphase Flow, 18(1): 145–147.
 - [14] Foroozesh, J., Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G., Elsayed, K., Babaoğlu, N.U., 2021, "Computational Fluid Dynamics Study of the Impact of Surface Roughness on Cyclone Performance and Erosion," Powder Technology, 389: 339–354.
 - [15] Hoekstra, A.J., 2000, "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators," Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft.
 - [16] Yohana, E., Tauviquirrahman, M., Ismail, R., Muliawan, A., Carles, H., Dwinanda, M.F.H., Ariyanto, H.D., Yulianto, M.E., Choi, K.H., 2023, "The Effect of Cylinder Wall Cooling and Vortex Finder (Tapered in-Out) Geometry on Temperature, Heat Rate, and Flow Field to Increase Cyclone Performance Using CFD," Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 7: 100311.
 - [17] Duan, L., Wu, X., Ji, Z., Fang, Q., 2015, "Entropy Generation Analysis on Cyclone Separators with Different Exit Pipe Diameters and Inlet Dimensions," Chemical Engineering Science, 138: 622–633.