

ANALISA PENGARUH GEOMETRI TAPERED IN-OUT VORTEX FINDER PADA CYCLONE SEPARATOR PADA COLLECTION EFFICIENCY MENGGUNAKAN METODE CFD-DEM

*Muhammad Fahmi Al Kahfi¹, Eflita Yohana², Mohammad Tauviqirrahman²

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: fahmialkahfi010404@gmail.com

Abstrak

Cyclone separator merupakan instrumen pemisah gas-padat yang banyak diterapkan pada industri, namun kerap dibatasi oleh tingginya penurunan tekanan (*pressure drop*) dan lolosnya partikel halus akibat resirkulasi turbulensi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh dimensi modifikasi geometri *tapered* pada *vortex finder* terhadap performa dan medan aliran *cyclone separator* tipe Stairmand menggunakan metode gabungan *Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method* (CFD-DEM). Fasa fluida dimodelkan dengan *Reynolds Stress Model* (RSM) untuk merepresentasikan aliran berpusar secara anisotropik, sedangkan lintasan partikel berukuran 1–10 μm dilacak menggunakan DEM. Lima konfigurasi dievaluasi, yaitu desain *baseline* konvensional (V0) dan empat variasi panjang profil *tapered* (V1–V4). Hasil simulasi yang ditinjau melalui data kecepatan aksial, kecepatan tangensial, tekanan, serta lintasan partikel menunjukkan bahwa modifikasi *tapered* menstabilkan aliran aksial pada pusaran dalam, meredam puncak kecepatan tangensial yang berlebihan, dan menurunkan penumpukan tekanan statis sehingga menekan *pressure drop* sistem. Akan tetapi, pemanjangan profil yang berlebihan melemahkan medan gaya sentrifugal sehingga menurunkan efisiensi pengumpulan. Secara umum, variasi dengan panjang *tapered* moderat memberikan keseimbangan terbaik antara penghematan energi dan performa pemisahan partikel.

Kata kunci: *cf-d-dem; collection efficiency; cyclone separator; vortex finder*

Abstract

A cyclone separator is a widely used gas-solid separation device in industry, yet its performance is often limited by high pressure drop and the escape of fine particles caused by turbulent recirculation. This study aims to evaluate the effect of the tapered vortex finder dimension on the performance and flow field of a Stairmand cyclone separator using a coupled Computational Fluid Dynamics – Discrete Element Method (CFD-DEM) approach. The fluid phase was modeled with the Reynolds Stress Model (RSM) to accurately represent the anisotropic swirling flow, while the trajectories of 1–10 μm particles were tracked using DEM. Five configurations were evaluated, namely a conventional baseline design (V0) and four variations of tapered profile length (V1–V4). The results, examined through axial velocity, tangential velocity, pressure, and particle-trajectory data, indicate that the tapered modification stabilizes the axial flow in the inner vortex, attenuates the excessive tangential velocity peak, and reduces static pressure accumulation, thereby lowering the system pressure drop. However, an excessively long taper weakens the centrifugal force field and reduces collection efficiency. In general, a moderate tapered length provides the best balance between energy saving and particle separation performance.

Keywords: *cf-d-dem; collection efficiency; cyclone separator; vortex finder*

1. Pendahuluan

Cyclone separator merupakan salah satu instrumen pemisah gas-padat yang paling banyak digunakan di industri karena konstruksinya sederhana, tidak memiliki bagian bergerak, serta mampu beroperasi pada rentang temperatur yang luas. Secara fundamental, performa teknis alat ini dievaluasi melalui dua parameter utama, yaitu efisiensi pengumpulan partikel (*collection efficiency*) dan penurunan tekanan (*pressure drop*) sebagai indikator kerugian energi mekanis [1], [2]. Kedua parameter tersebut sangat bergantung pada distribusi profil kecepatan fluida di dalam ruang siklon, khususnya komponen kecepatan tangensial yang membangkitkan gaya sentrifugal serta komponen kecepatan aksial yang mengendalikan mekanisme evakuasi material [3], [4].

Berbagai studi terdahulu telah mengeksplorasi modifikasi geometri pada bagian inlet [3], [4], [5], struktur kerucut [6], [7], hingga sistem pengumpulan partikel (*dustbin*) [9] untuk mengoptimalkan performa cyclone. Modifikasi pada *vortex finder* menjadi perhatian khusus karena bagian ini sangat menentukan stabilitas aliran pusaran dan besarnya kerugian tekanan [8]. Penelitian Yohana et al. menunjukkan bahwa profil *tapered* pada *vortex finder* mampu

mengoptimalkan profil kecepatan fluida dan menurunkan *pressure drop* secara signifikan [1], [2]. Namun, pengaruh dimensi (panjang) profil *tapered* terhadap dinamika fasa padat masih belum banyak dikaji secara komprehensif.

Sebagai pembaruan dari pendekatan konvensional *Discrete Phase Model* (DPM), penelitian ini mengintegrasikan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan *Discrete Element Method* (DEM). Pendekatan CFD-DEM mampu melacak lintasan setiap partikel secara diskret sekaligus memperhitungkan interaksi antar-partikel dan partikel-dinding yang umumnya diabaikan pada DPM [10], [12]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menginvestigasi secara umum pengaruh dimensi modifikasi geometri *tapered* pada *vortex finder* terhadap performa dan medan aliran cyclone separator tipe Stairmand menggunakan metode CFD-DEM.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Desain geometri yang dikaji terinspirasi dari *Stairmand high-efficiency cyclone* yang dimodifikasi dengan profil *tapered* pada *vortex finder* serta penambahan *dustbin* [1], [15]. Lima konfigurasi dievaluasi, terdiri atas desain *baseline* konvensional (V0) dan empat variasi panjang profil *tapered* (V1–V4) sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Konfigurasi variasi geometri vortex finder

Variasi	Tipe vortex finder	Panjang tapered
V0	Silindris konvensional (baseline)	0,5D
V1	Tapered	0,35D
V2	Tapered	0,45D
V3	Tapered	0,55D
V4	Tapered	0,65D

Pada pendekatan CFD, aliran fluida diselesaikan dengan persamaan kontinuitas dan momentum (Navier-Stokes) melalui metode *Finite Volume Method* (FVM) [11]. Mengingat sifat anisotropik dominan dari medan aliran siklonik, model turbulensi *Reynolds Stress Model* (RSM) digunakan karena mampu memprediksi profil aliran *vortex* dengan presisi tinggi dibandingkan model keluarga *k-ε* yang berbasis asumsi isotropik [8]. Fasa padat dimodelkan menggunakan DEM (Ansys Rocky) berdasarkan Hukum Kedua Newton untuk gerak translasi dan rotasi partikel [10], [13]. Gaya hambatan dihitung dengan model Schiller & Naumann untuk partikel sferis, sedangkan gaya angkat menggunakan model Mei; fitur *turbulent dispersion* diaktifkan untuk menangkap hamburan partikel halus.

Simulasi melibatkan partikel berdensitas 1300 kg/m^3 dengan distribusi ukuran $1\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$ yang diinjeksikan ke dalam domain, dengan interaksi fluida-partikel dimodelkan secara *one-way coupling*. Kondisi batas yang diterapkan meliputi *velocity inlet* sebesar 15 m/s pada saluran masuk, *pressure outlet* pada sisi keluar, dan *no-slip stationary wall* pada seluruh permukaan dinding. Diskritisasi domain menggunakan struktur *poly-hexcore* dengan total sekitar 400.000 elemen yang telah memenuhi uji independensi grid. Model numerik divalidasi terhadap data eksperimen Hoekstra (2000) dan studi numerik Foroozesh et al. (2021), di mana galat *pressure drop* tercatat kurang dari 5% dan tren efisiensi pengumpulan sesuai dengan data acuan [14], [15].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Flowfield

Karakteristik medan aliran (*flowfield*) di dalam *cyclone separator* memperlihatkan struktur aliran ganda, yaitu pusaran luar (*outer vortex*) yang bergerak turun dan pusaran dalam (*inner vortex*) yang bergerak naik menuju *vortex finder*. Pada model dasar (V0), gradien kecepatan aksial di sekitar *vortex finder* sangat fluktuatif sehingga rentan memicu aliran pintas (*short-circuit flow*) dan terbawanya kembali partikel halus (*re-entrainment*) [16]. Namun, penerapan modifikasi profil *tapered* (V1–V4) terbukti mampu menstabilkan aliran gas buang menjadi lebih simetris dan terpusat. Modifikasi ini secara efektif meredam gerak heliks gas menjadi aliran aksial yang lebih murni sekaligus menurunkan magnitudo puncak kecepatan inti, sehingga meminimalisasi gaya seret vertikal yang berisiko menyeret partikel berukuran mikron keluar dari sistem saluran buang [8].

Selain kecepatan aksial, komponen kecepatan tangensial memegang peranan krusial dalam membangkitkan gaya sentrifugal untuk memisahkan fasa padat melalui struktur pusaran ganda (*Rankine vortex*). Pada model tanpa modifikasi, zona berkecepatan tangensial tinggi menyebar luas secara dominan hingga ke area kerucut, sedangkan penggunaan variasi *tapered* secara progresif mendistribusikan zona tersebut agar lebih terkontrol. Penurunan titik puncak kecepatan tangensial ini memberikan keuntungan termodinamis yang nyata dengan mencegah disipasi energi kinetik gas secara berlebihan yang menjadi kontributor utama tingginya *pressure drop* [18]. Meskipun demikian, reduksi ini memerlukan kompromi aerodinamis; peredaman gerak pusar yang terlalu kuat pada variasi *tapered* terpanjang berpotensi melemahkan gaya sentrifugal yang dapat berdampak pada penurunan kemampuan pemisahan partikel secara keseluruhan.

Dinamika kecepatan fluida tersebut berdampak langsung pada distribusi tekanan statis yang membentuk pola radial, di mana tekanan tertinggi berada di area dinding dan berangsur menurun hingga mencapai kondisi vakum di sumbu

pusat. Model dasar (V0) memiliki zona bertekanan ekstrem yang sangat dominan menyelimuti bagian tengah ruang silindris dari area *inlet*. Dengan penerapan modifikasi *tapered*, zona tekanan tinggi tersebut menyusut drastis dan tergantikan oleh rentang tekanan yang lebih moderat. Perubahan geometri pada *vortex finder* ini berhasil melonggarkan sumbatan aerodinamis di pangkal pipa, sehingga secara efektif mengurangi penumpukan tekanan statis di dalam ruang *cyclone* [16] dan mampu menurunkan *pressure drop* sistem secara signifikan dari 1416 Pa menjadi sekitar 1168 Pa (penurunan $\pm 17,5\%$).

3.2 Efisiensi Pengumpulan

Model *baseline* V0 mencatatkan efisiensi sebesar 77,97%. Modifikasi geometri *tapered* memperlihatkan adanya kompromi aerodinamis (*aerodynamic trade-off*): variasi dengan profil *tapered* terpanjang (V4) yang memiliki *pressure drop* terendah justru menghasilkan efisiensi pengumpulan terburuk (70,44%) akibat melemahnya medan gaya sentrifugal [7].

Kecenderungan umum menunjukkan bahwa panjang *tapered* yang moderat memberikan keseimbangan terbaik. Variasi V2 tampil sebagai konfigurasi paling optimal dengan efisiensi pengumpulan tertinggi di antara seluruh variasi (76,45%) sekaligus tetap menjaga *pressure drop* yang rendah (± 1187 Pa). Stabilitas medan aliran pada variasi ini juga efektif menekan fenomena *re-entrainment* partikel dari *dustbin* sehingga retensi fraksi halus terjadi [9], [17].

4. Kesimpulan

Modifikasi geometri *tapered* pada *vortex finder cyclone* separator tipe Stairmand telah dikaji menggunakan metode CFD-DEM melalui interpretasi kontur kecepatan aksial, kecepatan tangensial, tekanan, dan lintasan partikel. Secara umum, modifikasi tersebut menstabilkan aliran aksial pada pusaran dalam, meredam puncak kecepatan tangensial yang berlebihan, dan menurunkan penumpukan tekanan statis, sehingga seluruh variasi modifikasi menghasilkan *pressure drop* yang lebih rendah dibandingkan model konvensional. Namun demikian, terdapat kompromi aerodinamis di mana pemanjangan profil *tapered* yang berlebihan melemahkan gaya sentrifugal dan menurunkan efisiensi pengumpulan, sebagaimana teramati pada lolosnya fraksi partikel halus melalui *vortex finder*. Berdasarkan keseimbangan antara penghematan energi dan performa pemisahan, variasi dengan panjang *tapered* moderat (V2) teridentifikasi sebagai konfigurasi paling optimal.

5. Daftar Pustaka

- [1] Yohana, E., et al., 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.
- [2] Yohana, E., Tauviquirrahman, 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.
- [3] Babaoğlu, N.U., Parvaz, F., Hosseini, S.H., Elsayed, K., Ahmadi, G., 2021, "Influence of the inlet cross-sectional shape on the performance of a multi-inlet gas cyclone," *Powder Technology*, 384: 82–99.
- [4] Yao, Y., et al., 2021, "Effects of the inlet duct length on the flow field and performance of a cyclone separator with a contracted inlet duct," *Powder Technology*, 393: 12–22.
- [5] Song, J., Zhang, Y., Zhu, D., Xiang, R., 2019, "Performance evaluation of virtual cyclone with various inlet and outlet dimensions," *Journal of Aerosol Science*, 128: 114–124.
- [6] Hamdy, O., Bassily, M.A., El-Batsh, H.M., Mekhail, T.A., 2017, "Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field," *Applied Mathematical Modelling*, 46: 81–97.
- [7] Fatahian, H., Hosseini, E., Fatahian, E., 2020, "CFD simulation of a novel design of square cyclone with dual-inverse cone," *Advanced Powder Technology*, 31(4): 1748–1758.
- [8] Wasilewski, M., Brar, L.S., Ligus, G., 2020, "Experimental and numerical investigation on the performance of square cyclones with different vortex finder configurations," *Separation and Purification Technology*, 239: 116588.
- [9] Elsayed, K., Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G., 2020, "Influence of the dipleg and dustbin dimensions on performance of gas cyclones: An optimization study," *Separation and Purification Technology*, 239: 116553.
- [10] El-Emam, M.A., Zhou, L., Shi, W.D., Han, C., 2021, "True shape modeling of bio-particulate matter flow in an aero-cyclone separator using CFD-DEM simulation," *Computational Particle Mechanics*, 8(4): 955–971.
- [11] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd ed.," John Wiley & Sons, Inc.
- [12] 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.
- [13] ANSYS, 2023, "Rocky CFD Coupling Technical Manual," ANSYS Inc.
- [14] Hoekstra, A.J., 2000, "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators," Technische Universiteit Delft, Delft.

-
- [15] 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.
 - [16] Yao, Y., et al., 2022, “Double-Eccentric Design for the Vortex Finder of a Cyclone Separator,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(40): 14927–14939.
 - [17] Overcamp, T.J., Mantha, S.V., 1998, “A simple method for estimating cyclone efficiency,” *Environmental Progress*, 17(2): 77–79.
 - [18] 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.