

KARAKTERISTIK DAN PERFORMA *CYCLONE SEPARATOR* DENGAN PENAMBAHAN *VORTEX FINDER (TAPERED OUT – CYLINDER IN)* DAN VARIASI PENDINGINAN PADA *CONE CYCLONE* DENGAN MENGGUNAKAN SIMULASI NUMERIK

Eflita Yohana², Mohammad Tauviquirrahman², Bachtiar Kurnia Prakoso¹, Kwang-Hwan Choi³, Henry Carles²

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

³Sekolah Tinggi Teknik, Universitas Nasional Pukyong, 365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan
608-739, Korea

*E-mail: tiardroid@gmail.com

Abstract

The Computational Fluid Dynamic method is widely used as a problem solver because it is cheap and faster. This study presents the influence of vortex finder geometry (Tapered out-Cylinder in) innovation. Three length variations of the vortex finder 20%, 30%, and 40% will be simulated under cooling conditions and without additional cooling on the velocity flow field, cyclone performance, temperature distribution, and heat transfer. The RSM turbulence model is used to simulate fluid flow. The Eulerian-Lagrangian approach was chosen to predict the phase movement of the particles. The trajectories of particles in the stream are tracked individually using the DPM method. The cooling model is applied assuming a constant temperature on the surface of the cyclone body. This simulation results show similar trends both with experimental studies and numerical simulations. Significant results can be seen in the value of the pressure drop decrease up to 12% with the application of cooling conditions. The cyclone collection efficiency showed an insignificant increase but most of the particles collected were drier due to an increase in heat transfer in all cases of variation.

Keyword: cyclone separator, CFD, extra cooling, novel vortex finder

Abstrak

Metode *Computational Fluid Dynamic* menjadi referensi yang banyak digunakan dalam pemecahan masalah karena murah dan lebih cepat. Penelitian ini mengkaji mengenai pengaruh inovasi geometri *vortex finder* (Tapered Out-Cylinder In). Tiga variasi panjang *vortex finder* 20%, 30%, dan 40% akan disimulasikan pada kondisi pendinginan dan tanpa pendinginan tambahan terhadap medan aliran kecepatan, performa *cyclone*, distribusi temperatur, dan perpindahan panas. Model turbulensi RSM digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida. Pendekatan Eulerian-Lagrangian dipilih untuk memprediksi pergerakan fasa partikel. Lintasan partikel dalam aliran dilacak secara individual menggunakan metode DPM. Model pendinginan diaplikasikan dengan asumsi temperatur konstan pada permukaan *cone cyclone*. Hasil simulasi menunjukkan kesamaan tren baik dengan kajian eksperimen maupun simulasi numerik. Hasil yang signifikan dapat terlihat pada nilai penurunan tekanan turun hingga 12% dengan penerapan kondisi pendinginan. Efisiensi pengumpulan *cyclone* menunjukkan peningkatan yang tidak signifikan namun sebagian besar partikel yang terkumpul lebih kering disebabkan adanya peningkatan perpindahan panas pada semua kasus variasi.

Kata kunci: cyclone separator, CFD, extra cooling, novel vortex finder

1. Pendahuluan

Banyak kajian eksperimental maupun numerikal telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari suatu *cyclone*. Karagoz, dkk. (2013) meneliti mengenai desain *cyclone separator* baru. Pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa nilai *pressure drop* antara desain *cyclone* konvensional dan desain *cyclone* baru memiliki perbedaan yang tidak terlalu jauh, tetapi efisiensi pengumpulan partikel pada desain *cyclone* baru lebih tinggi. Penelitian mengenai parameter geometris telah dilakukan oleh Hsiao, dkk. (2015). Dalam penelitiannya menyatakan bahwa perubahan bentuk pada *cyclone* akan mempengaruhi performa dari *cyclone separator*. Mothilal, dkk. (2016) menyatakan dalam penelitiannya bahwa dengan peningkatan tinggi *cyclone* berpengaruh dalam penurunan *pressure drop* serta perpindahan panas partikel dalam *cyclone*. Mariani, dkk. (2017) dalam penelitiannya menyatakan bahwa optimalisasi panjang dari *vortex finder* berpengaruh dalam penurunan tekanan dan perpindahan panas pada *cyclone*. Pengaruh penambahan *metal rod* di dalam *cyclone* telah diteliti oleh Sripriya, dkk. (2013). Hasilnya menyatakan bahwa penambahan *rod* di dalam *cyclone* mengakibatkan nilai kecepatan tangensial meningkat, dengan meningkatnya kecepatan tangensial maka gaya sentrifugal akan meningkat pula yang menyebabkan efisiensi pengumpulan akan semakin besar.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh inovasi bentuk *vortex finder* (Tapered out-Cylinder in) dengan memvariasikan panjang *vortex finder* dan penerapan pendinginan tambahan dengan Computational Fluid Dynamic (CFD), tidak hanya pada medan aliran dan siklonkinerja tetapi juga pada perpindahan panas. Inovasi pencari pusaran inigeometri diharapkan dapat mengubah medan aliran setempat sehingga penurunan tekanan dapat dikurangi. Pendinginan tambahan juga diterapkan di dinding silinder untuk meningkatkan perpindahan panas dan mendapatkan output partikel temperatur yang setara dengan temperatur lingkungan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan teoritik untuk teknologi pengumpulan partikel pada *cyclone separator* dengan melibatkan inovasi geometri *vortex finder* dengan tambahan pendingin.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Gas phase modelling equation

Pada penelitian ini, bilangan Mach menunjukkan nilai <0,3 sehingga fluida dianggap sebagai aliran inkompresibel. Komponen gas aliran pemodelan dapat dinyatakan dalam Persamaan. (1) dan (2)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j'}) \quad (2)$$

Dimana ρ adalah *gas density*, x_i adalah *position*, $\overline{u_i}$ adalah *mean velocity*, u_i' adalah *fluctuating velocity component*, p adalah *pressure*, μ adalah *viscosity*, $-\overline{\rho u_i u_j'}$ adalah *reynold stress tensor*. Dalam Persamaan. (3), T dan t masing-masing adalah komponen suhu berfluktuasi dan rata-rata waktu.

Pada artikel ini, pertimbangan utama biaya komputasi yang rendah tetapi prediksi yang akurat tinggi seperti yang dibahas dalam [20,36,37], model turbulensi dari Reynold Stress Model (RSM) digunakan untuk mengungkap aliran turbulensi di pemisah siklon. Dalam RSM, persamaan transport Eq. (5) ditulis sebagai [12]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i u_j'}) = D_{T,ij} + P_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + S \quad (5)$$

Dimana $D_{T,ij}$ adalah *turbulent diffusion equation*, P_{ij} adalah *stress production equation*, ϕ_{ij} adalah *pressure strain equation*, ε_{ij} adalah *dissipation equation*. Persamaan ruas kiri adalah turunan waktu dari tegangan dan suku transpor konvektif, sedangkan empat suku di ruas kanan dirumuskan [45].

Dalam menentukan *fluctuating gas velocity*, penelitian ini menggunakan model *discrete random walk (DRW)* berdasarkan metode stokastik. Nilai u' , v' dan w' adalah sama pada umur pusaran turbulen, T_e menurut distribusi probabilitas Gaussian menggunakan korelasi berdasarkan Persamaan. (6) [44]:

$$u_i' = \xi \sqrt{\overline{u_i u_i'}} \quad (6)$$

Dimana ξ adalah *random number* dari *normal distribution*, dan $\sqrt{\overline{u_i u_i'}}$ adalah *local root-mean-square* dari *fluctuating velocity*. *Eddy lifetime characteristic* adalah didefinisikan sebagai *constant*, sebagaimana Eq. (7) [44]:

$$T_e = -T_l \log r \quad (7)$$

Di mana r adalah *uniform random number*. Untuk melacak pergerakan partikel kecil, skala waktu skala terintegrasi dalam model turbulensi RSM didefinisikan sebagai $T_l = 0.3 \frac{k}{\varepsilon}$ [46]. *Particle* diasumsikan berinteraksi dengan medan *fluid fluctuations*, yang tetap sepanjang *eddy lifetime*. Ketika *eddy lifetime* dihitung, nilai baru kecepatan sesaat diperoleh dengan memasukkan nilai baru dalam Persamaan. (8).

2.2 Discrete Phase Model

Pendekatan Euler-Lagrangian digunakan dalam pemodelan *multi-phase flow*. Dalam menyelesaikan aliran dua fase di *cyclone* dan *predicting particle tracking*, pendekatan Eulerian-Lagrangian diadopsi dengan udara sebagai *continuous phase* dan *particle* sebagai *discrete dispersed phase*. Fasa gas dianalisis menggunakan persamaan Navier-Stokes, sedangkan prosedur analisis jalur Lagrangian mensimulasikan gerakan partikel. *Drag* dan gravitasi adalah gaya yang bekerja pada partikel. Interaksi partikel diabaikan oleh pengujian setiap partikel berbentuk bola dan tidak berputar. Oleh karena itu, persamaan gerak partikel Eq. (8-9) dapat ditulis sebagai berikut [46]:

$$\frac{dx_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (8)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + g_x \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (9)$$

Dimana x_p adalah *particle position*, \mathbf{u}_p adalah *particle velocity*, \mathbf{u} adalah *fluid velocity*, ρ_p dan ρ adalah *gas dan particle density* dan $F_d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ adalah *drag force per unit mass* dari *particle*. Untuk persamaan F_d mengikuti [47].

2.3 Model Pendinginan

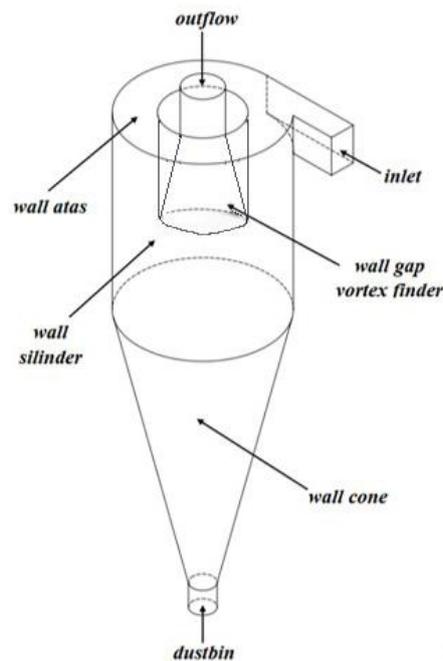
Perpindahan panas pada persamaan. (10) menghubungkan suhu partikel dengan perpindahan panas konveksi pada permukaan partikel sebagai berikut [48].

$$\dot{Q} = hA_s \Delta T_{avg} = hA_s (T_s - T_m)_{avg} \quad (10)$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, A_s adalah luas permukaan perpindahan panas (setara dengan πDL untuk sebuah silinder dengan panjang L), dan ΔT_{avg} adalah perbedaan rata-rata temperatur fluida dan permukaan.

2.4 Geometri dan Computational Grid

Pada kasus ini, desain terinspirasi *Stairmand high-efficiency Cyclone* [40]. Dimensi diambil dari model laboratorium pengeringan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, model yang digunakan pada analisis kali ini mempunyai perbedaan: *conventional cyclone*, *novel cyclone vortex finder tapered out-in* (selanjutnya dikenal “*tapered out-in*”) dan *cooling wall cylinder* pada *novel cyclone vortex finder tapered in-out* (selanjutnya dikenal “*cylinder wall cooling-tapered in-out*”) terlihat pada Gambar 1. Dimensi model secara rinci yang digunakan untuk simulasi pada studi ini terlihat pada Gambar 2.

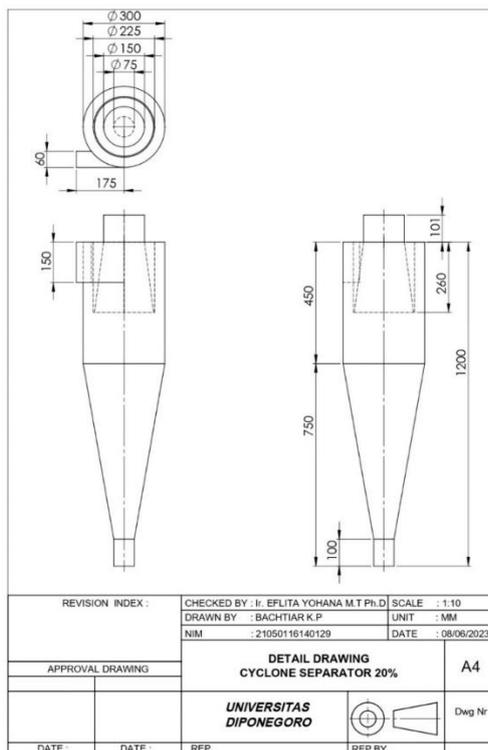


Gambar 1 Design of cyclone tapered out cylinder in

Dimana bentuk *vortex finder* modifikasi merupakan gabungan dari dua bentuk yaitu bentuk meruncing (*tapered*) pada sisi luar dan bentuk silinder lurus (*straight*) pada sisi dalam. Bentuk meruncing pada sisi luar *vortex finder* berfungsi untuk membangkitkan aliran *vortex* ketika partikel masuk secara tangensial sekaligus menjadi penghalang partikel yang akan keluar dari *cyclone* menuju *vortex finder* untuk kembali memutar sehingga akan tertangkap oleh *dustbin*. Kemudahan konstruksi dan terjangkau biaya menjadi pertimbangan dalam modifikasi geometri *vortex finder*. Pendinginan tambahan juga diaplikasikan pada bagian silinder *body cyclone* untuk meningkatkan perpindahan panas dan memperoleh temperatur keluaran partikel yang setara dengan temperatur lingkungan. Pemodelan geometri dilakukan dengan *software* Solidwork dan dilanjutkan dengan ANSYS *Spaceclaim* untuk finishing hasil desain sebelum menuju proses meshing. Bentuk dan dimensi geometri modifikasi *cyclone separator*

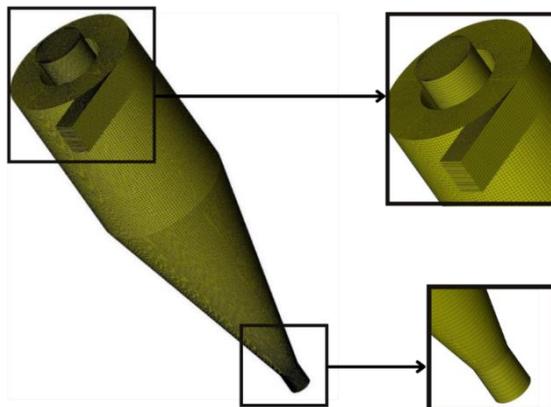
Tabel 1. Dimension of the cyclone tapered out-in and cooling wall cyclinder tapered out-in.

Geometri	Dimensi (mm)
Diameter outflow, D_a	75
Diameter vortex finder luar, D_b	225
Diameter body cyclone, D_c	300
Diameter outlet dustbin, D_d	75
Diameter inlet, b	60
Tinggi inlet, a	150
Panjang vortex finder, H_b	260; 390; 510
Tinggi body cyclone, H_c	450
Tinggi outlet dustbin, H_d	100
Panjang cyclone separator, L	1300



Gambar 2 Geometri modifikasi *Cyclone Separator*

Grid variasi simulasi dibangun menggunakan *multi-block structured hexahedral*, *pre-processing* menggunakan ICEM-CFD di ANSYS ditampilkan pada Gambar 3 yang merupakan *computational mesh* dari *cyclone* dengan mendekati 700.000 *hexahedral cells*. Dalam penelitian kali ini, 8 tingkatan *mesh* diperhitungkan untuk memeriksa *dependency of results* pada *mesh density* untuk semua kasus.

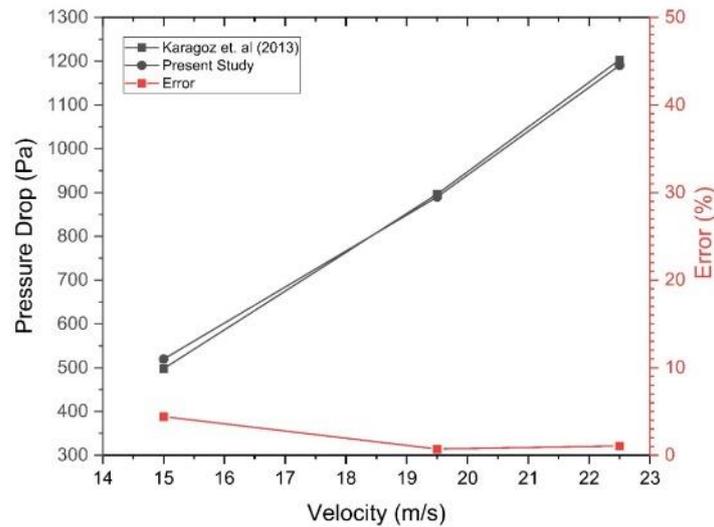


Gambar 2 *Computational mesh* of (a) *view three-Dimensional*, (b) *view cut-plane ZX*

Pengecekan kualitas *grid* dilakukan dengan metode determinan. Determinan merupakan tingkat deformasi dari suatu elemen pada suatu *grid*. Determinan memiliki nilai minimal 0 dan maksimal 1. Nilai determinan 1 menunjukkan bentuk kubus *hexahedral* sempurna, sedangkan nilai determinan 0 menunjukkan bentuk kubus *hexahedral* yang memiliki nilai volume negatif. Nilai minimal determinan yang dibutuhkan adalah 0.2. Berdasarkan hasil meshing nilai determinan dari modifikasi *cyclone separator* sebesar 0.303. Nilai determinan ini lebih besar dari standar determinan yang digunakan sehingga struktur *mesh* dapat digunakan.

2.5 Validasi Hasil

Validasi digunakan untuk mengetahui kebenaran pengaturan kondisi dan hasil pada simulasi ini. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai penurunan tekanan dengan eksperimen yang dilakukan oleh Karagoz dkk. (2013) dan laju perpindahan panas dengan eksperimen Mothilal dkk. (2018). Gambar 3.36 mempresentasikan perbandingan penurunan tekanan dan Gambar 3.37 mempresentasikan laju perpindahan panas dengan pengaturan simulasi *cyclone* penulis. Hasil menunjukkan error maksimum penurunan tekanan sebesar 6.70% pada penurunan tekanan dan 6.86% pada laju perpindahan panas.



Gambar 3. 1 Perbandingan nilai *pressure drop* hasil simulasi dengan hasil eksperimen

2.6. Boundary Condition

Pada studi kali ini, *inlet boundary condition* di set sebagai *inlet velocity* dengan kecepatan 15m/s, *hydraulic diameter* 0.054m dan *turbulent intensity* 4.084. *Temperature environment* 323°K yang beroperasi pada semua *cyclone wall* dengan ketebalan dinding 0.002m. *Mass loading* memiliki nilai 0.00025 kg/s, *particle density* 1300 kg/m³ dan *gas density* 1225 kg/m³. *Ouflow* di terapkan di *vortex finder*. *Boundary condition specified* pada permukaan *cyclone* sebagai *wall condition* dengan *setting* mengikuti: “DPM reflect” dan “no-slip” kondisi untuk permukaan *cyclone* dan “trap” untuk kondisi dinding *dustbin*.

Partikel yang dimasukan di inlet dan terdistribusi di *cyclone*, maka untuk mendapatkan *efficiency particle* dapat ditentukan dengan Eq.(11) sebagaimana mengikuti [49].

$$\eta = \frac{N_{trapped}}{N_{total}} \times 100\% \quad (11)$$

Dengan $N_{trapped}$ adalah *particle trapped* di *dustbin* dan N_{total} adalah *total of injected particle*. Pada simulasi ini menggunakan penyelesaian *unsteady* dengan time step dari simulasi 0.001s dan number of time steps 10000. Untuk *particle size distribution*, *Rosin-Rammler distribution* dipilih dengan asumsi hubungan eksponensial antara diameter partikel dan fraksi partikel Eq. (12).

$$y_d = e^{\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (12)$$

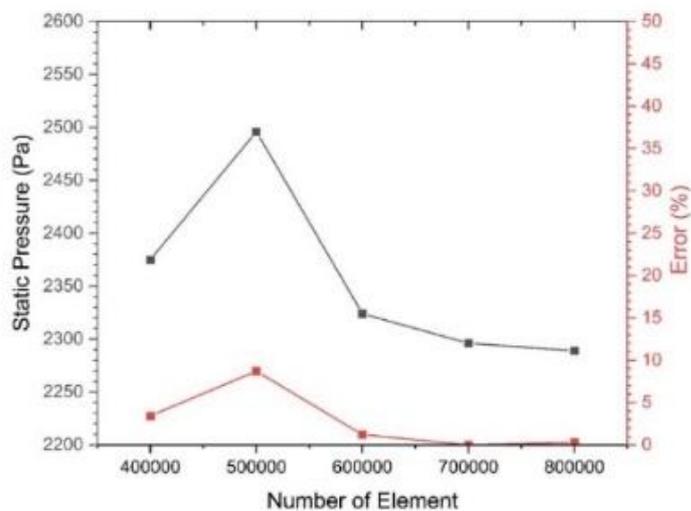
Dimana \bar{d} adalah *particle size* (mm), d adalah *average diameter* (mm) dan n adalah *distribution diameter*. Lalu n ditentukan didasarkan pada Eq. (13) berdasarkan [48].

$$n = \frac{\ln(-\ln y_d)}{\ln\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)} \quad (13)$$

Pada artikel ini, *particle diameter range* diambil dari 0.1 μ m sampai 134 μ m dengan \bar{d} dan n adalah 44.4 μ m dan 1.68 μ m, didasarkan pada [44,45]

Untuk memastikan simulasi berjalan tanpa membebani komputer perlu dilakukan uji *grid independent*. Lima level elemen mulai dari 400000, 500000, 600000, 700000, dan 800000 digunakan untuk memperoleh hasil nilai grid yang paling baik. Gambar 3 menunjukkan grafik penurunan tekanan statik dari tiap-tiap variasi jumlah elemen. Nilai grid independence didapatkan ketika elemen berjumlah 700000 yang ditandai dengan garis mulai mendatar yang menandakan penurunan tekanan static mulai stabil meski jumlah

elemen semakin bertambah. Perbedaan nilai penurunan tekanan static antara *coarsest* dan *finest* grid sebesar 2.346 %. Oleh karena itu agar tidak membebani perangkat keras dan mendapatkan waktu simulasi yang optimal untuk setiap simulasi berikutnya menggunakan grid 700000.



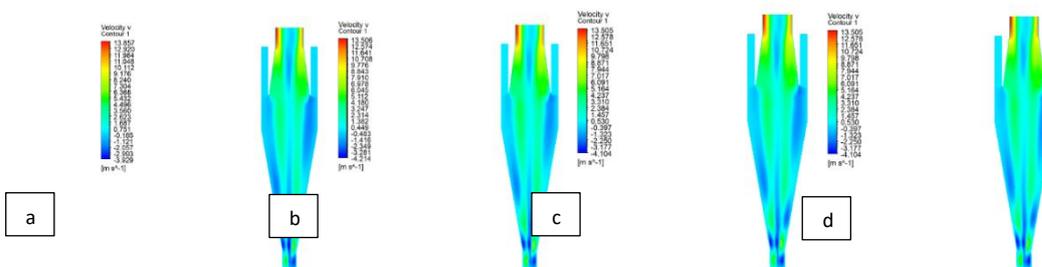
Gambar 3. 2 Uji grid independent

3. RESULT AND DISCUSSION

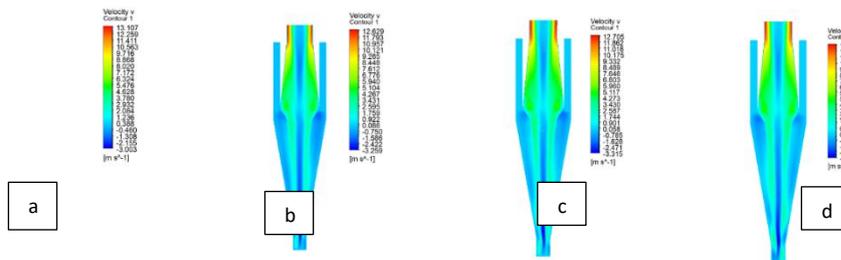
3.1 Kecepatan Axial

Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh panjang *novel vortex finder* (20%, 30%, dan 40%) dengan variasi pendinginan terhadap medan aliran kecepatan, performa, dan perpindahan panas pada *cyclone separator* modifikasi. Untuk mempermudah dalam analisis hasil simulasi ini, pengambilan kontur dan vektor dilakukan pada sumbu XY. Sedangkan data berupa grafik diperoleh secara radial Ketika nilai Z =550mm. Gambar 4.1 menunjukkan skematik pengambilan kontur dan data grafik simulasi.

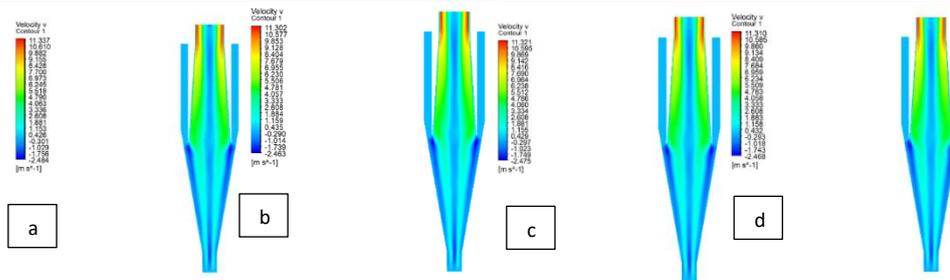
Pengaruh penambahan panjang *novel vortex finder* dan pendinginan tambahan pada *body cyclone* terhadap kontur kecepatan axial ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kontur Axial Velocity pada variasi panjang *vortex finder* dengan pendinginan tambahan Cone 20% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, dan (d)5°C

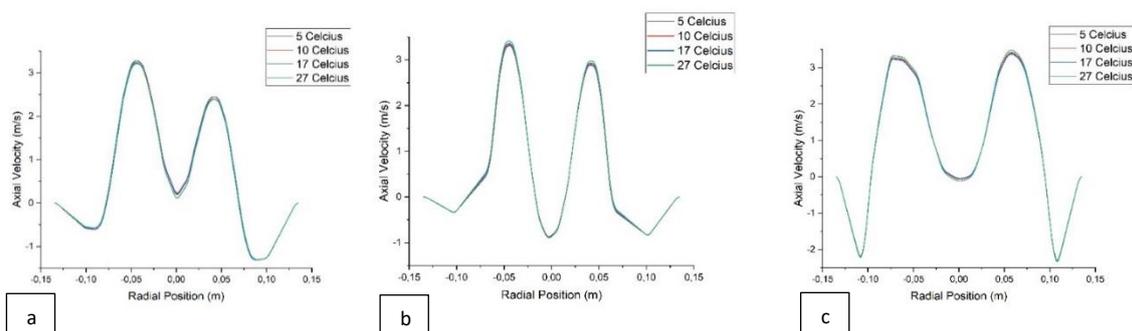


Gambar 4.3. Kontur Axial Velocity pada variasi Cyclone dengan Cone 30% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, dan (d)5°C



Gambar 4.4. Kontur *Axial Velocity* pada variasi Cyclone dengan Cone 40% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, dan (d)5°C

Hasil simulasi ini menunjukkan kesamaan profil kontur dengan penelitian yang dilakukan oleh Elsayed dan Lacor (2012), Yohana dkk. (2021), dan Erol dkk. (2019).

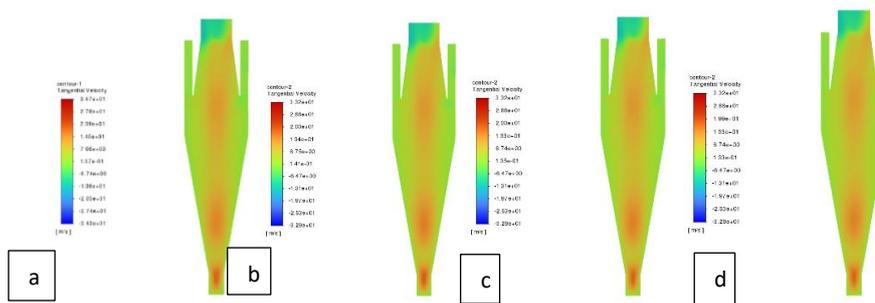


Gambar 4.3 Grafik kecepatan aksial pada variasi (a)20%, (b)30%, dan (c)40% panjang vortex finder

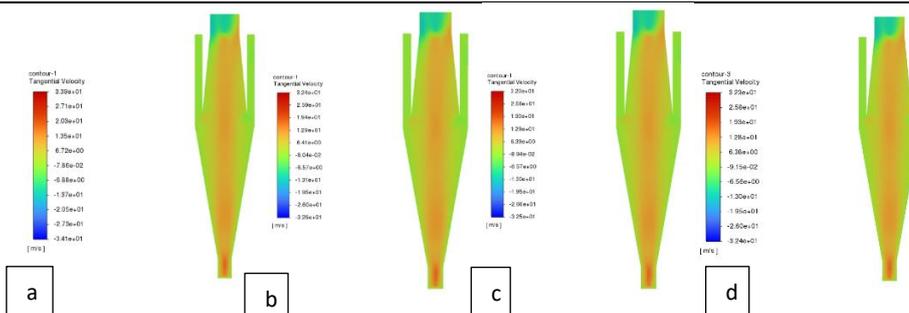
Nilai kecepatan aksial maksimum di dekat dinding *cyclone* dikarenakan sebagian gas mengalir ke atas. Efek penambahan panjang mengakibatkan peningkatan puncak kecepatan aksial pada semua variasi panjang *novel vortex finder*. Ketika panjang *novel vortex finder* 2 kali dari panjang diameter silinder (40%) kecepatan aksial mencapai nilai 3.4 m/s.

3.2 Kecepatan Tangensial

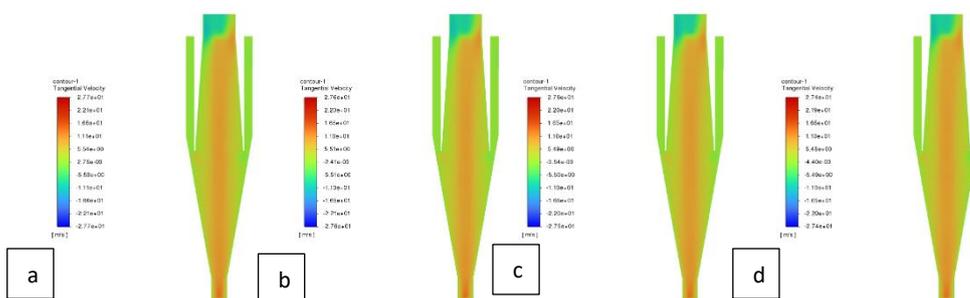
Pengaruh penambahan panjang *novel vortex finder* dan pendinginan tambahan pada *body cyclone* terhadap kontur kecepatan tangensial ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Kontur *Tangential Velocity* pada variasi Cyclone dengan Cone 20% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C



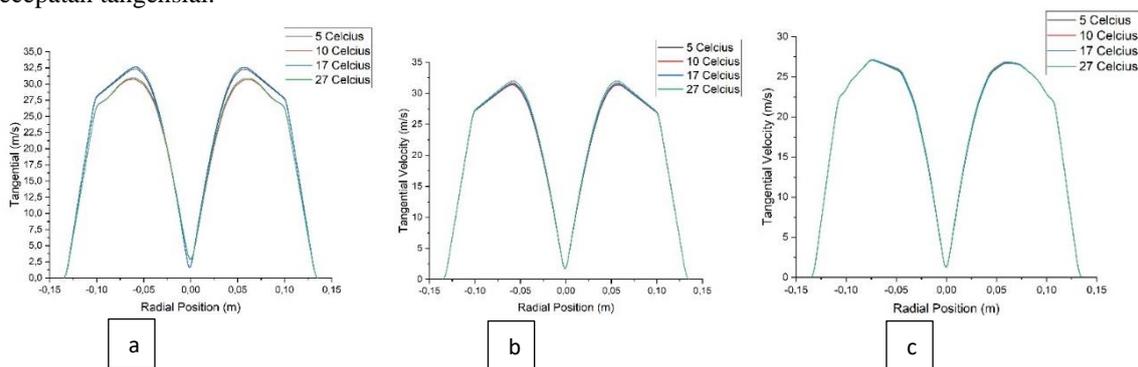
Gambar 4.6. Kontur *Tangential Velocity* pada variasi Cyclone dengan Cone 30% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C



Gambar 4.7. Kontur *Tangential Velocity* pada variasi Cyclone dengan Cone 40% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C

Kecepatan tangensial adalah komponen kecepatan yang sangat penting dalam separasi partikel karena kecepatan ini berhubungan langsung dengan gaya sentrifugal. Semakin besar gaya sentrifugal mengakibatkan partikel yang terkumpul makin banyak. Hasil simulasi menunjukkan adanya *rankine vortex* yang terdiri dari dua bagian yaitu *free vortex* dan *forced vortex*. Aliran *free vortex* memiliki karakteristik aliran berputar tanpa adanya gesekan yang terjadi. Kecepatan tangensial dalam aliran ini memiliki momen dari momentum fluida yang sama setiap radius putarannya. Sedangkan Aliran *forced vortex* memiliki distribusi kecepatan tangensial yang sama seperti pada *solid-body rotation*.

Pada beberapa variasi panjang *novel vortex finder* seperti yang terlihat pada Gambar 4.4 terdapat kecepatan tangensial yang bernilai negatif. Hal ini dikarenakan adanya fenomena *precessing vortex core* (PVC) yaitu terjadinya osilasi di inti *vortex* pada sumbu putar dari geometri *cyclone* (Brar dkk., 2014). Untuk mendapatkan hasil yang lebih jelas maka data disajikan dalam bentuk grafik distribusi kecepatan tangensial.



Gambar 4.9. Grafik *Tangential Velocity* pada variasi Cyclone dengan panjang vortex finder (a)20% (b) 30% (c) 40%

Distribusi kecepatan tangensial memiliki bentuk yang simetris. Fenomena *no slip condition* menyebabkan kecepatan tangensial di dinding *cyclone* bernilai nol. Kecepatan tangensial di daerah *forced vortex* meningkat secara radial hingga mencapai titik puncak dan kemudian menurun mengikuti radius pada daerah *free vortex* (Wang dkk., 2019). Berdasarkan grafik pada Gambar 4.8 dan 4.9 tren kecepatan tangensial memiliki bentuk yang sama yaitu menyerupai bentuk huruf W terbalik. Baik pada kondisi pendinginan maupun tanpa pendinginan luasan daerah di bawah grafik sedikit mengalami peningkatan dengan adanya penambahan panjang *novel vortex finder*. Akan tetapi pada kondisi pendinginan kecepatan tangensial tidak lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa pendinginan. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi pengumpulan antara kedua model tidak jauh berbeda. Nilai kecepatan

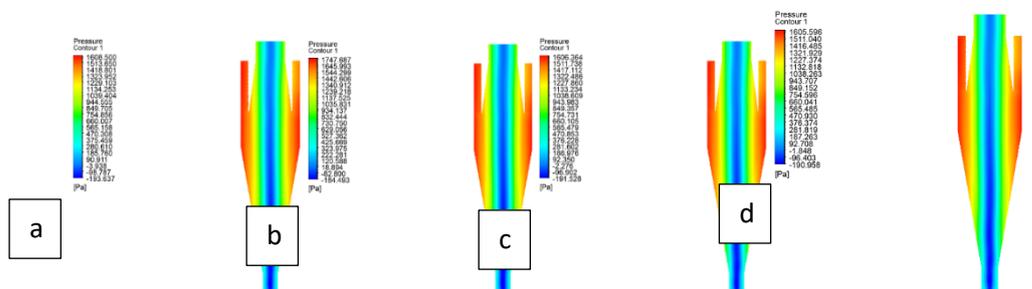
tangensial tertinggi didapatkan pada model *cyclone* dengan panjang *novel vortex finder* 40%. Hal ini dikarenakan panjang aliran *vortex* ikut meningkat seiring dengan penambahan panjang *novel vortex finder*.

3.3 Pressure drop

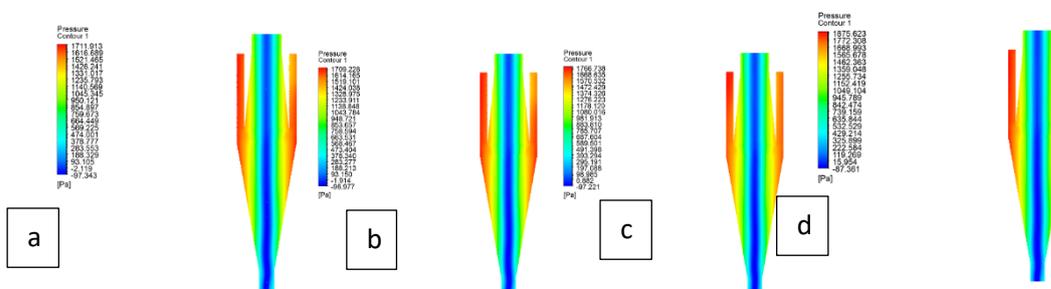
Pressure drop merupakan parameter performa *cyclone* yang menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan partikel melalui sistem (Theodore, 2008). *Pressure drop* merupakan fungsi dari kecepatan gas masuk dan diameter *cyclone*. Penurunan tekanan total dalam *cyclone* disebabkan oleh kerugian masuk, keluar, gesekan dan energi kinetik dalam *cyclone*. Biasanya penurunan tekanan paling signifikan terjadi di tubuh karena adanya pusaran (*swirl*) dan disipasi energi. Biasanya besarnya *pressure drop* yang diakibatkan oleh kerugian gesekan dan kerugian masuk berkisar 10%-30% dari total *pressure drop* (Heumann, 2013). *Pressure drop* dapat dihitung dengan membandingkan perbedaan antara tekanan pada daerah *inlet* dengan daerah *outlet*. Secara empiris hubungan antara *pressure loss* dan kecepatan gas masuk dapat dituliskan pada Persamaan 4.1.

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v_{in}^2}{2} \quad (4.1)$$

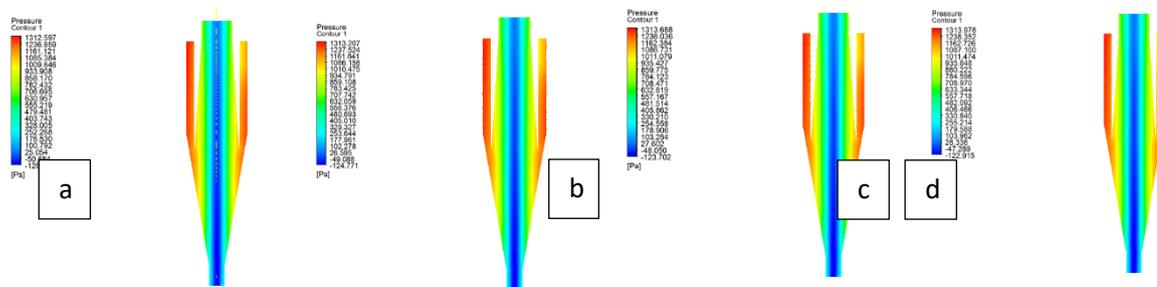
Dimana ξ adalah koefisien *pressure loss* dan v_{in} adalah kecepatan gas masuk. Pengaruh penambahan panjang *vortex finder* dan pendinginan tambahan pada *body cyclone* dapat diamati pada Gambar 4.10 dan 4.11.



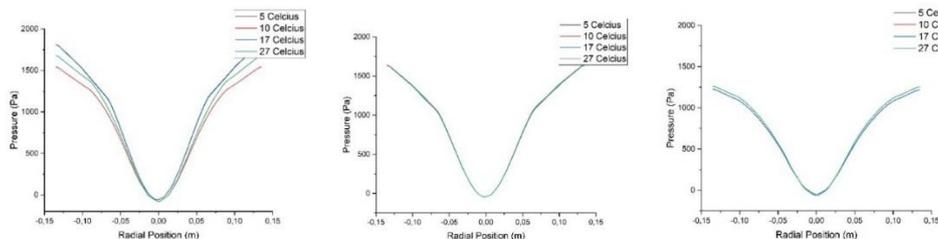
Gambar 4. 1 Kontur tekanan statik pada variasi Cyclone panjang vortex finder 20% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C



Gambar 4.11. Kontur tekanan pada variasi Cyclone dengan Cone 30% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C



Gambar 4. . Distribusi tekanan pada variasi Cyclone dengan Cone 40% (a) 27°C, (b)17°C, (c)10°C, (d)5°C



Gambar 4.10. Grafik Tangential Velocity pada variasi Cyclone dengan panjang vortex finder (a)20% (b) 30% (c) 40%

Hasil simulasi menunjukkan penambahan panjang *vortex finder* mengakibatkan peningkatan *pressure drop* seperti yang disajikan pada Gambar 4.10 dan 4.11. Mula-mula partikel akan masuk melalui *inlet* secara tangensial. Bentuk *body cyclone* akan membangkitkan aliran *vortex*. Partikel akan berputar mengikuti bentuk geometri *cyclone* dan selama perputaran itu terjadi gesekan dengan dinding *cyclone*. Secara konsep mekanika fluida gesekan ini akan menyebabkan kondisi *no slip*, dimana tekanan disekitar dinding akan memiliki nilai tekanan yang besar dibandingkan dengan bagian tengah *cyclone*, akibatnya gradien tekanan pada *cyclone* dominan dalam arah radial. Tekanan statis mencapai nilai maksimum di daerah dinding dan menurun secara radial menuju pusat geometri. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Ficici dkk. (2010), Raoufi. (2008), dan Fu dkk. (2021).

Pengaruh model pendinginan memberikan hasil yang cukup signifikan. Dapat diamati pada kontur tekanan statik pada Gambar 4.10 dan 4.11 nilai tekanan statik berangsur turun pada model pendinginan ditandai dengan perubahan warna daerah tekanan tinggi dari warna merah menjadi *oranye* hingga kuning. Nilai *pressure drop* model pendinginan turun hingga 12% jika dibandingkan model tanpa pendinginan. Hal ini menjadi keuntungan model *cyclone* ditinjau dari sisi konsumsi energi

Berdasarkan Gambar 4.10 grafik tekanan statik memiliki bentuk menyerupai huruf V. Bentuk ini didasari pada distribusi tekanan statik yang memiliki nilai rendah di pusat dan tinggi di daerah dinding akibat gesekan *cyclone*. Penambahan panjang *vortex finder* berpengaruh pada peningkatan *pressure drop*. Akan tetapi kombinasi *novel vortex finder* dan model pendinginan pada *cyclone* cukup efektif dalam menurunkan *pressure drop*. Hal ini dapat kita lihat pada grafik terjadi penurunan tekanan *inlet* dari 2904 Pa menjadi 2462 Pa bahkan 2253 Pa. Dengan demikian model pendinginan menurunkan hambatan aliran di *vortex finder* sehingga aliran menjadi lebih seragam yang berdampak pada menurunnya *pressure drop*.

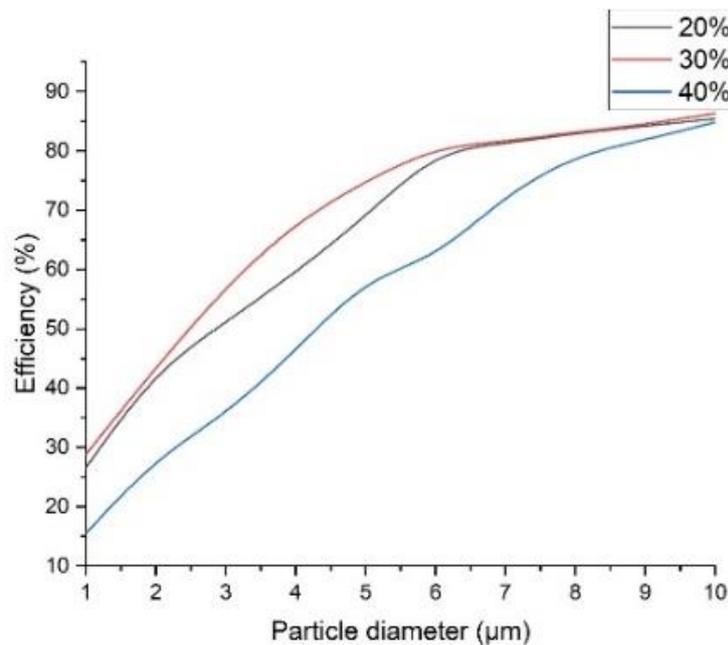
3.4 Efisiensi Pengumpulan Partikel

Efisiensi pengumpulan *cyclone* merupakan kemampuan *cyclone* untuk memisahkan partikel padatan dari gas dengan berbagai ukuran. Pada dasarnya efisiensi pengumpulan *cyclone* merupakan fungsi dari densitas, ukuran partikel, dan desain *cyclone*. Efisiensi *cyclone* akan meningkat dengan cara meningkatkan ukuran partikel/densitas, kecepatan masuk gas, panjang *body cyclone*, jumlah *inlet*, rasio *diameter body/diameter gas keluar*, dan mengurangi kekasaran permukaan pada dinding *cyclone*. Untuk mendapatkan efisiensi pengumpulan partikel, pendistribusian partikel diinjeksikan pada bagian *inlet cyclone*. Partikel yang telah diinjeksikan ke dalam *cyclone* selanjutnya dilakukan *tracking* dengan pendekatan Lagrangian. Efisiensi pengumpulan partikel ditentukan pada Persamaan 4.2 (Fatahian dkk., 2021).

$$\eta = \frac{n_{injected} - n_{escaped}}{n_{injected}} \times 100\% \tag{3.1}$$

Di mana $n_{injected}$ merupakan banyaknya partikel yang diinjeksikan ke dalam *cyclone* dan $n_{escaped}$ adalah partikel yang keluar melalui *vortex finder*. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh penambahan panjang *vortex finder*, pada kondisi pendinginan dan tanpa pendinginan terhadap pemisahan partikel dalam bentuk efisiensi fraksional pengumpulan partikel. Bentuk *novel vortex finder* yang memiliki sisi meruncing pada bagian luar membuat partikel yang terhisap oleh *vortex finder* menabrak dinding *vortex finder* dan jatuh kembali. Posisi *vortex finder* yang semakin pendek menyebabkan *short circuit flow* lebih mudah terjadi sehingga partikel akan langsung keluar melalui *vortex finder* tanpa bergerak ke bawah terlebih dahulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 mengenai vektor pada variasi penambahan panjang *novel vortex finder*.

Hasil pengamatan grafik menunjukkan efisiensi meningkat seiring dengan ukuran partikel yang bertambah besar. Nilai efisiensi belum mencapai 100% pada saat diameter partikel 10 μm hal ini berarti *cyclone* mampu menangkap partikel yang lebih besar dari 10 μm (Zhao dkk., 2006), (Zhao dkk., 2019), (Erol dkk., 2019), (Fatahian dkk., 2021). Meskipun demikian nilai *diameter cut off* menunjukkan pada ukuran diameter 4 μm efisiensi *cyclone* sudah mencapai 50% artinya *cyclone* mampu menangkap partikel *fine* hingga *coarse*.



Gambar 4. 2 Efisiensi pengumpulan cyclone dengan range diameter partikel 1 – 10 mikron

Secara umum perbedaan nilai efisiensi dari semua kasus tidak berbeda jauh. Nilai *diameter cut off* tercapai pada ukuran partikel 4 mikron. Ketika nilai efisiensi mendekati 50%. Dapat kita saksikan bersama panjang *vortex finder* D_c dan 30% menunjukkan nilai efisiensi tertinggi untuk kondisi pendinginan. Nilai efisiensi kondisi tanpa pendinginan lebih kecil daripada kondisi pendinginan dengan efisiensi tertinggi dicapai ketika panjang *vortex finder* 30%.

4. Kesimpulan

Inovasi geometri *cyclone separator* dengan model tapered in silinder out vortex finder telah dianalisis menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD). *Cyclone* disimulasikan dengan dan tanpa pendinginan tambahan dengan vortex finder yang bervariasi ($0.5D_c$, $0.75 D_c$, D_c , $1.25D_c$). Simulasi dilakukan pada kondisi *transient* menggunakan model turbulensi RSM. Hasil simulasi menunjukkan penambahan panjang inovasi geometri *vortex finder* dan penambahan kondisi pendinginan mempengaruhi medan aliran kecepatan, performa *cyclone*, dan perpindahan panas. Kesimpulan dari penelitian ini dapat ditulis sebagai berikut :

1. Kecepatan aksial tertinggi diperoleh ketika panjang *vortex finder* $1.25 D_c$. Pengaplikasian pendinginan tambahan pada *body cyclone* menyebabkan medan aliran *vortex* lebih seragam akibat adanya pergeseran nilai kecepatan aksial di inti pusaran menuju ke arah positif seiring dengan penambahan panjang *vortex finder*.
2. Nilai kecepatan tangensial pada kondisi pendinginan lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa pendinginan. Hal ini berdampak pada efisiensi pengumpulan kedua model yang tidak jauh berbeda.
3. *Pressure drop* turun hingga 13% dengan menerapkan kondisi pendinginan pada *body cyclone separator*. Meskipun penambahan panjang *vortex finder* menyebabkan *pressure drop* kembali naik namun prosentase peningkatannya kurang dari 1% hal tersebut dapat diabaikan.
4. Penambahan panjang *vortex finder* dan aplikasi kondisi pendingin belum menunjukkan hasil yang signifikan pada efisiensi pengumpulan *cyclone separator*, dalam hal ini efisiensi cenderung hampir sama.
5. Kondisi pendinginan efektif dalam menghasilkan partikel yang lebih kering. Hal ini dibuktikan dengan nilai perpindahan panas yang semakin baik 15-20% dan distribusi temperatur yang lebih rendah 3K pada pusat sumbu *cyclone* seiring dengan peningkatan panjang *vortex finder* dan implementasi pendinginan tambahan pada *body cyclone*.

5.2 Saran

Penelitian mengenai *cyclone separator* harus mengikuti trend dan perkembangan zaman, oleh karena itu penulis menyarankan beberapa hal di bawah ini.

1. Perlu dilakukan simulasi menggunakan model turbulensi *Large Eddy Simulation* untuk dapat melihat perilaku aliran lebih nyata.
2. Ukuran diameter sampel partikel dapat ditambah sehingga efisiensi partikel 100% dapat terlihat dengan jelas.
3. Kajian eksperimental dapat dilakukan untuk meningkatkan validitas simulasi.
4. Variasi panjang *vortex finder* dapat ditambah hingga masuk ke daerah separasi dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan.
5. Perlu dilakukan simulasi dengan menambahkan vortex broken wing dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan *pressure drop*.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali, A. M. (2018). *Performance Investigation of A Mini Cyclone with Virtual Body*. ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ.
- [2] Anandharamkrishnan, C., & Ishwarya, P. S. (2015). *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*. Publisher: Wiley-Blackwell.
- [3] Badan Pusat Statistik. (2020). *Statistik Teh Indonesia 2020*. Jakarta: BPS RI/BPS – Statistics Indonesia.
- [4] Bashir, K. (2015). *Design and Fabrication of Cyclone Separator*. Bs Chemical Technology.
- [5] Bernasconi, G., & dkk. (1995). *Teknologi Kimia Bagian 2*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [6] Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- [7] Dewi, A. K., & Satibi, L. (2015). Kajian Pengaruh Temperatur Pengerinan Semprot (Spray Dryer) terhadap Waktu Pengerinan dan Rendemen Bubuk Santan Kelapa (Coconut Milk Powder). *Konversi*, Volume 4 No 1.
- [8] Elsayed, K. (2011). Board Size and Corporate Performance : The Missing Role of Board Leadership Structure. *Journal of Management and Governance*, 15, 415-446.
- [9] Ithape, P. K., Barve, S. B., & Nadgire, A. R. (2017). Effect of Geometric Parameters on the Performance of Cyclone Separator using CFD. *International Journal of Current Engineering and Technology*, JCET INPRESSO Special Issue-7 (March 2017).
- [10] Leith, D., & Mehta, D. (1973). Cyclone Performance and Design. *Atmospheric Environment Pergamon Press*, Vol. 7, pp. 527-549.
- [11] M., W. &. (1988). *Chemical Process Equipment*. United States of America: Butter worth Publisher.
- [12] McGurk, K., Owen, B., & Watson, W. D. (2020). Heritability of Haemodynamics in the ascending aorta. *Nature Portfolio*, DOI: 10.1038/s41598-020-71354-7.
- [13] Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5th Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. *Fluid Mechanics and Its Applications*.
- [15] Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press.
- [16] Olson, R. M. (1990). *Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik (Edisi Kelima)*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- [17] Parvaz, F., Hosseini, S., Elsayed, K., & Ahmadi, G. (2018). Numerical Investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separations and Purification Technology*, 201, 223-237.
- [18] Peng, T., Zhang, X., Huang, Y., Zhao, Z., Liao, Q., Xu, J., . . . Wu, C. (2017). Nanoporous mannitol carrier prepared by non-organic solvent spray drying technique to enhance the aerosolization performance for dry powder inhalation. *Scientific Reports*, Doi: 10.1038/srep46517.
- [19] Perry, R. H., & Chilton, C. H. (1999). *Chemical Engineer's Handbook 7th Edition*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- [20] Price, J. F. (2006). Lagrangian and Eulerian Representations of Fluid Flow : Kinematics and the Equations of Motion. *Woods Hole Oceanographic Institution*.
- [21] Qiu, G., Henke, S., & Grabe, J. (2011). Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computers and Geotechnics*, 30-39.
- [22] Rhodes, M. (2008). *Introduction to Particle Technology, 2nd Edition*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Son.
- [23] Samantha, S. C., Bruna, A. S., Adriana, R. M., Fabio, B., Sandro, A. R., & Aline, R. C. (2015). Drying by spray drying in the food industry: Microencapsulation, process parameters and main carriers used. *African Journal of Food Science*, 9(9), 462-470.
- [24] Schnelle, K. B., & Brown, C. A. (2002). *Air Pollution Control Technology Handbook*. United State of America: CRC Press LLC.
- [25] Siswoputranto, P. (1978). *Perkembangan Teh, Kopi, dan Coklat Internasional*. Jakarta: Gramedia.
- [26] Swain, P. C. (2016). Fluid Mechanics. *Civil Engineering in B Tech*.

-
- [27] Taiwo, M. I., Namadi, M. A., & Mokwa, J. B. (2016). Design and analysis of cyclone dust separator. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol.5, Issue-4, pp. 130-134.
- [28] Theodore, L. (2008). *Air Pollution Control Equipment*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- [29] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Harlow: Pearson Education Limited.
- [30] Walas, & Stanley, M. (1988). *Chemical Process Equipment*. United States of America: Butterworth Publisher.
- [31] Wang, J., Peng, F., Tu, Z., Zhang, D., Guo, J., & Huang, C. (2020). Brief Introduction of Dehumidification Technology and Research Progress. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 568.
- [32] 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 and Velocity Flow Field, Performance, and Heat Transfer of Cyclone Separator. *Powder Technology*, 399.
- [33] Zhang, Z., & Chen, Q. (2007). Comparison of the Eulerian and Lagrangian Methods for Predicting Particle Transport in enclosed spaces. *Atmospheric Environment*, 41 (25).