

Simulasi Numerik Pengaruh Modifikasi Vortex Finder Terhadap Performa New Cyclone Separator

Shofwan Bahar*, Eflita Yohana, MSK. Tony Suryo Utomo, M. Badruz Zaman

*Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: shofwan_bahar@yahoo.com

Abstract

Cyclone separators can be used to separate solid and gas phases and can classify particles based on size. There are many geometric and operational parameters that affect cyclone performance, one of which is modification of the geometry to obtain more efficient performance. In this study, the blade cross shape was added to the vortex finder with variations in width of 0 mm, 5 mm, and 10 mm, vortex finder thickness was varied with sizes 1 mm, 5 mm, 10 mm, and 15 mm. Both of these variations are simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD) to determine the effect of these variations on the flow field and performance that occurs in the new cyclone separator. Reynold stress model (RSM) is used to simulate the flow that occurs. The Eulerian-Lagrangian approximation is used to predict the movement of particles in the new cyclone. The Rosin-Rammler method is used in numerical simulations to implement Particle Size Distribution (PSD). The simulation results show that increasing the vortex finder thickness and blade cross shape width can increase the collection efficiency and reduce the pressure drop value of the new cyclone separator with the best results having a collection efficiency value of 92.03% and a pressure drop value of 194.23 Pa.

Keywords: cyclone, CFD, pressure drop, collection efficiency

Abstrak

Cyclone separator dapat digunakan untuk memisahkan fasa solid dan gas serta dapat mengklasifikasikan partikel berdasarkan ukuran. Terdapat banyak parameter geometris dan operasional yang mempengaruhi kinerja cyclone, salah satunya modifikasi geometri untuk memperoleh kinerja yang lebih efisien. Pada penelitian ini ditambahkan blade cross shape pada vortex finder dengan variasi lebar 0 mm, 5 mm, dan 10 mm, vortex finder thickness di variasikan dengan ukuran 1 mm, 5 mm, 10 mm, dan 15 mm. Kedua variasi ini disimulasikan dengan menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap medan aliran dan peforma yang terjadi pada new cyclone separator. Reynold stress model (RSM) digunakan untuk mensimulasikan aliran yang terjadi. Pendekatan Eulerian-Lagrangian digunakan untuk memprediksi pergerakan partikel pada new cyclone. Metode Rosin-Rammler digunakan dalam simulasi numerik untuk menerapkan Particle Size Distribution (PSD). Hasil simulasi menyatakan bahwa bertambahnya vortex finder thickness dan lebar blade cross shape dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan dan menurunkan nilai pressure drop new cyclone separator dengan hasil terbaik memiliki nilai efisiensi pengumpulan sebesar 92,03% dan nilai pressure drop sebesar 194.23 Pa.

Kata kunci: cyclone, CFD, pressure drop, efisiensi pengumpulan

1. Pendahuluan

Sebagai alat yang penting dalam pemisahan antara fasa solid dan gas, *cyclone separator* banyak digunakan karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya operasi dan perawatan yang rendah, serta memiliki efisiensi yang tinggi [1]. Ketika fasa campuran memasuki *cyclone*, fasa tersebut akan bergerak memutar dan membentuk *outer vortex region* (*quasi-free vortex*) sehingga fasa padat akan terpisah dari *cyclone* dan terkumpul di bagian bawah, sedangkan fasa gas akan keluar melalui *outlet* dan membentuk *inner vortex* (*quasi-forced vortex*) [2].

Kinerja dari suatu *cyclone* dinilai dari efisiensi pengumpulan partikel dan *pressure drop*. Terdapat banyak parameter geometris dan operasional yang mempengaruhi kinerja *cyclone*. Banyak kajian eksperimental maupun numerikal telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari suatu *cyclone* dengan mengevaluasi efek dari parameter geometris dan operasional *cyclone*. *Cyclone separator* memiliki beberapa geometri utama, salah satunya adalah *vortex finder* yang sangat berpengaruh terhadap aliran di dalam *cyclone separator* [3]. Banyak peneliti sudah mengkaji tentang efek dari perubahan dimensi dan perubahan bentuk *vortex finder* terhadap performa *cyclone separator* [4]–[6]. Namun, menurut Pei, dkk memvariasikan dimensi dan bentuk *vortex finder* tidak dapat menaikkan efisiensi pengumpulan serta menurunkan nilai *pressure drop* secara bersamaan [7].

Kemudian Karagoz dkk. pada penelitiannya mempresentasikan desain *cyclone* yang berbeda yaitu *new cyclone separator* yang didasarkan pada gagasan untuk meningkatkan efisiensi *cyclone* dengan meningkatkan panjang *vortex* [8]. Perbedaan terletak pada ruang pemisahan yang terdiri dari silinder luar dan pembatas pusaran (*vortex limiter*). Safikhani dan Mehrabian melakukan kajian numerik pada *new cyclone separator* [2]. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan meningkatkan diameter *new cyclone* akan menurunkan nilai *pressure drop*.

Kerumitan pola aliran pada *cyclone* telah lama menjadi banyak masalah dalam kajian secara eksperimental dan teoritis. Untuk mempermudah dalam proses analisis, simulasi numerik dapat digunakan untuk menghemat biaya desain dan optimasi. Metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*) memiliki potensi besar untuk memprediksi karakteristik aliran [9], dan lintasan partikel di dalam *cyclone separator*, kemudian mulai muncul sejumlah penelitian secara numerik menggunakan metode komputasi. Kaya dan Karagoz juga melakukan penelitian untuk membandingkan berbagai skema numerik yang digunakan untuk mensimulasikan *cyclone separator* [10].

CFD dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui pengaruh parameter tebal *vortex finder* dan penambahan *blade cross shape* di dalam *vortex finder*. Setelah hasil simulasi di dapatkan, kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi terhadap kecepatan tangensial, tekanan statis, penurunan tekanan, dan efisiensi pengumpulan partikel pada *new cyclone separator*.

2. Metode Penelitian

2.1 Persamaan Umum

Ada sejumlah metode yang tersedia didalam CFD untuk memodelkan aliran yang berputar pada *cyclone*. Diantaranya model k-e sampai model turbulensi yang paling teliti yaitu *Reynold Stress Model* (RSM). RSM memodelkan persamaan *Navier-Stokes* (*Reynolds-average*) dengan menyelesaikan persamaan perpindahan untuk tegangan *Reynolds* bersama dengan persamaan laju disipasi. Standar k-e, RNG k-e dan Realizable k-e model tidak cocok untuk aliran dengan pusaran yang cepat seperti pada *cyclone separator* [11]. Baik standar k-e dan RNG k-e model turbulensinya menghasilkan distribusi yang tidak realistis untuk profil kecepatan aksial (aliran ke atas mendekati dinding) [12]. Hanya model turbulensi RSM dianggap sesuai untuk simulasi aliran *cyclon* [10]. RSM dapat menghasilkan prediksi dengan akurat untuk aliran yang kompleks karena RSM mampu menghitung efek dari kurva garis alir, pusaran, dan perubahan pada aliran dengan lebih teliti daripada model dengan dua persamaan.

Pada RSM, persamaan transportasi ditulis menurut persamaan 1.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = D_{T,ij} + P_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + S \quad (1)$$

Kedua persamaan di bagian kiri adalah turunan terhadap waktu dari tegangan dan persamaan transpor konvektif, sedangkan untuk empat persamaan di bagian kanan dirumuskan menurut persamaan 2 hingga persamaan 5.

$$\text{Persamaan } \textit{turbulent diffusion} : D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)} \right] \quad (2)$$

$$\text{Persamaan } \textit{stress production} : P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

$$\text{Persamaan } \textit{pressure strain} : \phi_{ij} = \overline{p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (4)$$

$$\text{Persamaan } \textit{dissipasi} : \varepsilon_{ij} = -2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad (5)$$

Persamaan sumber : S

dimana μ merupakan viskositas molekuler dan p adalah tekanan.

Ada dua pendekatan utama untuk pemodelan arus multifasa yang menjelaskan interaksi antar fase, diantaranya adalah pendekatan *Eulerian-Eulerian* dan *Euler-Lagrangian*. Pada penelitian ini menggunakan penyelesaian aliran dua fasa dengan pendekatan *Eulerian-Lagrangian* untuk memprediksi pelacakan partikel dalam *cyclone*. Dalam model pendekatan ini, udara sebagai fasa kontinu dan partikel sebagai fase diskrit terdispersi. Gerakan partikel disimulasikan dengan prosedur analisis lintasan *Lagrangian*, sedangkan persamaan *Navier-Stokes* pada fase gas. Gaya yang bekerja pada partikel meliputi *drag* dan gravitasi.

Lintasan partikel dalam suatu aliran dihitung menggunakan *discrete phase model* (DPM) untuk melacak partikel secara individu. Karena konsentrasi partikel padatan sangat kecil dalam *cyclone*, interaksi antar partikel diabaikan. Dengan asumsi tidak adanya difusi, gerakan masing-masing partikel dapat langsung dihitung dengan menggunakan persamaan gerak, hanya mempertimbangkan *drag force*. Hal ini diasumsikan bahwa setiap partikel bulat dan tidak

berputar, interaksi partikel dapat diabaikan dan partikel tidak mempengaruhi medan aliran fluida (*one-way coupling*). Sehingga persamaan gerak partikel dapat ditulis menurut persamaan 6 dan persamaan 7 [13]:

$$\frac{dx_p}{dt} = \vec{u}_p \tag{6}$$

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_d(\vec{u} - \vec{u}_p) + \vec{g}_x \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \tag{7}$$

Kecepatan fluida (\vec{u}), kecepatan partikel (\vec{u}_p), x_p adalah posisi partikel, \vec{g}_x adalah gaya gravitasi, ρ adalah densitas fluida dan ρ_p adalah densitas partikel. Dan istilah $F_d(\vec{u} - \vec{u}_p)$ adalah gaya drag per satuan massa partikel.

2.2 Model CFD

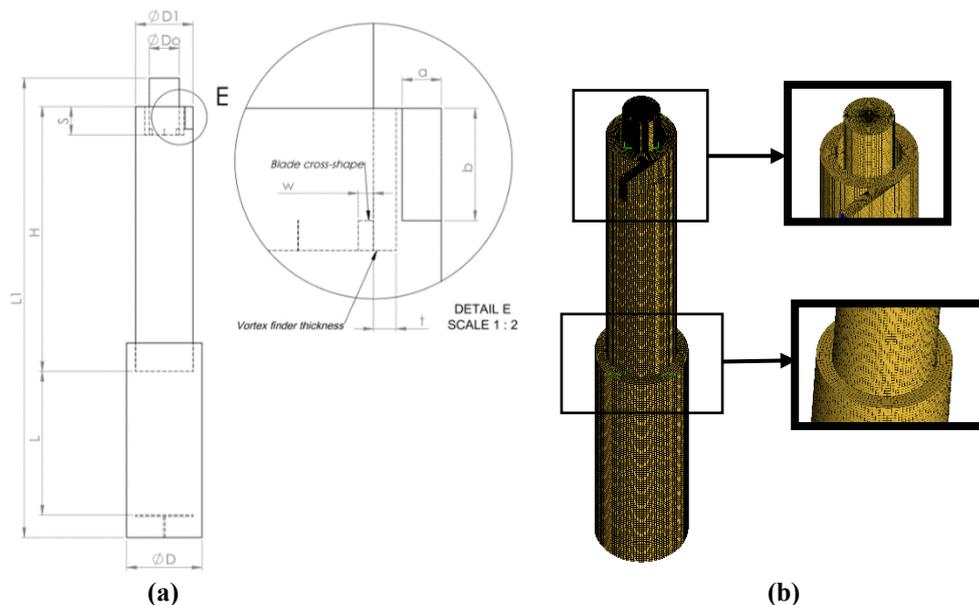
New cyclone separator memiliki *vortex limiter* serta silinder bagian dalam dan silinder bagian luar sebagai pengganti bentuk kerucut untuk membentuk *vortex* seperti pada Gambar 1. Aliran masuk ke dalam *cyclone* secara tangensial dan bergerak spiral ke silinder bagian bawah melalui silinder luar kemudian aliran membentur *vortex limiter* sehingga menyebabkan aliran beserta partikel yang berukuran kecil bergerak kembali ke atas berlawanan arah melalui bagian pusat aliran yang bertekanan rendah menuju keluar *cyclone*. Sedangkan karena adanya gaya sentrifugal maka partikel yang berukuran lebih besar akan terlempar menuju dinding dan terkumpul di bagian bawah silinder luar *cyclone*. Ukuran dimensi *new cyclone separator* pada penelitian ini seperti pada Tabel 1.

Persamaan-persamaan pembangun diselesaikan secara numerik menggunakan ANSYS *Fluid Flow* (FLUENT) 16.0. Skema SIMPLEC digunakan untuk *pressure-velocity coupling* karena lebih mudah dalam mencapai konvergen. Simulasi dijalankan sampai konvergen pada setiap *time step* dengan akurasi 10^{-5} untuk semua parameter. Pada DPM, jumlah maksimum langkah yang ditetapkan adalah 10^7 dan toleransi pelacakan partikel dibatasi sampai $1e-6$ [14].

Kondisi batas yang dipilih pada bagian *inlet* adalah *velocity inlet* dan *outflow* untuk bagian *outlet*. Kondisi batas *wall* dipilih pada bagian dinding *cyclone* dan dinding bawah untuk pengumpulan partikel. Kecepatan masuk yang digunakan adalah 15 m/s dengan nilai *mass loading* 0.00025 kg/s. Untuk mendapatkan efisiensi pengumpulan partikel, pendistribusian partikel di injeksi pada bagian *inlet cyclone*. Efisiensi pengumpulan partikel ditentukan pada persamaan 8 sebagai berikut [15].

$$\eta_t = \frac{N_{inject} - N_{escape}}{N_{inject}} \times 100 \tag{8}$$

Dimana N_{escape} merupakan partikel yang keluar melalui *vortex finder cyclone* dan N_{inject} adalah jumlah banyaknya partikel yang masuk ke dalam *cyclone*. Berbagai metode digunakan untuk menyajikan distribusi ukuran partikel. Salah satunya adalah distribusi *Rosin-Rammler* yang digunakan untuk metode *Particle Size Distribution* (PSD). Nilai diameter partikel pada penelitian ini antara 0.1 μm sampai 134 dengan \bar{d} dan n sebesar 44.4 μm dan 1.68 μm [2].



Gambar 1. (a) Desain *new cyclone separator*, (b) Struktur *mesh*

Tabel 1 Dimensi *cyclone*

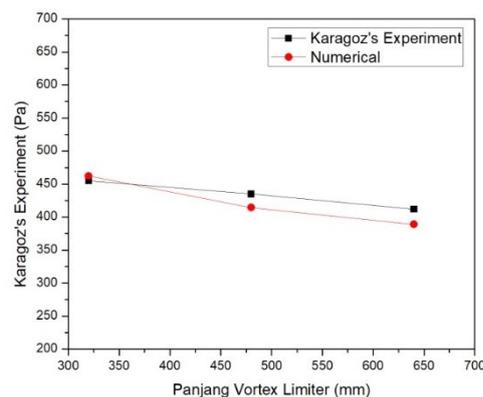
Geometri	Dimensi (mm)
Diameter sillinder, D1	190
Diameter <i>body</i> , D	250
Diameter <i>vortex finder</i> , Do	100
Tebal <i>vortex finder</i> , t	1, 5, 10, 15
Dimensi <i>inlet</i> , a×b	26 x 75
Lebar <i>blade cross-shape</i> , w	0, 15, dan 10
Tinggi silinder, H1	885
Posisi <i>vortex limiter</i> , H2	480
Panjang <i>vortex finder</i> dalam, S	95
Panjang <i>cyclone</i> , L	1535

Mesh dibuat menggunakan ICEM CFD yang telah terkonfigurasi dengan perangkat lunak ANSYS. Dalam pembuatan *grid*, *cyclone* dibagi ke beberapa *blocking* tipe O-*grid*. *Blocking* dalam ICEM CFD merupakan proyeksi *mesh* dari suatu permukaan benda. *Blocking* yang telah dibuat akan menjadi acuan ICEM CFD untuk membentuk *grid* yang telah ditetapkan. Suatu *grid* harus memenuhi nilai kualitas *grid* yang baik. 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. Gambar 1b, menunjukkan struktur *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Perolehan hasil simulasi numerik harus dibuktikan kebenarannya melalui validasi dengan data eksperimen pada kondisi yang sama. Hasil simulasi pada penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Karagoz dkk. [8].



Gambar 2. Perbandingan nilai *pressure drop* hasil eksperimen dengan hasil eksperimen

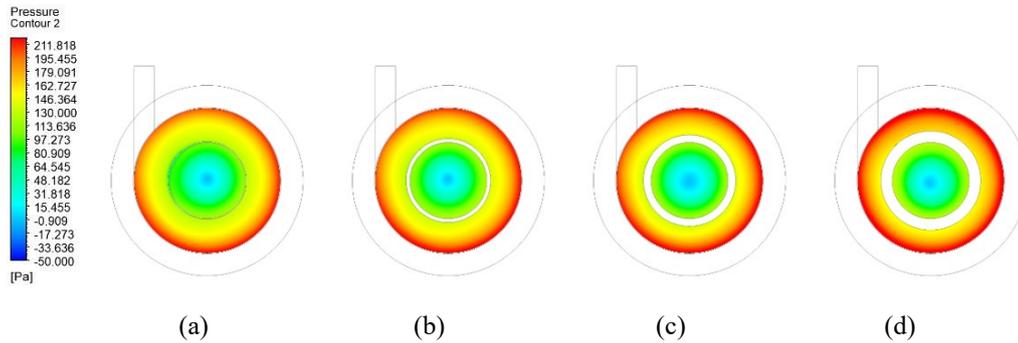
Validasi dilakukan dengan membandingkan penurunan tekanan yang terjadi. Penurunan tekanan didapat dari selisih tekanan statis pada bagian *inlet* dan *outlet*. Gambar 2 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dan didapat nilai error kurang dari 10%.

3.2 Pengaruh Blade Cross Shape pada Vortex Finder dan Vortex Finder Thickness terhadap Medan Aliran

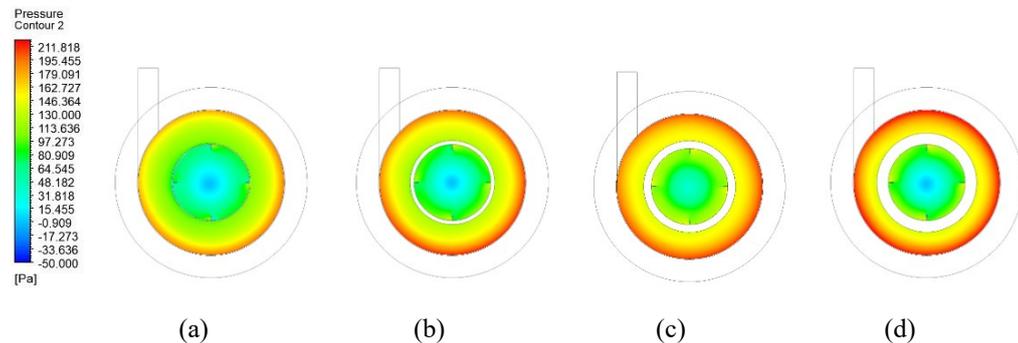
Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah menambahkan *blade cross shape* pada *vortex finder* dengan variasi lebar $w=0$ mm, $w=5$ mm, dan $w=10$ mm. Dan variasi kedua adalah variasi geometri *vortex finder thickness* dengan variasi $t=1$ mm, $t=5$ mm, $t=10$ mm, dan $t=15$ mm.

3.2.1 Tekanan Statis

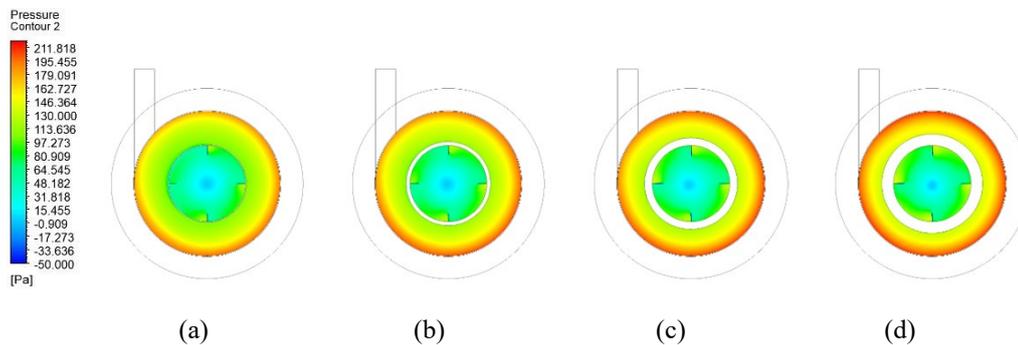
Kontur tekanan statis pada bidang bidang XZ dengan kordinat $y = -0.19$ m. pada Gambar 3 sampai Gambar 5 menunjukkan tekanan statis yang terbesar terdapat pada bagian dinding dari *cyclone*. Dapat dilihat juga bahwa semakin besar *thickness*, maka semakin besar tekanan statis yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena daerah vortex luar semakin kecil ketika *thickness* semakin besar. Nilai tekanan statis akan semakin besar dengan bertambahnya ukuran *thickness* dan mencapai nilai maksimum pada $t = 15$ mm. Hal ini mengakibatkan *pressure drop* terbesar terdapat pada *cyclone* yang memiliki *thickness* 15 mm [16].



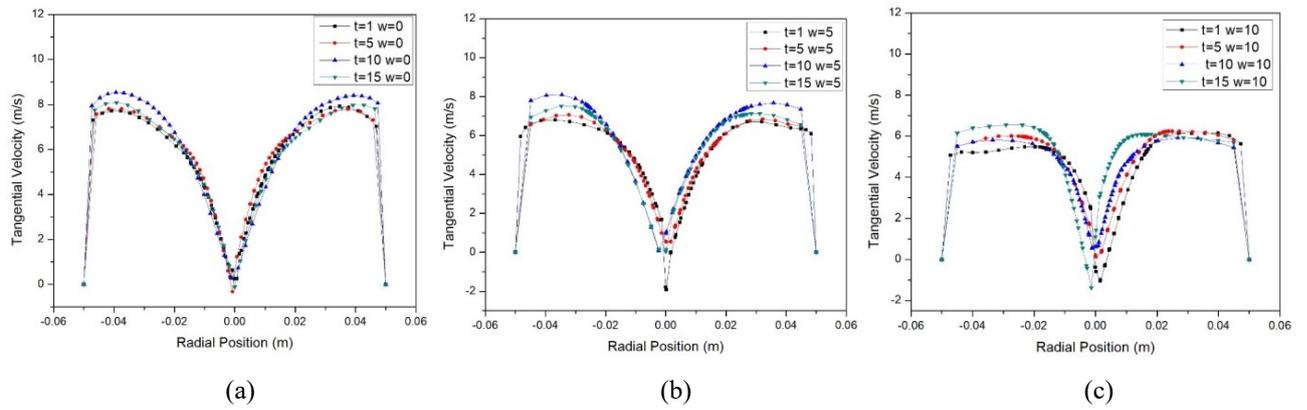
Gambar 3. Kontur tekanan statis pada *blade cross shape* $w = 0$ mm dengan variasi *vortex finder thickness* (a) $t = 1$ mm, (b) $t = 5$ mm, (c) $t = 10$ mm, (d) $t = 15$ mm.



Gambar 4. Kontur tekanan statis pada *blade cross shape* $w = 5$ mm dengan variasi *vortex finder thickness* (a) $t = 1$ mm, (b) $t = 5$ mm, (c) $t = 10$ mm, (d) $t = 15$ mm.



Gambar 5. Kontur tekanan statis pada *blade cross shape* $w = 10$ mm dengan variasi *vortex finder thickness* (a) $t = 1$ mm, (b) $t = 5$ mm, (c) $t = 10$ mm, (d) $t = 15$ mm.



Gambar 6. Pengaruh variasi *vortex finder thickness* terhadap kecepatan tangensial pada *blade cross shape* dengan ukuran (a) tanpa *blade*, (b) 5 mm, dan (c) 10 mm

3.2.2 Kecepatan Tangensial

Pengaruh *vortex finder thickness* terhadap kecepatan tangensial ditunjukkan oleh Gambar 6 pada titik dan $y = -0.05$ m. Kecepatan tangensial mempengaruhi kecepatan pada pusaran inti *cyclone* dan mempunyai nilai maksimum di batas antara zona dalam dan luar vortex. Sedangkan untuk *vortex finder thickness* yang semakin besar, kecepatan tangensial cenderung bertambah besar. Namun mencapai titik tertinggi pada saat *vortex finder thickness* berukuran 10 mm, setelah itu kecepatan tangensial cenderung turun pada saat *vortex finder thickness* berukuran 15 mm.

3.3 Pengaruh Blade Cross Shape pada Vortex Finder dan Vortex Finder Thickness terhadap Peforma Cyclone Separator

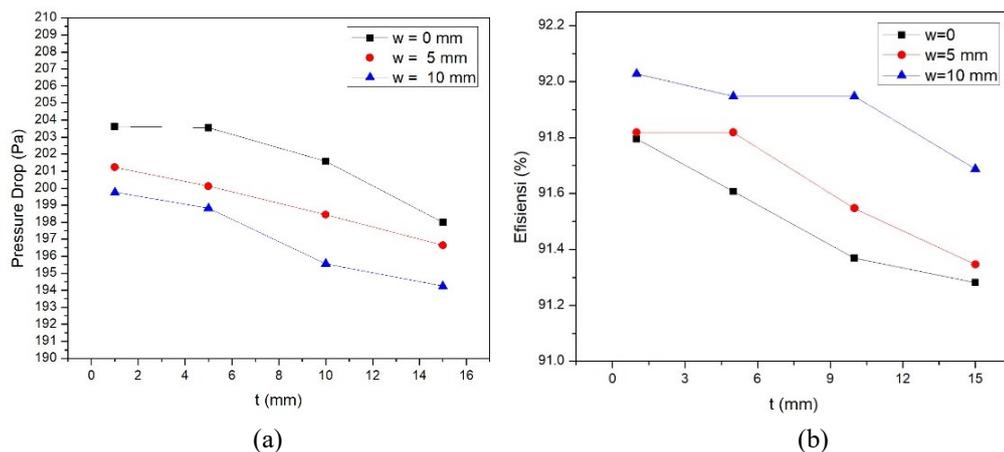
Ada beberapa parameter untuk menunjukkan performa suatu *cyclone*. Diantaranya adalah *pressure drop* dan efisiensi *cyclone*. Pada sub bab ini akan membahas mengenai kedua parameter tersebut.

3.3.1 Pressure Drop

Penurunan tekanan merupakan parameter yang sangat penting pada *cyclone*. Karena semakin besarnya penurunan tekanan pada *cyclone* maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk *cyclone* tersebut sehingga menjadi kurang efisien. Penurunan tekanan didapat dari selisih tekanan statis pada bagian *inlet* dan *outlet* seperti pada persamaan 9.

$$\Delta P = p_{in} - p_{out} \quad (9)$$

Gambar 7a menunjukkan efisiensi hasil simulasi dengan beberapa variasi *blade cross shape* pada *vortex finder* dan *vortex finder thickness*. Dapat dilihat bahwa semakin besar *vortex finder thickness* menyebabkan *pressure drop* semakin menurun, begitu juga sebaliknya. Hal ini karena tekanan statik terkecil terdapat pada *cyclone* yang memiliki *thickness* paling besar. Sehingga nilai *pressure drop cyclone* dengan $t=15$ tersebut memiliki nilai yang paling kecil. Selain itu, variasi lebar pada *blade cross shape* pada *vortex finder* juga memiliki pengaruh terhadap *pressure drop cyclone*. Jika lebar *blade cross shape* semakin besar, maka *pressure drop* akan turun. Begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan *blade cross shape* pada *vortex finder* dapat merubah inti vortex dalam pada *vortex finder*. Semakin kecil diameter inti vortex, maka akan menghasilkan *pressure drop* yang semakin kecil [7].



Gambar 7. (a) Grafik penurunan tekanan, (b) Grafik efisiensi pengumpulan partikel

3.3.2 Efisiensi

Pemisahan partikel salah satunya dipengaruhi oleh besar kecilnya ukuran partikel. Partikel pada *cyclone* akan berpisah keluar melalui *vortex finder* atau menuju daerah dekat dinding dan akan terkumpul di bagian bawah *cyclone*. Pada penelitian ini, pengaruh variasi konfigurasi vortex finder terhadap pemisahan partikel dibahas dalam bentuk efisiensi pemisahan partikel dan pengumpulan partikel. Untuk mendapatkan efisiensi pemisahan partikel dan pengumpulan partikel, pendistribusian partikel di injeksi pada bagian *inlet cyclone*.

Gambar 7b menunjukkan efisiensi hasil simulasi dengan beberapa variasi *blade cross shape* pada *vortex finder* dan *vortex finder thickness*. Nilai efisiensi tertinggi terdapat pada variasi $t=1$ mm dan $w=10$ mm sebesar 92,03%. Dapat dilihat bahwa semakin besar variasi *vortex finder thickness* yang digunakan akan menyebabkan efisiensi pengumpulan partikel semakin turun. *Vortex finder thickness* yang semakin besar menyebabkan *short circuit flow* semakin nyata. Sehingga partikel yang keluar melalui *vortex finder* akan bertambah [17]. Untuk variasi lebar *blade cross shape* pada *vortex finder*, efisiensi pengumpulan partikel akan meningkat dengan bertambahnya lebar *blade cross shape* pada *vortex finder*.

Bertambahnya lebar *blade cross shape* pada *vortex finder* menyebabkan nilai kecepatan tangensial pada *vortex finder* semakin kecil, namun partikel yang keluar melewati *vortex finder* akan berkurang karena daerah tekanan statis yang bernilai rendah juga semakin kecil. Sehingga partikel yang jatuh ke *dustbin* akan semakin banyak [7].

4. Kesimpulan

Simulasi numerik pada penelitian ini menggunakan RSM pada Fluent untuk mendeskripsikan aliran yang terjadi pada *new cyclone separator* dengan variasi tebal *vortex finder* dan penambahan *blade cross-shape* di dalam *vortex finder*. Berdasarkan hasil simulasi, variasi lebar *blade cross shape* pada *vortex finder* mengakibatkan perubahan pada medan aliran. Meningkatnya lebar *blade* menyebabkan kecepatan tangensial pada *vortex finder* akan berkurang, dan daerah tekanan rendah akan berkurang.

Berubahnya medan aliran pada *cyclone* dapat berpengaruh kepada performa *cyclone*. Menurunnya kecepatan tangensial pada *vortex finder* akan mengakibatkan tekanan statis pada *vortex finder* menurun, sehingga nilai *pressure drop cyclone* tersebut akan berkurang dan menurunnya kecepatan aksial didalamnya mengakibatkan partikel yang bergerak ke atas lalu keluar melalui *vortex finder* juga berkurang, sehingga efisiensi pengumpulan *cyclone* akan meningkat.

Daftar Pustaka

- [1] Demir, S., Karadeniz, A., Aksel, M., 2016, "Effects Of Cylindrical And Conical Heights On Pressure And Velocity Fields In Cyclones," Powder technology, 295: 209–217.
- [2] Safikhani, H., Mehrabian, P., 2016, "Numerical Study Of Flow Field In New Cyclone Separators," Advanced Powder Technology, 27(2): 379–387.
- [3] Lim, K.S., Kim, H.S., Lee, K.W., 2004, "Characteristics Of The Collection Efficiency For A Cyclone With Different Vortex Finder Shapes," Journal of Aerosol science, 35(6): 743–754.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ficici, F., Ari, V., Kapsiz, M., 2010, "The Effects Of Vortex Finder On The Pressure Drop In Cyclone Separators," International Journal of Physical Sciences, 5(6): 804–813.
- [7] Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X., Wang, B., 2017, "The Effect Of Cross-Shaped Vortex Finder On The Performance Of Cyclone Separator," Powder Technology, 313: 135-144.
- [8] Karagoz, I., Avci, A., Surmen, A., Sendogan, O., 2013, "Design And Performance Evaluation Of A New Cyclone Separator," Journal of Aerosol Science, 59: 57–64.
- [9] Yohana, E., Yudianto, B., Hunadika, R.P., Bahar, S., Muhammad, A.A., 2017, "CFD Analysis Of Temperature Distribution And Relative Humidity In Humidifying Sample House With Liquid Desiccant Concentration Of 50% And Temperature Of 10 C," Advanced Science Letters, 23(3): 2243–2245.
- [10] Kaya, F., Karagoz, I., 2008, "Performance Analysis Of Numerical Schemes In Highly Swirling Turbulent Flows In Cyclones," Current science, 1273–1278.
- [11] Wan, G., Sun, G., Xue, X., Shi, M., 2008, "Solids Concentration Simulation Of Different Size Particles In A Cyclone Separator," Powder Technology, 183(1): 94–104.
- [12] Elsayed, K., 2015, "Optimization Of The Cyclone Separator Geometry For Minimum Pressure Drop Using Co-Kriging," Powder Technology, 269: 409-424.
- [13] Jayaraju, S.T., 2009, "Study Of The Air Flow And Aerosol Transport In The Human Upper Airway Using LES And DES Methodologies," Vrije Universiteit Brussel.
- [14] Sun, X., Kim, S., Yang, S.D., Kim, H.S., Yoon, J.Y., 2017, "Multi-Objective Optimization Of A Stairmand Cyclone Separator Using Response Surface Methodology And Computational Fluid Dynamics," Powder Technology, 320: 51–65.

- [15] Feng, J., Chen, W., Wang, L., Peng, X., 2020, "*Separation Performance Of New Type Of Multi-Stage Axial Cyclone Used As Demister In Power Plant Emission System*," Journal of Dispersion Science and Technology, 41(11): 1643–1656.
- [16] Elsayed, K., Lacor, C., 2010, "*The Effect Of Vortex Finder Diameter On Cyclone Separator Performance And Flow Field*," In ECCOMAS CFD Conf., JCF Pereira and A. Sequeira (Eds.) Lisbon.
- [17] Wang, B., Yu, A.B., 2008, "*Numerical Study Of The Gas–Liquid–Solid Flow In Hydrocyclones With Different Configuration Of Vortex Finder*," Chemical Engineering Journal, 135(1–2): 33–42.