

PERBANDINGAN KINERJA PADA PRARANCANGAN GAS CYCLONE DENGAN KONFIGURASI 2D2D DAN 1D3D PADA PABRIK PUPUK

¹Diana Rachmawati*, ¹Shobir Juntri Yoga, ¹Rosita Dwi Chrisnandari, ¹May Kurnia Pratiwi, ¹Profiyanti Hermien Suharti, ¹Asalil Mustain

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

*Penulis korespondensi: diana.rachmawati@polinema.ac.id

Abstrak. *Dust collector merupakan alat pengendali debu yang berfungsi menghisap udara berdebu dari peralatan proses melalui sistem perpipaan, kemudian memisahkan partikel debu dari aliran udara menggunakan separator. Pada unit produksi pupuk hayati berbahan baku zeolit granule di salah satu pabrik pupuk kimia, sistem dust collector yang digunakan adalah tipe wet scrubber sebagai separator. Sistem ini menyebabkan debu zeolit yang terhisap menjadi basah dan membentuk limbah sludge yang sulit dimanfaatkan kembali. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan prarancangan dry separator tipe cyclone sebagai pengganti sistem wet agar debu zeolit tetap kering, dapat dipisahkan secara efisien, sehingga dapat dimanfaatkan kembali dalam proses produksi, dan akan mengurangi limbah. Variabel tetap penelitian meliputi viskositas udara, diameter partikel, densitas partikel, dan densitas fluida, sedangkan variabel bebas adalah konfigurasi cyclone (2D2D dan 1D3D) serta kecepatan gas masuk. Dimensi cyclone dihitung dengan model Lapple. Hasil menunjukkan konfigurasi 2D2D memiliki collection efficiency lebih tinggi dan cut-off diameter lebih kecil dengan pressure drop sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi 1D3D. Namun, pressure drop kedua konfigurasi masih berada dalam rentang operasi cyclone tipe high-throughput yang diperbolehkan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan cyclone 2D2D berpotensi menjadi alternatif yang lebih efektif dan berkelanjutan bagi sistem pengendalian debu zeolite di industri pupuk PT. X karena mampu memberikan performa pemisahan yang lebih efektif dengan pressure drop yang masih masuk pada rentang yang diperbolehkan.*

Kata kunci: cyclone, dust collector, 2D2D, 1D3D

Abstract. A dust collector is an air pollution control device designed to remove particulate matter from industrial processes by drawing dust-laden air from process equipment through a ducting system and separating the particles from the air stream. In the biofertilizer production unit at a chemical fertilizer plant that uses zeolite granules as the raw material, the existing dust collection system uses a wet scrubber as the separator. This system causes the collected zeolite dust to become wet, generating sludge waste that is difficult to reuse in the production process. To solve this problem, a dry cyclone separator was designed to replace the existing wet system. This design enables zeolite dust to be collected in a dry state, recovered for reuse in the production process, and reduces sludge waste generation. The fixed variables included air viscosity, particle diameter, particle density, and fluid density, while the independent variables were cyclone configuration (2D2D and 1D3D) and inlet gas velocity. The cyclone dimensions were calculated using the Lapple design method. The results showed that the 2D2D configuration achieved higher collection efficiency and a smaller cut-off diameter, with a slightly higher pressure drop than the 1D3D configuration. However, the pressure drop of both configurations remained within the allowable operating range for high-throughput cyclones. These results indicate that the 2D2D cyclone has the potential to serve as a more effective and sustainable alternative for zeolite dust control systems in the fertilizer industry at PT. X, as it provides more effective particle separation while maintaining a pressure drop within the allowable range.

Keywords: cyclone, dust collector, 2D2D, 1D3D

1. Pendahuluan

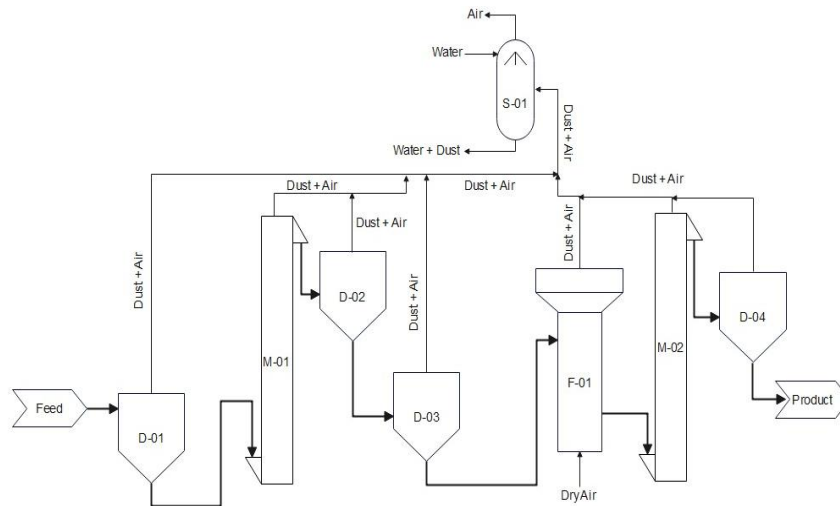
Industri pupuk memiliki proses produksi yang kompleks dan terintegrasi untuk menghasilkan berbagai jenis pupuk berkualitas seperti urea, NPK, ZA, dan fosfat (Pupuk Indonesia, 2022). Proses tersebut meliputi sistem produksi yang terintegrasi, melibatkan berbagai unit operasi yang saling mendukung mulai dari pengolahan bahan baku, reaksi kimia, *mixing*, *drying*, *screening*, *conveying*, dan *granulasi* (Marintika, Cundari and Kurniawan, 2023). Tingginya aktivitas penanganan material padat pada pabrik pupuk menyebabkan terbentuknya emisi partikulat atau debu dalam jumlah signifikan, yang tidak hanya berpotensi mengurangi efisiensi proses dan meningkatkan kehilangan bahan baku, tetapi juga dapat menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikendalikan dengan baik (Kanageswari, Tabil and Sokhansanj, 2022). Oleh karena itu, pemilihan sistem dedusting yang tepat menjadi faktor penting, tidak hanya untuk mengendalikan emisi partikulat tetapi juga untuk mendukung pemanfaatan kembali material yang masih bernilai ekonomis.

Salah satu tantangan dalam proses produksi pupuk adalah pengelolaan debu, khususnya pada tahap granulasi yang melibatkan material berbasis zeolit. Tahap granulasi melibatkan intensitas kontak material padat yang tinggi, sehingga berpotensi menghasilkan partikulat halus atau *undersize* dalam jumlah signifikan akibat gesekan antar partikel, pemecahan granula, serta terbawanya fraksi ringan oleh aliran gas proses (Wei *et al.*, 2023). Pada sistem produksi pupuk berbasis zeolit *granule*, partikulat *undersize* yang terbawa aliran gas masih memiliki nilai ekonomis karena dapat dimanfaatkan kembali melalui proses *recycle* atau *regranulasi*, sehingga pengendalian debu tidak hanya berfungsi sebagai upaya pengurangan emisi, tetapi juga sebagai strategi material *recovery* untuk meningkatkan efisiensi produksi.

Sistem *dedusting* seperti *wet scrubber* telah banyak digunakan dalam industri karena efektif menangkap partikulat melalui kontak gas-cair (Wei *et al.*, 2023). Namun, sistem ini memiliki kekurangan berupa pembentukan *sludge*, peningkatan konsumsi air, kebutuhan pengolahan limbah sekunder, serta berkurangnya peluang pemanfaatan ulang material padat karena telah tercampur dengan fase cair (Innocentini *et al.*, 2021). Sebagai alternatif, *dry dedusting* dengan *cyclone separator* memiliki keunggulan berupa desain sederhana, biaya operasi relatif rendah, tidak menghasilkan limbah cair, serta memungkinkan partikulat yang terambil digunakan kembali dalam proses produksi. Pemilihan metode pengendalian debu mempertimbangan kondisi operasi dan karakteristik debu spesifik yang akan dipisahkan agar bisa dimanfaatkan kembali.

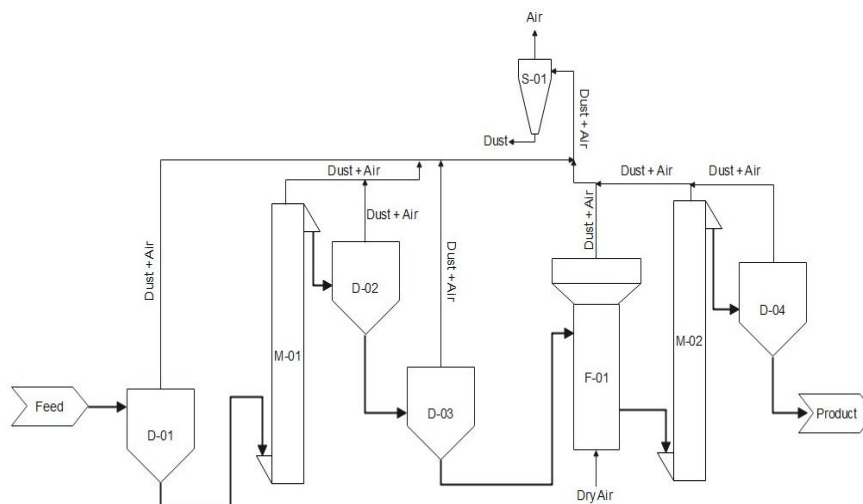
Diagram alir proses *wet dedusting* ditunjukkan pada Gambar 1. Pada proses produksi pupuk hayati, bahan padat berupa padatan zeolite sebagai *carrier* dan bahan lainnya yaitu inokulum bakteri masuk ke proses produksi dan menghasilkan produk pupuk hayati berupa granul. Selama proses penanganan zeolite granul, sebagian material dapat terbawa oleh aliran udara sebagai debu atau fraksi *undersize* zeolit. Pada sistem *wet dedusting*, debu dipisahkan menggunakan *wet scrubber* sehingga bercampur dengan air dan mengakibatkan debu dari *zeolite granule* menjadi limbah *sludge* yang sulit digunakan kembali dan terbuang. Debu dari *zeolite granule* ini merupakan produk *undersize* yang masih bisa dimanfaatkan untuk diregranulasi atau granulasi kembali menjadi bahan baku yaitu *zeolite granule*. Aplikasi proses *dry dedusting* lebih menguntungkan karena *undersize product zeolite granule* dapat dimanfaatkan kembali. Rencana aplikasi proses *dry dedusting* ditunjukkan pada Gambar 2.

Diana Rachmawati, Shobir Juntri Yoga, Rosita Dwi Chrisnandari, May Kurnia Pratiwi, Profiyanti Hermien Suharti, dan Asalil Mustain
diana.rachmawati@polinema.ac.id: Perbandingan Kinerja pada Prarancangan Gas Cyclone dengan Konfigurasi 2D2D dan 1D3D pada Pabrik Pupuk



Gambar 1. Diagram Alir Separator *Wet Scrubbers* pada Produksi Pupuk Hayati Granule di PT. X

Pada proses *dry dedusting*, *cyclone separator* bekerja berdasarkan gaya sentrifugal yang memisahkan partikel dari aliran gas melalui pembentukan vortex, sehingga partikel dengan inersia lebih tinggi terdorong ke dinding separator dan terkumpul pada bagian bawah (Darmanto and Primanto, 2017). Kinerja cyclone separator umumnya dievaluasi berdasarkan dua parameter utama, yaitu *pressure drop* dan *collection efficiency*, yang sangat dipengaruhi oleh parameter geometri seperti diameter body, panjang cone, dimensi vortex finder, serta kecepatan inlet gas (Wójtowicz, Wolak and Wójtowicz-Wrobel, 2020). Model teoritis klasik yang diperkenalkan oleh Lapple menjadi salah satu pendekatan paling awal dan luas digunakan untuk memperkirakan *pressure drop* serta efisiensi pemisahan sebagai dasar prarancangan *cyclone separator*, sebelum dilakukan pengembangan desain yang lebih spesifik sesuai kebutuhan operasi (Bogodage and Leung, 2022).



Gambar 2. Rencana Diagram Alir *Dry Dedusting* dengan Pergantian Unit S-01 Menjadi *Cyclone Separator* di PT. X

Konfigurasi *cyclone separator* 2D2D dan 1D3D merupakan desain yang umum digunakan. Kedua konfigurasi tersebut memiliki karakteristik geometri yang berbeda,

sehingga dapat menghasilkan kinerja pemisahan dan *pressure drop* yang berbeda. Konfigurasi 2D2D cenderung memberikan keseimbangan antara *pressure drop* dan *collection efficiency*, sedangkan 1D3D berpotensi meningkatkan efisiensi pemisahan partikulat halus melalui lintasan vortex yang lebih panjang (Modabberifar, Nazaripoor and Safikhani, 2021). Perbedaan geometri tersebut berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pemisahan, *pressure drop*, serta karakteristik distribusi partikel, sehingga pemilihan konfigurasi menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja pemisahan yang sesuai dengan kondisi operasi.

Berdasarkan uraian di atas, penggunaan *cyclone separator* pada proses *dry dedusting* berpotensi menjadi alternatif pengganti *wet dedusting* pada unit produksi pupuk hayati berbahan baku *zeolite granule*. Penggunaan *cyclone separator* memungkinkan debu zeolit hasil samping tetap kering sehingga dapat dimanfaatkan kembali. Meskipun rancangan konfigurasi *cyclone separator* 2D2D dan 1D3D telah banyak diteliti, pemilihan konfigurasi untuk aplikasi pada industri pupuk PT. X perlu dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi operasi dan karakteristik debu spesifik yang akan dipisahkan. Studi kelayakan dilakukan pada konfigurasi *cyclone separator* 2D2D dan 1D3D menggunakan model Lapple berdasarkan kondisi operasi aktual di PT. X. Kinerja kedua konfigurasi dievaluasi berdasarkan *collection efficiency*, *cut-point diameter*, dan *pressure drop* pada beberapa variasi *inlet velocity*. Hasil evaluasi ini diharapkan dapat memberikan dasar pertimbangan teknis dalam pemilihan konfigurasi *cyclone separator* yang sesuai untuk aplikasi *dry dedusting* di PT. X, dengan mempertimbangkan *collection efficiency* dan *pressure drop*.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi data kondisi operasi pada sistem *dedusting* di PT. X.

Tabel 1. Data Primer

No.	Variabel	Simbol	Satuan	Nilai
Data Primer				
1.	Suhu Operasi	T	°C	26,65
2.	Luas Penampang	A	m ²	1,131
3.	Kecapatan Gas Masuk	v_i	m/s	13,2; 15; 18,3; 21; 23
4.	Kecepatan Volumetrik	Q	m ³ /s	14,92; 16,96; 20,70; 23,75; 26,01
5.	Diameter Partikel	d_p	μm	832; 371; 369; 176; 174; 100; 50; 10; 5; 2,262
6.	Densitas Partikel	ρ_p	kg/m ³	2879
Data Sekunder				
1.	Densitas Udara	ρ_g	kg/m ³	1,1789
2.	Viskositas Udara	μ	kg/m.s	1,853 x 10 ⁻⁵

2.2. Metode

Metode pada penelitian ini adalah penelitian kuantitatif menggunakan model Lapple untuk melakukan prarancangan dan mengevaluasi kinerja cyclone separator berdasarkan kondisi operasi aktual pada sistem wet dedusting di PT. X. Dua konfigurasi cyclone, yaitu 2D2D dan 1D3D, dikaji dengan memvariasikan kecepatan gas masuk. Perhitungan prarancangan cyclone dan evaluasi kinerja dilakukan menggunakan Microsoft Excel. Perhitungan yang digunakan pada prarancang ini meliputi:

Diana Rachmawati, Shobir Juntri Yoga, Rosita Dwi Chrisnandari, May Kurnia Pratiwi, Profiyanti Hermien Suharti, dan Asalil Mustain
diana.rachmawati@polinema.ac.id: Perbandingan Kinerja pada Prarancangan Gas Cyclone dengan Konfigurasi 2D2D dan 1D3D pada Pabrik Pupuk

a. Perhitungan Dimensi *Cyclone*

Perhitungan dimensi *cyclone* diawali dengan mencari diameter *body cyclone* dengan persamaan sebagai berikut (Bashir, 2017) :

$$A = \frac{Q}{V_i} \quad (1)$$

$$H = \sqrt{A} \quad (2)$$

$$D = H \times 2 \quad (3)$$

Dimana:

Q = Kecepatan Volumetrik (m³/s)

V_i = Kecepatan Gas Masuk (m/s)

A = Luas Saluran Masuk Cyclone (m²)

H = Tinggi Saluran Masuk (m)

D = Diameter Body Cyclone (m)

Selanjutnya, dimensi *cyclone* dihitung dengan persamaan pada tabel 2.

Tabel 2. Rasio Dimensi *Cyclone* 2D2D dan 1D3D (Lapple, 1951); (Bashir, 2017)

Dimensi Komponen	Rasio 2D2D	Rasio 1D3D
Panjang <i>Barrel</i>	2D	1D
Panjang <i>Cone</i>	2D	3D
Lebar Saluran Masuk	D/4	D/4
Diameter Keluaran Gas	D/2	D/2
Diameter Keluaran Partikel	D/4	D/4
Panjang <i>Vortex Finder</i>	0.625 D	0.625 D
Panjang <i>Outlet Gas</i>	D/8	D/8
Panjang <i>Cyclone Total</i>	4D	4D

b. Perhitungan *Number of Effective Turn*

Number of Effective Turn (N) menunjukkan jumlah perputaran gas saat di dalam *cyclone* (Lapple, 1951); (Bashir, 2017)

$$N = \frac{1}{H} \left(L_b + \frac{L_c}{2} \right) \quad (4)$$

Dimana:

N = Jumlah Perputaran Fluida L_b = Tinggi Barrel (m or ft)

H = Tinggi Inlet (m or ft) L_c = Tinggi Cone (m or ft)

c. Perhitungan *Cut Point Diameter*

Cut Point Diameter (d_{pc}) menunjukkan diameter terkecil dari partikel yang dapat dipisahkan dari gas oleh *cyclone* dengan *collection efficiency* diatas 50% (Lapple, 1951); (Bashir, 2017).

$$d_p = \left(\frac{9\mu W}{2\pi \cdot N \cdot V_i \cdot (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Dimana:

d_{pc} = *Cut Point Diameter* (μm) V_i = Kecepatan Gas Masuk (m/s)

μ = Viskositas Fluida (kg/m.s) ρ_p = Densitas Partikel (kg/m³)

$$\begin{aligned} W &= \text{Lebar Inlet (m)} & \rho g &= \text{Densitas Fluida (kg/m}^3\text{)} \\ N &= \text{Jumlah Perputaran Gas} \end{aligned}$$

d. Perhitungan *Collection Efficiency*

Collection efficiency (η_j) menunjukkan efisiensi cyclone saat memroses pemisahan partikel dengan ukuran diameter tertentu (Taiwo, Namadi and Mokwa, 2016).

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{pc}}{d_{pj}}\right)^2} \quad (6)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} \eta_j &= \text{collection efficiency (\%)} \\ d_{pc} &= \text{cut point diameter (\mu m)} \\ d_{pj} &= \text{collection efficiency dari partikel pada rentang ukuran } j \text{ (} 0 < \eta_j < 1 \text{)} \end{aligned}$$

e. Perhitungan *Cut Point Correction Factor*

Cut Point Correction Factor ditentukan menggunakan *Geometric Standard Deviation* (GSD), sebagaimana dihitung menggunakan persamaan (7). Selanjutnya, *correction factor* untuk konfigurasi cyclone 1D3D dan 2D2D diperkirakan menggunakan persamaan (8) dan (9) (Hsiao *et al.*, 2015); (Wang *et al.*, 2003).

$$GSD = \left(\frac{d_{16}}{d_{84}}\right)^{0.5} \quad (7)$$

$$K_{1D3D} = 5.3 + 0.02 (MMD) - 2.4 (GSD) \quad (8)$$

$$K_{2D2D} = 5.5 + 0.02 (MMD) - 2.5 (GSD) \quad (9)$$

Dimana:

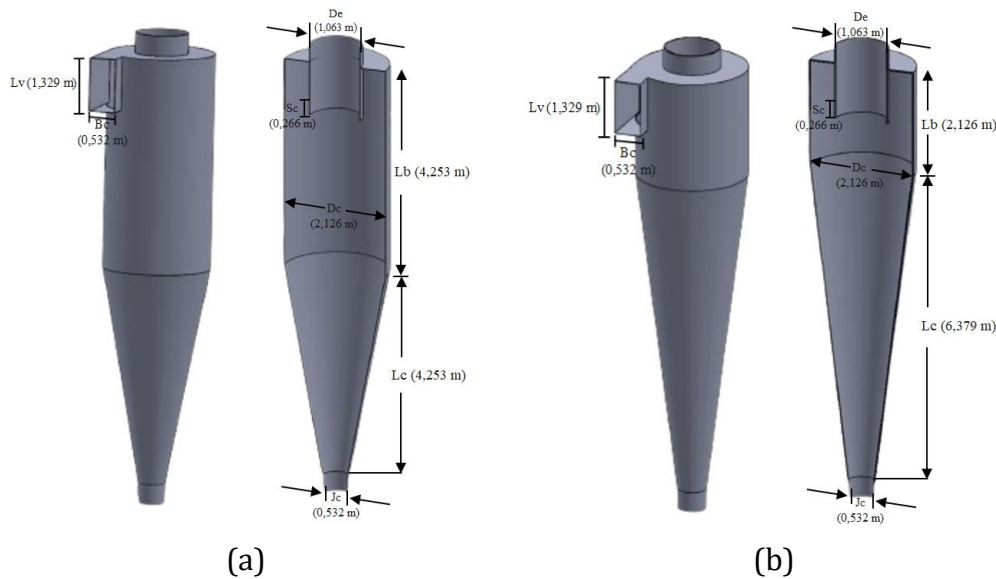
$$\begin{aligned} K_{1D3D} &= \text{faktor koreksi cut-point 1D3D cyclone} \\ K_{2D2D} &= \text{faktor koreksi cut-point 2D2D cyclone} \\ MMD &= \text{mass median diameter (} d_{50} \text{) (\mu m)} \\ GSD &= \text{geometric standard deviation} \\ d_{16} &= \text{diameter partikel pada collection efficiency 16\% (\mu m)} \\ d_{84} &= \text{diameter partikel pada collection efficiency 84\% (\mu m)} \end{aligned}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Dimensi Cyclone

Dimensi cyclone diperoleh dari hasil perhitungan prarancangan berdasarkan rasio geometri pada Tabel 3 ditunjukkan pada Gambar 4. Perhitungan dimensi prarancangan memiliki perbedaan utama pada panjang *barrel* (Lb) dan panjang *cone* (Lc). Pada konfigurasi 2D2D, panjang *barrel* dan *cone* adalah dua kali diameter cyclone (2D), sehingga menghasilkan proporsi geometri yang lebih seimbang antara zona pembentukan *vortex* dan zona pemisahan partikel. Geometri ini diharapkan dapat menghasilkan aliran tangensial yang lebih stabil serta mempertahankan gaya sentrifugal selama proses pemisahan (Hsiao *et al.*, 2015). Sebaliknya, konfigurasi 1D3D memiliki *barrel* yang lebih pendek dan *cone* yang lebih panjang. Meskipun *cone* yang lebih panjang secara teoritis meningkatkan *particle residence time* di dalam cyclone, perubahan geometri tersebut juga dapat meningkatkan kehilangan momentum aliran pada bagian bawah cyclone akibat

penyempitan penampang *cone* yang lebih panjang (Modabberifar, Nazaripoor and Safikhani, 2021). Oleh karena itu, perbedaan geometri tersebut memengaruhi distribusi tekanan internal, karakteristik vortex, serta pola pergerakan partikel menuju *dust outlet* (Ayli and Kocak, 2025).

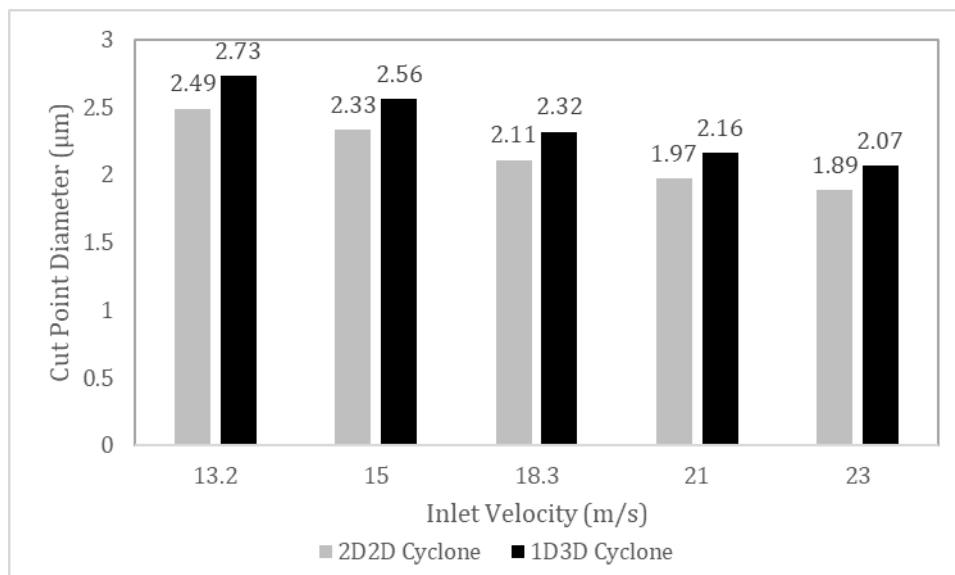


Gambar 4. Dimensi *Cyclone* dengan skala 1:120; (a) konfigurasi 2D2D; (b) konfigurasi 1D3D

Secara desain, perbedaan rasio L_b/L_c menunjukkan bahwa efektivitas cyclone tidak hanya dipengaruhi oleh total panjang alat, tetapi juga oleh bentuk geometri cyclone dalam mengatur pola aliran gas dan pergerakan partikel di dalam separator. Studi (Hsiao *et al.*, 2015) menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi geometrik, khususnya pada *barrel length*, *cone length*, dan *vortex finder*, dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap *cut-point diameter* dan *collection efficiency* karena memengaruhi *residence time* partikel serta intensitas *swirl flow* di dalam separator.

3.2 Cut Point Diameter

Berdasarkan hasil perhitungan, konfigurasi cyclone 2D2D menghasilkan *cut point diameter* yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi 1D3D pada seluruh variasi kecepatan gas inlet. Profil *cut point diameter* dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai *cut point diameter* menunjukkan ukuran partikel di mana sekitar 50% partikel dengan ukuran tersebut berhasil ditangkap cyclone, sementara 50% lainnya masih ikut keluar bersama gas. Hasil perhitungan mengindikasikan bahwa *cyclone* dengan konfigurasi 2D2D memiliki kinerja yang lebih baik dibanding *cyclone* dengan konfigurasi 1D3D. Kondisi ini menunjukkan bahwa perbedaan rasio geometri, khususnya distribusi panjang *barrel* dan *cone*, berpengaruh langsung terhadap karakteristik *vortex* dan gaya sentrifugal yang terbentuk di dalam cyclone, yang selanjutnya memengaruhi nilai *cut point diameter*. Hsiao *et al.* (2015) menyatakan bahwa konfigurasi geometrik cyclone memiliki pengaruh signifikan terhadap *cut size* karena perubahan dimensi internal dapat memodifikasi stabilitas *swirl flow* dan *residence time* partikel di dalam separator (Hsiao *et al.*, 2015).



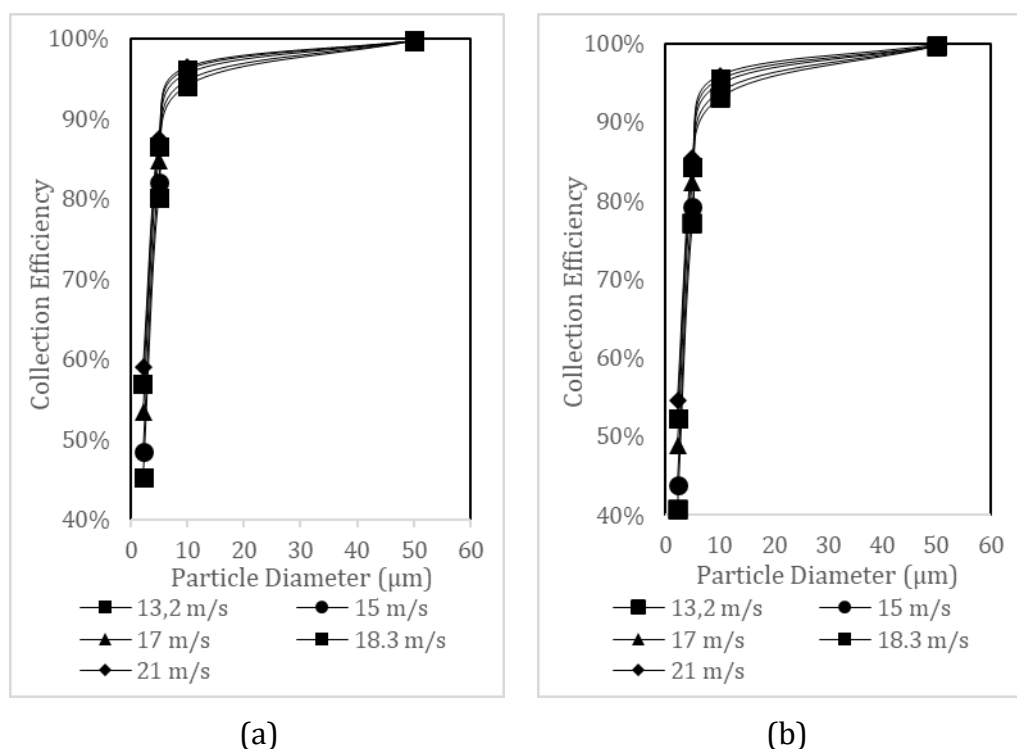
Gambar 5. Diagram Perbandingan Cut Point

Berdasarkan Gambar 5, peningkatan *inlet velocity* dari 13,2 menjadi 23 m/s menurunkan *cut point diameter* pada kedua konfigurasi *cyclone*. Pada seluruh variasi inlet velocity, konfigurasi 2D2D menghasilkan cut point diameter sekitar 8,70–9,05% lebih rendah dibandingkan 1D3D, dengan rata-rata penurunan sebesar 8,86%. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi 2D2D memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memisahkan partikel berukuran lebih kecil berdasarkan parameter *cut-point diameter* pada kondisi operasi yang sama. Selain pengaruh konfigurasi geometri, peningkatan *inlet velocity* juga menyebabkan penurunan *cut point diameter* pada kedua konfigurasi *cyclone*. Penurunan *cut-point diameter* seiring peningkatan *inlet velocity* dapat dikaitkan dengan perubahan karakteristik aliran dan gaya yang bekerja pada partikel di dalam *cyclone* (Vermande Paganel *et al.*, 2024). Semakin tinggi *inlet velocity*, maka gaya sentrifugal yang bekerja pada partikel meningkat, sehingga partikel dengan diameter lebih kecil lebih mudah terdorong menuju dinding *cyclone* dan terpisah dari aliran gas. Azadi & Azadi (2012) menyatakan, kenaikan *inlet velocity* dapat meningkatkan *separation force*, meskipun pada kondisi tertentu juga dapat meningkatkan turbulensi internal dan *pressure drop*. Di sisi lain, peningkatan *inlet velocity* juga memengaruhi *pressure drop* dan *collection efficiency*, sehingga kedua parameter tersebut perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kinerja *cyclone* (Syuriadi *et al.*, 2024).

Hubungan pengaruh geometri dan *inlet velocity* terhadap penurunan *cut point diameter* juga perlu ditinjau dengan mempertimbangkan hasil model prediksi simulasi. Mumcu and Avci (2023), melalui evaluasi sepuluh model matematis terhadap sekitar 400 data eksperimen dari 29 penelitian terdahulu, menunjukkan bahwa ketepatan penentuan *cut point diameter* bergantung pada parameter geometri dan kondisi operasi yang dipertimbangkan dalam masing-masing model. Namun, nilai *cut point diameter* yang lebih rendah antara konfigurasi 2D2D dibandingkan 1D3D tidak selalu sama pada seluruh kondisi operasi. Safikhani *et al.* (2010) membandingkan hasil CFD dan eksperimen pada konfigurasi *cyclone* 1D3D dan 2D2D untuk beberapa distribusi ukuran partikel. Pada kondisi penelitian tersebut, konfigurasi 1D3D menghasilkan *cut point diameter* lebih rendah daripada 2D2D, baik berdasarkan hasil eksperimen maupun CFD. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik partikel, geometri, dan kondisi operasi berpengaruh terhadap kinerja konfigurasi *cyclone* yang berbeda.

3.3 Collection Efficiency

Hasil perhitungan evaluasi *collection efficiency* menunjukkan partikel dengan ukuran $>50 \mu\text{m}$ memiliki *collection efficiency* yang cenderung stabil yaitu $>99\%$. Sedangkan pada diameter partikel ukuran $< 50 \mu\text{m}$ menunjukkan perbedaan *collection efficiency* yang signifikan seperti pada Gambar 6. Grafik menunjukkan bahwa kedua konfigurasi memiliki pola sama, dimana efisiensi meningkat seiring bertambahnya ukuran partikel dan *inlet velocity*. Pada ukuran partikel $>50 \mu\text{m}$, baik cyclone 2D2D maupun 1D3D menunjukkan *collection efficiency* $>99\%$, yang mengindikasikan bahwa kedua desain sama-sama sangat efektif dalam menangkap partikulat kasar. Namun, perbedaan yang lebih signifikan terlihat pada partikel berukuran $<50 \mu\text{m}$, khususnya pada rentang $2\text{--}10 \mu\text{m}$, di mana konfigurasi 2D2D secara konsisten menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan 1D3D. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi geometri 2D2D lebih efektif dalam mempertahankan stabilitas vortex dan gaya sentrifugal untuk meningkatkan peluang pemisahan partikel berukuran kecil, sehingga lebih baik untuk *recovery* debu halus zeolit *undersize*.



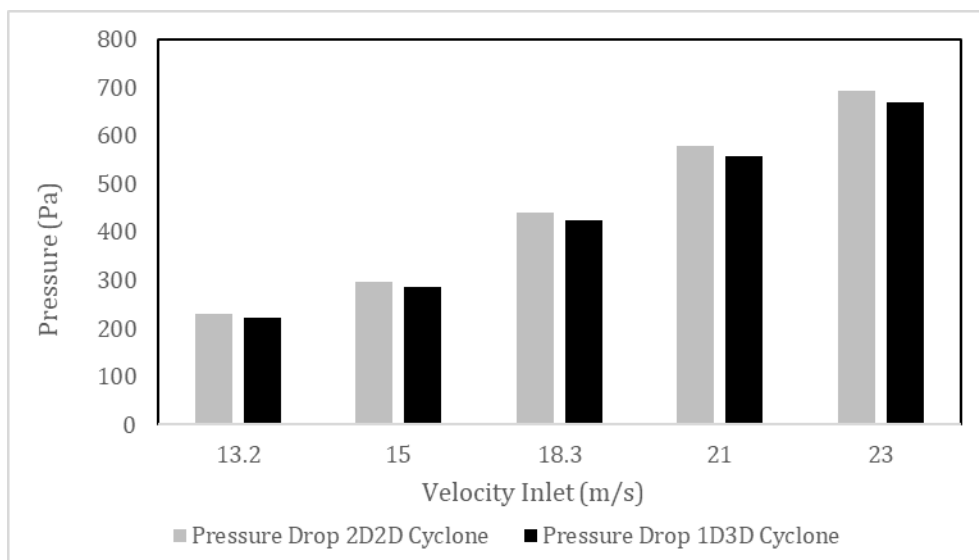
Gambar 6. Grafik *Collection Efficiency Cyclone*; (a) 2D2D; (b) 1D3D
Partikel $\leq 50 \mu\text{m}$ pada Tiap Variasi *Inlet Velocity*

Secara kuantitatif, perbedaan kinerja kedua konfigurasi cyclone terlihat pada partikulat halus pada diameter $< 50 \mu\text{m}$. Pada diameter partikel $2,262 \mu\text{m}$ menghasilkan *collection efficiency* untuk seluruh variasi kecepatan pada range $45,24 - 59,01\%$ pada konfigurasi 2D2D dan $40,77\% - 54,54\%$ pada konfigurasi 1D3D. Rata-rata *collection efficiency* pada konfigurasi 2D2D lebih besar $9,49\%$ dibanding konfigurasi 1D3D. Perbedaan *collection efficiency* tersebut semakin kecil pada diameter partikel yang lebih besar, karena kedua konfigurasi telah mencapai *collection efficiency* lebih dari 99% pada partikel $\geq 50 \mu\text{m}$. Hasil ini menunjukkan bahwa keunggulan konfigurasi 2D2D terutama terlihat pada pemisahan partikulat berukuran halus. Selain konfigurasi geometri,

peningkatan *inlet velocity* juga berpengaruh langsung terhadap kenaikan *collection efficiency* pada kedua desain cyclone. Secara teori, kenaikan kecepatan gas masuk akan meningkatkan gaya sentrifugal yang bekerja pada partikel, sehingga peluang partikel untuk terlempar ke dinding cyclone dan terpisah dari aliran gas menjadi lebih besar (Sardar *et al.*, 2023). Hal ini sejalan dengan hasil analisis bahwa penurunan *cut point diameter* terjadi pada kecepatan inlet yang lebih tinggi, serta hasil penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa kecepatan inlet dan ukuran partikel memengaruhi *collection efficiency* pada *cyclone separator* (Mahmoud, 2025). Kecenderungan peningkatan *collection efficiency* seiring dengan kenaikan *inlet velocity* pada penelitian ini sejalan dengan hasil simulasi CFD penelitian terdahulu (Paganel *et al.*, 2024).

3.4 Pressure Drop

Perhitungan *pressure drop* menunjukkan bahwa peningkatan *inlet velocity* menyebabkan kenaikan *pressure drop* pada kedua konfigurasi cyclone. Kehilangan tekanan merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja peralatan proses karena berkaitan dengan kehilangan energi aliran selama operasi (Aulia *et al.*, 2022). Kondisi ini terjadi karena semakin tinggi *inlet velocity* gas akan meningkatkan kehilangan energi akibat gesekan, turbulensi, dan perubahan momentum aliran di dalam cyclone separator (Sardar *et al.*, 2023). Profil *pressure drop* pada Gambar 7 konfigurasi 2D2D menghasilkan *pressure drop* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan konfigurasi 1D3D pada seluruh variasi kecepatan gas inlet. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan konfigurasi geometri memengaruhi karakteristik aliran dan kehilangan tekanan di dalam cyclone.

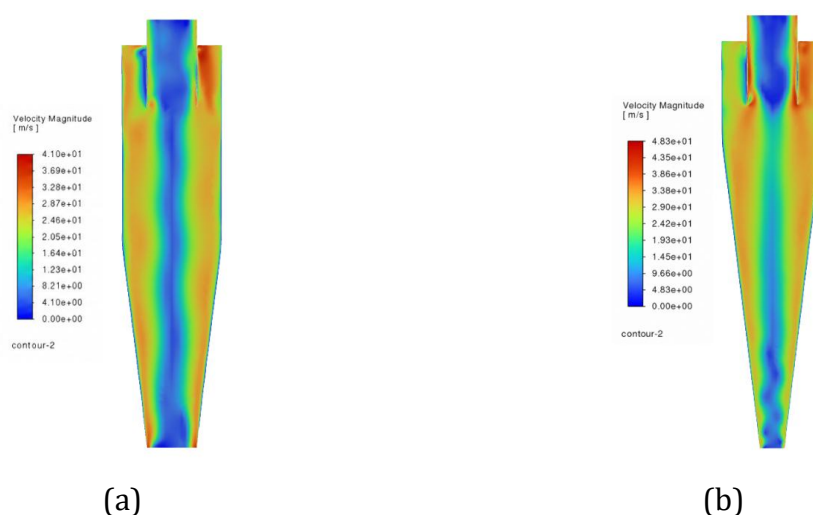


Gambar 7. Profil *Pressure Drop* 2D2D Cyclone dan 1D3D Cyclone

Pressure drop cyclone umumnya berada pada rentang 0,5–1 kPa untuk *high-throughput cyclone*, 1–2,5 kPa untuk *conventional cyclone*, dan 2–6 kPa untuk *high-efficiency cyclone* (AWMA, 1992). Berdasarkan hasil perhitungan pada penelitian ini, variasi inlet velocity 21 m/s dan 23 m/s menghasilkan *pressure drop* sebesar 0,58–0,69 kPa pada konfigurasi 2D2D dan 0,56–0,67 kPa pada konfigurasi 1D3D. Nilai tersebut masih berada pada kisaran *pressure drop* untuk *high-throughput cyclone*, dimana kedua konfigurasi cyclone yang dirancang menunjukkan karakteristik kehilangan tekanan yang relatif rendah. Peningkatan *pressure drop* pada *inlet velocity* yang lebih tinggi juga sejalan dengan karakteristik umum *cyclone separator*, yaitu peningkatan kecepatan aliran menyebabkan peningkatan *pressure drop* (Barua *et al.*, 2024).

Konfigurasi 2D2D memiliki *pressure drop* rata-rata sekitar 3,54% lebih tinggi dibandingkan 1D3D. *Trade-off* antara *separation efficiency* dan *pressure drop* merupakan karakteristik penting dalam desain dan optimasi *cyclone separator*, karena peningkatan efisiensi pemisahan perlu diimbangi dengan pengendalian *pressure drop* untuk mencapai kinerja dan konsumsi energi yang optimal (Li *et al.*, 2026). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa konfigurasi dengan *separation efficiency* yang lebih tinggi cenderung menghasilkan *pressure drop* yang lebih besar (Calvopiña *et al.*, 2026). Dalam penelitian ini, konfigurasi 2D2D memberikan *collection efficiency* yang lebih tinggi dan *cut point diameter* yang lebih rendah dibandingkan 1D3D, dengan konsekuensi *pressure drop* yang sedikit lebih tinggi. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi *cyclone* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efektivitas pemisahan dan *pressure drop*.

Untuk melengkapi hasil analisis kinerja kedua konfigurasi, dilakukan simulasi CFD awal untuk memperoleh gambaran distribusi kecepatan di dalam *cyclone*. Perbandingan kontur *velocity magnitude* pada konfigurasi 1D3D dan 2D2D ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kontur *Velocity Magnitude* Hasil Simulasi CFD konfigurasi (a) 2D2D; (d) 1D3D

Kontur *velocity magnitude* pada Gambar 8 menunjukkan adanya perbedaan sebaran zona berkecepatan rendah di bagian tengah dan zona berkecepatan lebih tinggi di sekelilingnya pada masing-masing konfigurasi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa benar geometri akan memengaruhi profil aliran partikel di dalam *cyclone*. Pada aliran berpusar, kecepatan tangensial berperan penting dalam menghasilkan gaya sentrifugal yang mendorong partikel menuju dinding *cyclone* membentuk wilayah pusaran luar, sedangkan rotasi di bagian inti dikenal sebagai *Rankine vortex* (Elsayed and Lacor, 2011). Perubahan geometri dapat memengaruhi karakteristik aliran dan menghasilkan *trade off* antara *collection efficiency* dan *pressure drop* yang memengaruhi profil kecepatan tangensial dapat mengubah kekuatan pusaran dan kemampuan pemisahan partikel, sehingga berkaitan dengan *collection efficiency* dan *cut point diameter*. Penelitian terdahulu melaporkan perbedaan karakteristik kecepatan tangensial dan aksial pada konfigurasi 1D3D dan 2D2D (Safikhani *et al.*, 2010). Perbedaan geometri ini yang memengaruhi kecepatan tangensial dapat mengubah kekuatan pusaran, kemampuan pemisahan partikel, serta *pressure drop*. Penelitian yang dilakukan Zabala-Quintero, Ramirez-Pastran and Torres (2021), juga menunjukkan bahwa modifikasi geometri bagian silindris *cyclone* dapat menurunkan kecepatan tangensial dan *pressure drop*, disertai sedikit penurunan efisiensi pemisahan serta peningkatan *cut point diameter*.

Pada penelitian ini, meskipun peningkatan *inlet velocity* dapat meningkatkan *collection efficiency*, kenaikan kecepatan yang terlalu tinggi juga berpotensi meningkatkan turbulensi dan *re-entrainment* partikel sehingga peningkatan efisiensi pemisahan menjadi kurang signifikan (Ayli and Kocak, 2025). Pada penelitian ini, konfigurasi 2D2D menghasilkan *pressure drop* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan 1D3D, namun diikuti dengan *cut point diameter* yang lebih rendah dan *collection efficiency* yang lebih baik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi 2D2D mampu memberikan performa pemisahan yang lebih efektif dengan *pressure drop* yang tetap berada dalam rentang operasi cyclone yang dapat diterapkan.

Selain mengevaluasi *collection efficiency* dan *pressure drop*, kinerja *cyclone separator* juga perlu ditinjau dari potensi pengendalian emisi partikulat pada proses penanganan bahan padat. Pada industri pupuk, partikulat dihasilkan selama proses pemindahan material melalui conveyor dan pada proses sortasi ukuran granul. Pada pabrik pupuk hayati PT. X dengan kapasitas produksi pupuk hayati granul sebesar 9.700 MT/tahun dan asumsi operasi kontinyu, maka diperoleh laju produksi rata-rata yaitu 1.107,3 kg/jam. Dengan rata-rata debu yang terbentuk pada tahap produksi mulai dari sortasi *zeolite granule*, *mixing*, dan proses pengeringan sebesar 0,8–1,2% dari total produk, maka jumlah debu yang diperkirakan terbentuk berkisar antara 8,86–13,29 kg/jam. Pada *inlet velocity* 23 m/s, konfigurasi *cyclone* 2D2D menghasilkan rata-rata *collection efficiency* sebesar 94,39% untuk seluruh diameter partikel yang dianalisis. Sehingga, massa debu yang berpotensi tertangkap dan dapat dimanfaatkan kembali diperkirakan sebesar 8,36–12,54 kg/jam. Namun, jumlah debu yang benar-benar dapat ditangkap perlu dikonfirmasi kembali melalui pengukuran langsung di lapangan dengan memperhitungkan distribusi massa setiap ukuran partikel.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil prarancangan dan analisis teoritis menggunakan model Lapple, perbedaan konfigurasi geometri cyclone memengaruhi kinerja pemisahan debu zeolit pabrik pupuk di PT. X. Konfigurasi cyclone 2D2D menunjukkan kinerja pemisahan yang lebih baik dibandingkan 1D3D, ditunjukkan oleh *cut point diameter* yang lebih rendah dan *collection efficiency* yang lebih tinggi. Peningkatan *inlet velocity* meningkatkan *collection efficiency* dan *pressure drop* pada kedua konfigurasi cyclone. Konfigurasi 2D2D menghasilkan *pressure drop* sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi 1D3D pada seluruh variasi *inlet velocity*. Namun, *pressure drop* kedua konfigurasi masih berada dalam rentang operasi cyclone tipe *high-throughput*. Meskipun konfigurasi 2D2D menghasilkan *pressure drop* yang sedikit lebih tinggi, konfigurasi ini lebih berpotensi untuk diterapkan pada sistem *dry dedusting* di industri pupuk berbasis zeolit karena mampu memberikan performa pemisahan yang lebih efektif dengan *pressure drop* yang masih masuk pada rentang yang diperbolehkan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Malang (POLINEMA) atas dukungan pendanaan yang diberikan untuk penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada PT. X atas kesempatan dan fasilitasnya dalam proses pengumpulan data yang diperlukan untuk penelitian ini dalam rangka menghasilkan rekomendasi untuk industri PT. X.

Diana Rachmawati, Shobir Juntri Yoga, Rosita Dwi Chrisnandari, May Kurnia Pratiwi, Profiyanti Hermien Suharti, dan Asalil Mustain
 diana.rachmawati@polinema.ac.id: Perbandingan Kinerja pada Prarancangan Gas Cyclone dengan Konfigurasi 2D2D dan 1D3D pada Pabrik Pupuk

References

- Aulia, A. *et al.* (2022) "Kajian Terhadap Kavitasi dan Pressure Drop pada Buka-an Control Valve Tipe Globe Valve dengan Menggunakan Software Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics)," *Chemical Engineering Journal Storage*, 4(April), pp. 57–66. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.29103/cejs.v1i4.5874>.
- AWMA (1992) *Air Pollution Engineering Manual*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Ayli, E. and Kocak, E. (2025) "A Comprehensive Review of Cyclone Separator Technology," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, (September 2024), pp. 2751–2789. Available at: <https://doi.org/10.1002/cjce.25526>.
- Azadi, Mohsen and Azadi, Mehdi (2012) "An Analytical Study of The Effect of Inlet Velocity on The Cyclone Performance Using Mathematical Models," *Powder Technology*, 217, pp. 121–127. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.017>.
- Barua, S. *et al.* (2024) "Numerical Investigation of Inlet Height and Width Variations on Separation Performance and Pressure Drop of Multi-Inlet Cyclone Separators," *Processes*, 12(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr12091820>.
- Bashir, K. (2017) *Design and Fabrication of Cyclone Separator*. University of Gujarat. Available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20727.83368>.
- Bogodage, S.G. and Leung, A.Y.T. (2022) "Cyclone Separator Theories to Predict Performance and Flow Characteristics," *Journal of Particle Science and Technology*, 7(2), pp. 83–98. Available at: <https://doi.org/10.22104/J PST.2022.5608.1207>.
- Calvopiña, H. *et al.* (2026) "Multi-Objective Optimization of a Cyclone Separator for Improved Separation Efficiency and Reduced Pressure Drop Using CFD and NSGA-II," *Separations*, 13(6), pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.3390/separations13060173>.
- Darmanto, P.S. and Primanto, K. (2017) "Pengujian Karakteristik Kinerja Siklon Separator Hemat Energi," *Mesin*, 12, pp. 87–96. Available at: <https://journals.itb.ac.id/index.php/jtms/article/view/4823>.
- Elsayed, K. and Lacor, C. (2011) "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance," *Applied Mathematical Modelling*, 35(4), pp. 1952–1968. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.007>.
- Hsiao, T. *et al.* (2015) "Effects of The Geometric Configuration on Cyclone Performance," *Journal of Aerosol Science*, 86, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.03.005>.
- Innocentini, M.D.D.M. *et al.* (2021) "Environmental and Economic Issues Concerning The Use of Wet Scrubbers Coupled to Bagasse - Fired Boilers : A Case Study in The Brazilian Sugarcane Industry," *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(8), pp. 2319–2335. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02139-3>.
- Kanageswari, S.V., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. (2022) "Dust and Particulate Matter Generated during Handling and Pelletization of Herbaceous Biomass: A Review,"

- Energies*, 15. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15072634>.
- Lapple, C.E. (1951) "Processes Use Many Collector Types," *Chemical Eng.*, 58(5), pp. 144–151.
- Li, B. *et al.* (2026) "Review on the Optimal Design of Cyclone Separator: Theory, Methodology, and Applications," *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 24(3). Available at: <https://doi.org/10.32604/fhmt.2026.075814>.
- Mahmoud, M.A. (2025) "Performance evaluation of cyclone separator for air pollutant removal under varying conditions," *Journal of Taibah University for Science*, 19(1). Available at: <https://doi.org/10.1080/16583655.2025.2506952>.
- Marintika, G.F., Cundari, L. and Kurniawan, F.H. (2023) "Proses Pengeringan NPK Berdasarkan Evaluasi Rotary Dryer dan Kadar Air NPK di PT. Petrokimia," *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(1), pp. 273–289. Available at: <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i1.1279>.
- Modabberifar, M., Nazaripoor, H. and Safikhani, H. (2021) "Modeling and Numerical Simulation of Flow Field in Three Types of Standard New Design Cyclone Separators," *Advanced Powder Technology*, 32(11), pp. 4295–4302. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.09.037>.
- Mumcu, A.G. and Avci, A. (2023) "Parametric and General Evaluation of Mathematical Models Used for Critical Diameter Determination in Cyclone Separators," *Separations*, 10(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/separations10050284>.
- Paganel, T.V. *et al.* (2024) "CFD Simulation of an Industrial Dust Cyclone Separator: A Comparison with Empirical Models: The Influence of the Inlet Velocity and the Particle Size on Performance Factors in Situation of High Concentration of Particles," *Journal of Engineering*, 2024(1). Available at: <https://doi.org/10.1155/2024/5590437>.
- Pupuk Indonesia (2022) *Produk Pupuk Indonesia*. Available at: <https://www.pupuk-indonesia.com/product>.
- Safikhani, H. *et al.* (2010) "Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators," *Advanced Powder Technology*, 21(4), pp. 435–442. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2010.01.002>.
- Sardar, R. *et al.* (2023) "The Effect of Inlet Velocity, Gas Temperature and Particle Size on The Performance of Double Cyclone Separator," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 191. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109469>.
- Syuriadi, A. *et al.* (2024) "Identifying the Influence of Inlet Velocity Changes To Pressure Drop and Collecting Efficiency in Stairmand and Lapple Type Cyclone Separators," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6(130)), pp. 22–28. Available at: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310565>.
- Taiwo, M.I., Namadi, M.A. and Mokwa, J.B. (2016) "Design and Analysis of Cyclone Dust Separator," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, (4), pp. 130–134. Available at: [http://www.ajer.org/papers/v5\(04\)/O050401300134.pdf](http://www.ajer.org/papers/v5(04)/O050401300134.pdf).
- Vermande Paganel, T. *et al.* (2024) "CFD Simulation of an Industrial Dust Cyclone Separator: A Comparison with Empirical Models: The Influence of the Inlet Velocity and the Particle Size on Performance Factors in Situation of High

Diana Rachmawati, Shobir Juntri Yoga, Rosita Dwi Chrisnandari, May Kurnia Pratiwi, Profiyanti Hermien Suharti, dan Asalil Mustain
diana.rachmawati@polinema.ac.id: Perbandingan Kinerja pada Prarancangan Gas Cyclone dengan Konfigurasi 2D2D dan 1D3D pada Pabrik Pupuk

Concentration of Particles,” *Journal of Engineering*, 2024(1). Available at: <https://doi.org/10.1155/2024/5590437>.

Wang, L. *et al.* (2003) “Analysis of Cyclone Collection Efficiency,” 0300(034114). Available at: <https://doi.org/10.13031/2013.15040>.

Wei, S. *et al.* (2023) “Research on the Particle Breakage Mechanism in High-Speed Shear Wet Granulation,” *Processes*, 11. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr11040989>.

Wójtowicz, R., Wolak, P. and Wójtowicz-Wrobel, A. (2020) “Numerical and Experimental Analysis of Flow Pattern , Pressure Drop and Collection Efficiency in a Cyclone with a,” *Energies*, 14. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14010111>.

Zabala-Quintero, C., Ramirez-Pastran, J. and Torres, M.J. (2021) “Performance characterization of a new model for a cyclone separator of particles using computational fluid dynamics,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/app11125342>.