



BAB IX TUGAS KHUSUS

“EVALUASI SISTEM DE-DUSTING CYCLONE 18D – 2115 PADA UNIT NPK GRANULASI MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS”

IX.1 Latar Belakang

PT Petrokimia Gresik merupakan salah satu perusahaan industri pupuk yang mengoperasikan empat unit pabrik produksi pupuk NPK, yaitu NPK I, NPK II, NPK III, dan NPK IV. Pada setiap unit produksi tersebut, terdapat berbagai tahapan mekanis dan termal yang berpotensi menghasilkan debu, baik berupa partikel kasar maupun partikel halus. Debu ini umumnya muncul akibat adanya tekanan positif pada peralatan proses seperti *crusher*, *rotary dryer*, dan *rotary cooler*. Apabila tidak dikendalikan secara optimal, debu yang dihasilkan dapat menurunkan efisiensi proses, menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan pekerja dan lingkungan kerja.

Untuk mengendalikan emisi debu tersebut, Unit NPK Granulasi II dilengkapi dengan *dedusting system* yang berfungsi menghisap debu dari sumbernya dan menyalurkannya ke unit pemisahan *cyclone* dan *scrubber*. Sistem ini memanfaatkan dua *blower* utama, yaitu *blower* 18C-2103 yang menyedot udara *cyclone* 18D-2115 pada *rotary dryer* dan *blower* 18C-2102 yang menyedot udara *cyclone* 18D-2116 pada *rotary cooler*.

Cyclone pada *dedusting system* berfungsi sebagai unit pemisah awal untuk debu kasar dengan memanfaatkan gaya sentrifugal. Partikel debu kasar yang memiliki massa jenis lebih besar akan terlempar ke dinding *cyclone*, kehilangan energi kinetiknya, kemudian jatuh ke bagian bawah *cyclone* dan selanjutnya dialirkan menuju *conveyor*. Debu kasar tersebut akan bergabung dengan aliran produk *recycle* yang berasal dari *vibrating screen* serta bahan baku (*raw material*) untuk dikembalikan ke proses granulasi pada granulator.

Sementara itu, partikel debu yang berukuran lebih halus dan masih terbawa aliran udara keluar dari bagian atas *cyclone* akan dialirkan menuju *scrubber room*. Di dalam *scrubber room*, debu halus tersebut dikontakkan dengan air melalui



sistem penyemprotan (*spray*) sehingga partikel debu tertangkap oleh air dan membentuk *slurry*. *Slurry* yang dihasilkan kemudian dimanfaatkan kembali sebagai umpan proses, khususnya untuk membantu pembentukan butiran (*granul*) pada unit granulator, sehingga selain mengendalikan pencemaran udara, *dedusting system* juga mendukung efisiensi proses granulasi melalui pemanfaatan kembali debu hasil produksi.

Udara yang telah mengalami proses pencucian dan terbebas dari partikel debu selanjutnya dialirkan keluar dari *scrubber room* dan dilepaskan ke atmosfer melalui *tail gas stack*. Pelepasan udara bersih melalui *tail gas stack* ini memastikan bahwa emisi gas buang yang dikeluarkan ke lingkungan telah memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan, sehingga *dedusting system* tidak hanya berfungsi sebagai pengendali pencemaran udara, tetapi juga berkontribusi terhadap efisiensi proses produksi melalui pemanfaatan kembali debu hasil produksi.

Oleh karena itu, evaluasi terhadap kapasitas dan kinerja *cyclone* dalam memisahkan debu kasar maupun debu halus menjadi aspek krusial dalam menentukan tingkat efektivitas *dedusting system* secara keseluruhan, khususnya dalam memastikan kemampuan *cyclone* menyaring partikel sesuai dengan karakteristik ukuran debu yang dihasilkan dari proses produksi.

Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan kajian kinerja *cyclone* dengan memfokuskan analisis pada variabel-variabel yang berpengaruh langsung terhadap proses pemisahan, yaitu kecepatan aliran gas pada bagian inlet serta distribusi ukuran diameter partikel. Untuk memperoleh gambaran perilaku aliran dan pola pemisahan yang lebih akurat, analisis ini didukung oleh pemodelan numerik menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melalui perangkat lunak Ansys Fluent versi 2022. Secara teoritis, efisiensi pemisahan *cyclone* dapat ditentukan dengan berbagai metode perhitungan empiris, di antaranya metode Lozia–Leith, Li–Wang, Koch–Licht, serta metode Lapple (Muriliasari dan Murinto, 2013). Dalam kajian ini, metode Lapple dipilih sebagai pendekatan utama dalam menentukan efisiensi pengumpulan partikulat karena metode tersebut memiliki tingkat penerapan yang luas, kemudahan dalam



perhitungan, serta telah banyak digunakan sebagai acuan dalam berbagai studi evaluasi kinerja *cyclone* (Kurniawan dan Wirasembada, 2012).

Selain perhitungan secara teoritis, simulasi CFD menggunakan Ansys Fluent 2022 dimanfaatkan untuk memprediksi distribusi medan kecepatan dan variasi tekanan. Hasil simulasi ini memberikan gambaran visual dan kuantitatif mengenai perilaku aliran fluida serta mekanisme pemisahan partikel di dalam *cyclone*, sebagaimana telah diterapkan pada studi kasus *cyclone separator* di PT. Petrokimia Gresik.



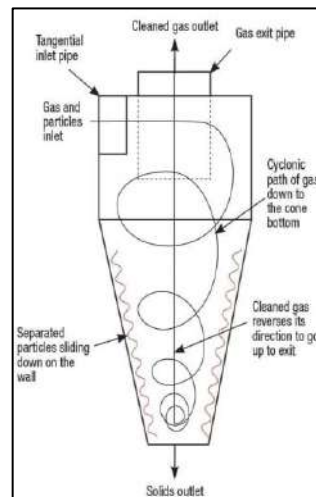
IX.2 Tinjauan Pustaka

IX.2.1 Pengertian Cyclone

Cyclone adalah suatu unit operasi yang menggunakan prinsip kerja gaya sentrifugal dan gaya gravitasi serta adanya perbedaan massa jenis untuk memisahkan partikulat yang terbawa aliran fluida. Di dalam *cyclone* terjadi pusaran akibat dari geometri desain yang mengakibatkan partikel dengan massa jenis besar akan jatuh ke *outlet down* dan partikel dengan massa jenis besar akan naik ke *outlet up cyclone* dan dihisap oleh *blower*. Efektivitas pemisahan partikel dipengaruhi oleh ukuran partikel, massa jenis, dan jumlah partikel yang terbawa udara bersih (Rais et al., 2023).

IX.2.2 Prinsip Kerja Cyclone

Prinsip kerja *cyclone* didasarkan pada pemanfaatan aliran gas berputar (*vortex*) untuk menghasilkan gaya sentrifugal yang mendorong partikel padat keluar dari aliran gas. Ketika aliran gas bercampur dengan debu memasuki badan *cyclone* secara tangensial, terbentuk putaran spiral yang mengarahkan partikel ke dinding *cyclone*, di mana gaya sentrifugal dan gaya inersia menyebabkan partikel menempel dan turun ke bagian bawah *cyclone*, sementara gas yang telah bersih naik melalui pusat *vortex* dan keluar lewat *outlet* atas. Efisiensi pemisahan pada *cyclone* sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, kecepatan *inlet* gas, serta geometri *cyclone* itu sendiri, di mana partikel yang lebih besar dan padat cenderung terpisah lebih efektif dibandingkan partikel halus. Prinsip ini menjadikan *cyclone* sebagai pemisah awal yang efektif untuk partikel kasar dalam banyak aplikasi industri, meskipun efisiensinya menurun pada ukuran partikel yang sangat kecil ($< 10 \mu\text{m}$) karena keterbatasan gaya sentrifugal yang bekerja pada partikel halus (Couper et al., 2005).



Gambar IX. 1 Prinsip Kerja *Cyclone* yang Memanfaatkan Gaya Sentrifugal

IX.2.3 Klasifikasi Debu pada Proses NPK Granulasi

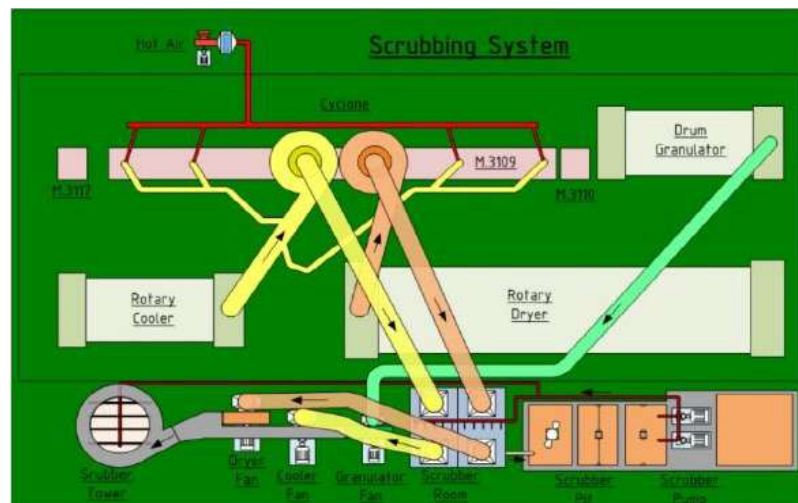
Debu yang dihasilkan dalam proses pembuatan pupuk pada unit NPK Granulasi II terbentuk sebagai akibat dari aktivitas mekanis dan aliran gas di berbagai peralatan produksi seperti *crusher*, *rotary dryer*, *rotary cooler*, dan *dozometer*. Debu ini memiliki sifat partikel yang beragam sehingga diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikel menjadi dua kelompok utama: debu kasar (*coarse*) dan debu halus (*fine*). Partikel yang tergolong debu kasar umumnya memiliki diameter lebih besar dan massa yang relatif tinggi, sehingga lebih mudah dipisahkan dari aliran gas melalui gaya inersia atau gravitasi sebaliknya, debu halus memiliki dimensi yang lebih kecil dan dapat tetap terangkut oleh aliran udara dalam waktu lebih lama serta sering kali memerlukan perangkat pemisah tambahan untuk ditangkap secara efektif (School of Bio and Chemical Engineering, 2025).

Efisiensi pemisahan ini sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel dan desain separator, di mana *cyclone* idealnya menargetkan partikel menengah hingga kasar ($>10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$), sementara partikel yang sangat halus ($<5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) cenderung lolos dan memerlukan *scrubbing* atau tahap filtrasi lanjutan untuk ditangkap. Hal ini terjadi karena gaya sentrifugal yang bekerja pada partikel berukuran lebih besar jauh lebih efektif daripada pada partikel yang sangat halus, sehingga efisiensi pemisahan *cyclone* menurun secara signifikan pada partikel halus. Analisis karakter

partikel debu dan pemisahannya penting dalam desain serta evaluasi sistem dedusting untuk memastikan kualitas udara kerja yang baik, mengurangi emisi lingkungan, sekaligus memaksimalkan pemanfaatan kembali partikel baik pada proses produksi maupun penanganan lanjutan (*secondary dust control*) (Wark et al., 1998).

IX.2.4 Konfigurasi Sistem Dedusting Unit NPK Granulasi II

Sistem *dedusting* pada Unit NPK Granulasi II dirancang untuk mengendalikan debu yang dihasilkan dari berbagai peralatan proses, seperti *crusher*, *rotary dryer*, *rotary cooler*, dan *dozometer*, yang umumnya bekerja pada kondisi tekanan positif dan menghasilkan partikel padat tersuspensi dalam aliran udara. Secara umum, sistem *dedusting* terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu *blower*, *ducting*, *cyclone*, *scrubber room*, dan *stack*, yang bekerja secara terintegrasi untuk memisahkan, menangkap, dan mengendalikan emisi debu sebelum udara dilepas ke atmosfer.



Gambar IX. 2 Konfigurasi Sistem *Dedusting* Unit NPK Granulasi II

Debu yang terbentuk pada titik-titik sumber terlebih dahulu dihisap oleh *blower*, yang berfungsi menciptakan tekanan negatif sehingga aliran udara dan debu dapat ditarik masuk ke dalam sistem. Aliran ini kemudian dialirkan melalui *ducting*, yang berperan sebagai jalur transportasi campuran udara dan debu menuju unit pemisahan. Desain dan konfigurasi *ducting* sangat mempengaruhi distribusi aliran,

kehilangan tekanan (*pressure drop*), serta efektivitas hisapan pada setiap sumber debu (Cooper & Alley, 2011).



Gambar IX. 3 Konfigurasi *Ducting* NPK Granulasi II

Tahap pemisahan awal dilakukan di *cyclone*, yang berfungsi sebagai pemisah debu kasar (*primary dust separator*). Di dalam *cyclone*, campuran udara dan debu masuk secara tangensial sehingga membentuk aliran berputar. Gaya sentrifugal yang dihasilkan mendorong partikel debu berukuran besar dan bermassa jenis tinggi ke arah dinding *cyclone*, kemudian jatuh ke bagian bawah sebagai debu kasar. Debu kasar ini selanjutnya dialirkan melalui *conveyor* untuk digabungkan dengan material *recycle* dari *vibrating screen* serta *fresh raw material*, sehingga dapat dimanfaatkan kembali dalam proses granulasi (Hoffmann & Stein, 2008).



Gambar IX. 4 *Cylone* Unit NPK Granulasi II

Sementara itu, debu halus yang tidak terpisah di *cyclone* akan terbawa bersama aliran udara keluar melalui *outlet cyclone* dan diarahkan menuju *scrubber room*. Di dalam *scrubber room*, udara berdebu dikontakkan dengan air melalui sistem *spray* untuk menangkap partikel halus yang masih tersuspensi. Proses ini menghasilkan *slurry*, yaitu campuran air dan debu halus, yang kemudian dikumpulkan dan dimanfaatkan kembali sebagai air *slurry* untuk membantu proses granulasi di granulator. Mekanisme *scrubbing* ini efektif untuk mengendalikan partikel halus yang sulit ditangkap oleh *cyclone* secara mekanis (Strauss, 1975).



Gambar IX. 5 Sistem *Scrubbing* NPK Granulasi II

Udara yang telah melalui proses *scrubbing* dan mengalami penurunan kandungan partikulat selanjutnya dialirkan menuju *stack*. Melalui *stack*, udara bersih dilepaskan ke atmosfer dengan kandungan debu yang telah memenuhi baku mutu emisi yang ditetapkan. Dengan konfigurasi tersebut, sistem *dedusting* Unit NPK Granulasi II tidak hanya berfungsi sebagai alat pengendali pencemaran udara, tetapi juga mendukung efisiensi proses melalui pemanfaatan kembali debu hasil pemisahan, sehingga selaras dengan prinsip pengelolaan limbah terpadu dan berkelanjutan.



Gambar IX. 6 *Stack/Tail Gas Scrubber* Unit NPK Granulasi II

IX.2.5 Peran Cyclone dalam Pemisahan Debu Kasar dan Halus

Cyclone pada sistem dedusting Unit NPK Granulasi II berperan sebagai unit pemisah awal (*primary separator*) yang berfungsi mengurangi beban partikulat sebelum aliran gas memasuki unit pengendalian lanjutan, yaitu *scrubber room*. Fungsi utama *cyclone* adalah memisahkan debu kasar dari campuran udara dan debu dengan memanfaatkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh aliran gas berputar di dalam badan *cyclone*. Debu kasar yang memiliki ukuran partikel dan massa jenis lebih besar akan terdorong ke dinding *cyclone*, kehilangan momentum, dan selanjutnya jatuh ke bagian bawah *cyclone* untuk dikumpulkan dan dialirkan kembali ke sistem produksi sebagai material *recycle* (Hoffmann & Stein, 2008).

Sementara itu, debu halus dengan ukuran partikel yang lebih kecil dan massa yang lebih ringan cenderung tetap tersuspensi dalam aliran gas dan terbawa keluar melalui *outlet cyclone*. Partikel halus ini kemudian dialirkan menuju *scrubber room* untuk ditangkap melalui proses kontak dengan air. Oleh karena itu, *cyclone* tidak dirancang untuk menangkap seluruh fraksi debu, melainkan difokuskan pada pemisahan partikel kasar agar efisiensi sistem secara keseluruhan tetap optimal. Efektivitas pemisahan *cyclone* sangat dipengaruhi oleh parameter operasi seperti kecepatan aliran *inlet gas*, distribusi ukuran partikel, serta geometri *cyclone* yang menentukan nilai cut size (Leith & Licht, 1972).



Kinerja *cyclone* memiliki hubungan yang sangat erat dengan performa unit downstream, khususnya scrubber. *Cyclone* yang berfungsi dengan baik akan secara signifikan mengurangi jumlah dan ukuran partikel yang masuk ke scrubber, sehingga menurunkan beban kerja scrubber, mengurangi konsumsi air, serta meningkatkan stabilitas operasi. Sebaliknya, apabila *cyclone* tidak bekerja secara optimal, maka partikel debu kasar akan ikut terbawa ke scrubber, yang dapat menyebabkan peningkatan pembentukan *slurry*, potensi *fouling*, serta penurunan efisiensi penangkapan partikel halus. Dengan demikian, evaluasi kinerja *cyclone* menjadi faktor penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi keseluruhan sistem *dedusting* pada Unit NPK Granulasi II (Cooper & Alley, 2011).

IX.2.5 Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam Analisis Cyclone

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku aliran fluida, perpindahan panas, serta distribusi partikel di dalam suatu sistem dengan menyelesaikan persamaan dasar mekanika fluida secara diskret. Dalam analisis *cyclone* pada sistem *dedusting* Unit NPK Granulasi II, CFD dimanfaatkan untuk memprediksi karakteristik aliran gas–partikel yang kompleks, termasuk pola aliran berputar (*swirling flow*), distribusi kecepatan, tekanan, serta jalur pergerakan partikel debu kasar dan halus di dalam badan *cyclone*.

Secara fundamental, CFD didasarkan pada penyelesaian persamaan Navier–Stokes, yang merupakan bentuk matematis dari hukum kekekalan massa, momentum, dan energi. Persamaan kontinuitas menggambarkan konservasi massa fluida, sedangkan persamaan momentum menjelaskan hubungan antara gaya inersia, tekanan, viskositas, dan gaya eksternal yang bekerja pada fluida. Dalam sistem *cyclone*, persamaan Navier–Stokes menjadi sangat penting karena aliran yang terbentuk bersifat tiga dimensi, turbulen, serta didominasi oleh gaya sentrifugal akibat gerakan rotasi fluida (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Karena aliran di dalam *cyclone* umumnya berada pada bilangan Reynolds tinggi, maka model turbulensi diperlukan untuk merepresentasikan fluktuasi kecepatan yang tidak dapat diselesaikan secara langsung. Model turbulensi yang



umum digunakan dalam simulasi cyclone antara lain model $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, dan Reynolds Stress Model (RSM). Model RNG $k-\epsilon$ sering dipilih karena mampu memberikan prediksi yang lebih baik terhadap aliran berputar dan gradien tekanan yang tajam di dalam *cyclone*, sedangkan RSM memberikan akurasi lebih tinggi dalam menangkap anisotropi turbulensi meskipun membutuhkan komputasi yang lebih besar (Hoffmann & Stein, 2008).

Penerapan CFD menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent memungkinkan evaluasi kinerja *cyclone* secara mendalam tanpa harus melakukan modifikasi fisik pada peralatan. Dalam simulasi ini, geometri *cyclone* dimodelkan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan, kemudian dilakukan penentuan *boundary conditions* seperti kecepatan *inlet gas*, tekanan *outlet*, serta properti fisik fluida dan partikel debu. Selain itu, metode *Discrete Phase Model* (DPM) dapat digunakan untuk melacak pergerakan partikel debu dan menghitung efisiensi pemisahan berdasarkan ukuran partikel tertentu. Hasil simulasi CFD berupa kontur kecepatan, tekanan, turbulensi, dan lintasan partikel dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi *cyclone*, potensi terjadinya *re-entrainment* partikel, serta distribusi *pressure drop* yang berpengaruh langsung terhadap kinerja blower pada sistem *dedusting* NPK Granulasi II (ANSYS Inc., 2020).

Dengan demikian, analisis CFD menjadi alat yang sangat efektif dalam mendukung evaluasi dan optimalisasi kinerja *cyclone*, karena mampu memberikan gambaran rinci mengenai fenomena aliran internal yang sulit diamati secara eksperimental. Penerapan CFD pada sistem *dedusting* tidak hanya membantu meningkatkan efisiensi pemisahan debu, tetapi juga berkontribusi dalam pengambilan keputusan teknis terkait modifikasi desain dan kondisi operasi *cyclone*.

IX.3 Metode Evaluasi Menggunakan Software Ansys

IX.3.1 Data Operasi dan Kondisi Aktual Cyclone

Sebagai bagian dari evaluasi kinerja sistem dedusting pada Unit NPK Granulasi II, diperlukan data operasi aktual *cyclone* yang merepresentasikan kondisi kerja peralatan selama proses produksi berlangsung. Data operasi ini mencakup parameter-parameter utama yang berpengaruh terhadap performa *cyclone*, antara lain laju alir udara masuk, temperatur dan tekanan operasi, serta karakteristik debu yang terbawa dari unit proses.

Tabel IX. 1 Parameter Geometri *Cyclone* Unit NPK Granulasi II

No.	Parameter Geometri	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Diameter badan utama (<i>main cylinder</i>)	2384	mm	Diameter silinder utama <i>cyclone</i>
2	Tinggi silinder	3398	mm	Tinggi bagian silinder
3	Tinggi kerucut	5700	mm	Tinggi bagian <i>cone cyclone</i>
4	Diameter <i>outlet up</i>	1705	mm	Diameter pipa <i>outlet up</i>
5	Tinggi leher <i>outlet up</i>	1477	mm	Tinggi stub <i>outlet up</i>
6	Lebar <i>inlet</i> (penampang persegi panjang)	820	mm	Lebar saluran masuk gas
7	Tinggi <i>inlet</i> (penampang persegi panjang)	1552	mm	Tinggi saluran masuk gas
8	Jarak pusat <i>inlet</i> dari tepi atas <i>cyclone</i>	1115	mm	Posisi vertikal <i>inlet</i>
9	Ketebalan plat baj penyusun <i>cyclone</i>	8.0	mm	Ketebalan material plat baja (<i>flange plate</i>)

Tabel IX. 2 Properti Material *Cyclone* Unit NPK Granulasi II

No.	Properti Material	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Jenis material	ASTM A36 Steel	–	Baja struktural karbon
2	Densitas	7850	g/mm ³	Nilai fisik aktual material
3	<i>Ultimate Tensile Strength</i>	$4,00 \times 10^8$	Pa (400 MPa)	Kekuatan tarik maksimum
4	Modulus Elastisitas (<i>Young's Modulus</i>)	$2,00 \times 10^{11}$	Pa (200 GPa)	Kekakuan material
5	Rasio Poisson	0,26	–	Rasio regangan lateral terhadap aksial
6	Konduktivitas Termal	45	W/m·K	Kemampuan menghantarkan panas
7	Kalor Jenis (<i>Specific Heat</i>)	486	J/kg·°C	Kapasitas panas spesifik material

Tabel IX. 3 Parameter Kondisi Operasi *Cyclone* 18D – 2115 Unit NPK Granulasi II

No.	Parameter Kondisi Operasi	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Ukuran partikel minimum	10	µm	Partikel terkecil yang masih dapat dipisahkan secara efektif
2	Minimum <i>dust loading</i>	2500	mg/m ³	Konsentrasi debu minimum pada gas masuk
3	Estimasi efisiensi pemisahan	85	%	Efisiensi pengumpulan debu kasar
4	Kecepatan gas operasi	10 – 20	m/s	Kecepatan aliran gas pada <i>inlet cyclone</i>

5	Kapasitas maksimum aliran gas	25	m ³ /s	Kapasitas desain <i>cyclone</i>
6	Laju alir gas aktual	64,000	m ³ /jam	Kondisi operasi <i>suction outlet</i>
7	<i>Pressure drop</i> gas	10 – 70	mmH ₂ O	Kehilangan tekanan akibat pemisahan partikel

IX.3.2 Metode Evaluasi Kapasitas Cyclone Secara Teoritis

Evaluasi kapasitas dan kinerja cyclone pada sistem dedusting Unit NPK Granulasi II dilakukan secara teoritis dengan mengacu pada persamaan empiris yang telah banyak digunakan dalam perancangan dan analisis cyclone industri. Pendekatan teoritis ini bertujuan untuk menilai kemampuan cyclone dalam menangani laju alir gas buang serta efektivitasnya dalam memisahkan partikel debu kasar sebelum aliran gas memasuki unit scrubbing.

1. Perhitungan Kapasitas Aliran Gas Cyclone

Kapasitas *cyclone* secara teoritis ditentukan berdasarkan hubungan antara luas penampang *inlet* dan kecepatan gas masuk. Laju alir volumetrik gas dihitung menggunakan persamaan dasar aliran fluida:

$$Q = A_{inlet} \times v_{inlet}$$

Keterangan :

Q : laju alir volumetrik gas (m³/s),

A_{inlet} : luas penampang inlet cyclone (m²),

v_{inlet} : kecepatan gas pada inlet cyclone (m/s).

Nilai kecepatan *inlet* umumnya direkomendasikan berada pada rentang 10–20 m/s untuk menjamin gaya sentrifugal yang cukup tanpa menyebabkan *pressure drop* yang berlebihan. Perhitungan ini digunakan untuk mengevaluasi apakah *cyclone* beroperasi pada kondisi *underload* atau *overload* dibandingkan dengan kapasitas desainnya (Cooper & Alley, 2011).

2. Evaluasi Diameter Partikel Potong (Cut Diameter)

Salah satu parameter utama dalam analisis kinerja *cyclone* adalah diameter partikel potong (*cut size*, d_{pc}), yaitu ukuran partikel yang memiliki probabilitas tertangkap sebesar 50%. Dalam metode Lapple, diameter partikel potong dihitung dengan persamaan:

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e \rho_p v_i}}$$

Keterangan :

μ : viskositas gas (Pa·s),

b : lebar *inlet cyclone* (m),

N_e : jumlah putaran efektif gas di dalam *cyclone*,

ρ_p : densitas partikel (kg/m³),

v_i : kecepatan *inlet gas* (m/s).

Nilai (d_{pc}) digunakan untuk membandingkan ukuran debu aktual yang dihasilkan pada unit *crusher*, *dryer*, dan *cooler*, sehingga dapat diketahui fraksi debu yang berpotensi lolos menuju unit *downstream* (Lapple, 1951).

3. Perhitungan Efisiensi Pengumpulan Cyclone

Efisiensi pemisahan partikel oleh *cyclone* secara teoritis dihitung menggunakan pendekatan fraksi ukuran partikel. Untuk partikel dengan diameter (d_p). Efisiensi pengumpulan dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta_p = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d_{pc}} \right)^2 \right]$$

Efisiensi total *cyclone* diperoleh dengan mengintegrasikan efisiensi parsial terhadap distribusi ukuran partikel debu. Pendekatan ini sesuai untuk sistem *dedusting* Unit NPK Granulasi II yang memiliki variasi ukuran debu dari debu kasar hingga debu halus.

4. Evaluasi Pressure Drop Cyclone

Selain kapasitas dan efisiensi, evaluasi teoritis juga mencakup perhitungan kehilangan tekanan (*pressure drop*) sebagai indikator konsumsi energi *blower*. *Pressure drop cyclone* dapat diperkirakan menggunakan persamaan empiris:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_g v_i^2}{2}$$

Keterangan :

ΔP : *pressure drop* (Pa),

ξ : faktor kehilangan tekanan *cyclone*,

ρ_g : densitas gas (kg/m³).

Nilai *pressure drop* yang terlalu tinggi dapat menurunkan performa *blower dedusting* dan menyebabkan distribusi hisapan yang tidak merata pada area *cooler, crusher, dan dozometer*.

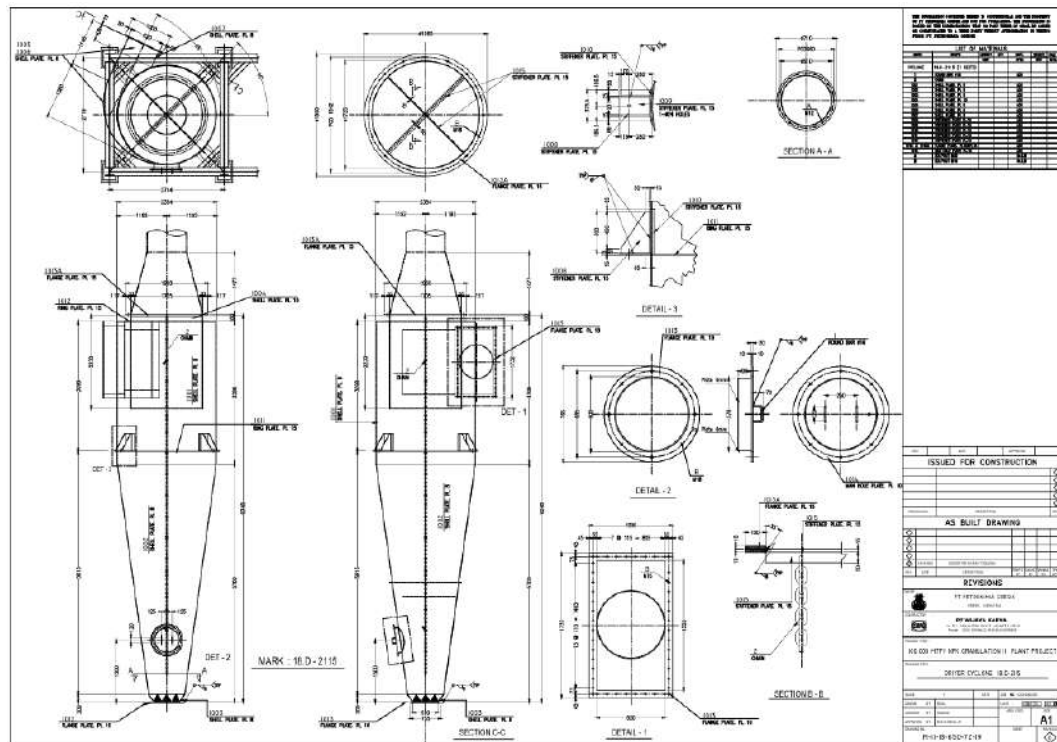
(Perry & Green, 2008)

IX.3.3 Pemodelan Geometri Cyclone 18D–2115 pada ANSYS

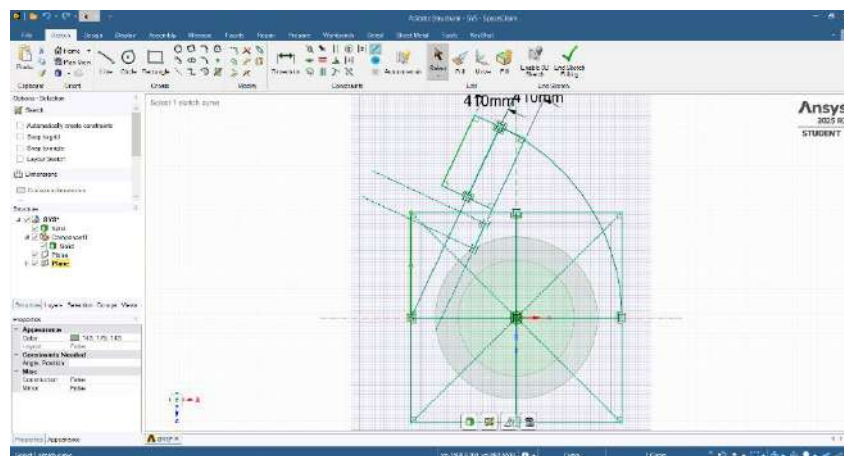
Uraian proses Geometri *cyclone* dimodelkan berdasarkan *as built drawing cyclone 18D–2115*, yang meliputi diameter badan *cyclone*, tinggi silinder, tinggi kerucut, diameter *inlet, outlet up*, serta dimensi *outlet down*. Pemodelan dilakukan secara parametrik di ANSYS SpaceClaim 2022 R1 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pembuatan Sketsa Awal (Sketch)

Sketsa geometri dasar *cyclone* dibuat pada bidang referensi menggunakan fitur *Sketch*. Dimensi sketsa ditentukan sesuai rasio desain *cyclone 18D–2115* agar konsisten dengan sumber *as built drawing*.



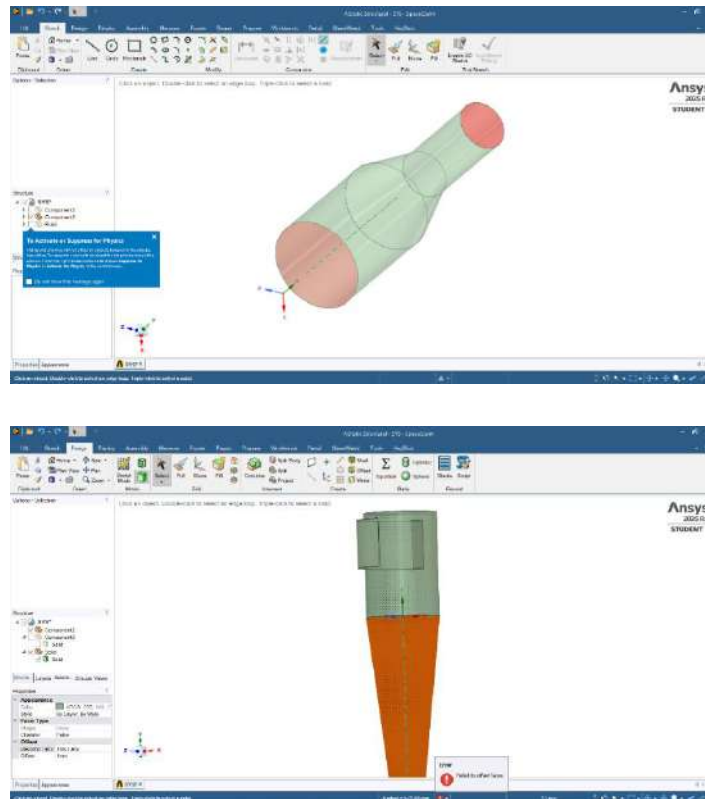
Gambar IX. 7 As Built Drawing Cyclone 18D – 2115



Gambar IX. 8 Sketsa Geometri Berdasarkan As Built Drawing Cyclone 18D–
2115

2. Pembentukan Badan Cyclone (Solid Body)

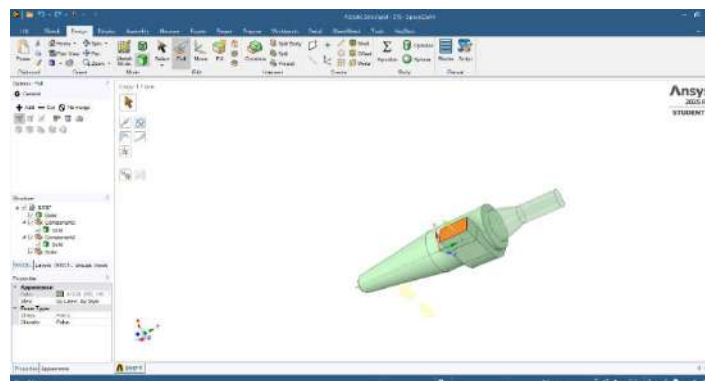
Sketsa dua dimensi dibuat dengan menggunakan fitur *Pull* untuk membentuk bagian silinder dan kerucut *cyclone* sebagai *solid body* tiga dimensi.

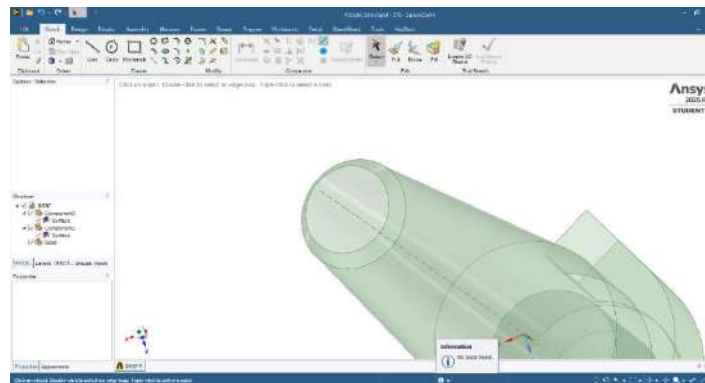


Gambar IX. 9 Pembuatan *Solid Body* 3 Dimensi dengan Fitur *Pull*

3. Pembuatan Inlet dan Outlet

Saluran *inlet*, *vortex finder* (*outlet up*), dan *outlet down* dibentuk dengan operasi *Pull* dan *Combine* sehingga menyatu dengan badan utama *cyclone*.

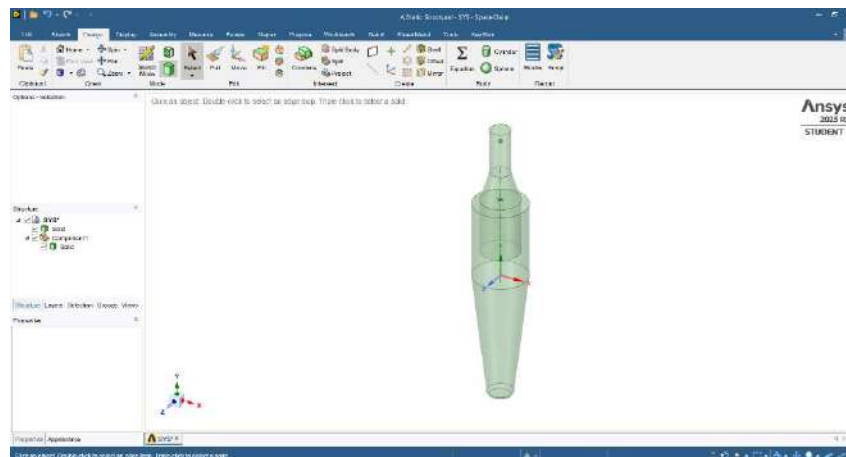




Gambar IX. 10 Pembuatan Inlet, Outlet Down dan Outlet Up

4. Operasi Boolean dan Penyempurnaan Geometri

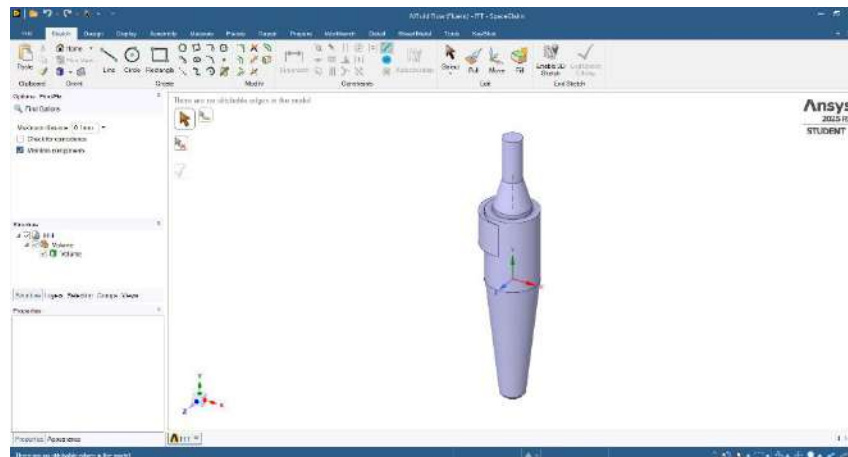
Operasi *Combine (Add/Subtract)* digunakan untuk memastikan seluruh bagian *cyclone* membentuk satu kesatuan *solid* tanpa tumpang tindih. Penyederhanaan geometri dilakukan dengan menghilangkan detail kecil yang tidak berpengaruh signifikan terhadap aliran fluida guna mengurangi kompleksitas *mesh*.



Gambar IX. 11 Satu Bagian Solid Cyclone

5. Ekstraksi Volume Cyclone (Extract Volume)

Geometri *cyclone* pada bagian *outlet up*, *outlet down* dan *inlet* digunakan sebagai *tool body* untuk mengetahui ruangan bervolume yang ingin di ekstrak, selanjutnya dipilih *surface* bagian dalam *cyclone* sehingga terbentuk volume yang merepresentasikan ruang *internal cyclone*.



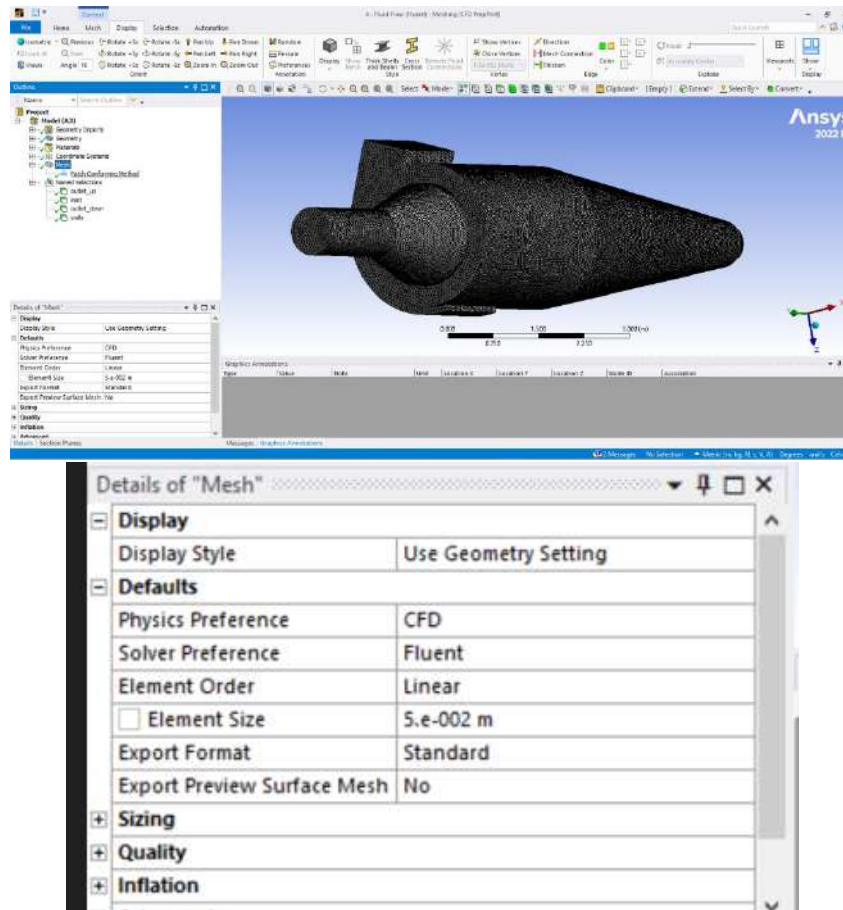
Gambar IX. 12 Volume *Internal Cyclone*

IX.3.4 Proses Meshing dan Penentuan Boundary Condition

Tahap *meshing* merupakan diskretisasi domain fluida menjadi elemen-elemen kecil agar persamaan pembangun (*governing equations*) dapat diselesaikan secara numerik. Pada simulasi ini, perangkat lunak ANSYS Meshing 2022 R1 digunakan untuk membentuk jaringan elemen pada geometri.

1. Jenis Mesh

Digunakan metode *patch conforming method* dengan tipe elemen *tetrahedrons* (segitiga empat sisi). Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam mengikuti kontur geometri yang kompleks, terutama pada bagian kerucut dan transisi inlet cyclone. Ukuran dasar elemen ditetapkan sebesar 5×10^{-2} meter (50 mm).

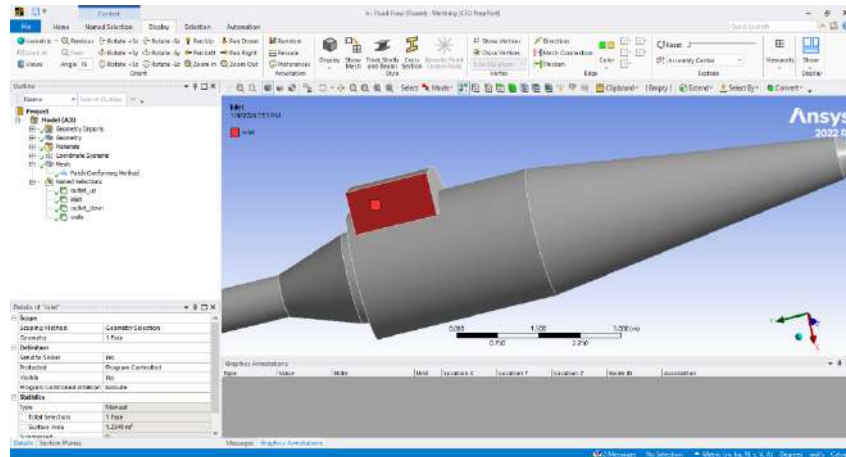


Gambar IX. 13 Penggunaan Metode *Patch Conforming Method* dengan Tipe Elemen *Tetrahedrons* (Segitiga Empat Sisi)

2. Penentuan Kondisi Batas (Boundary Condition)

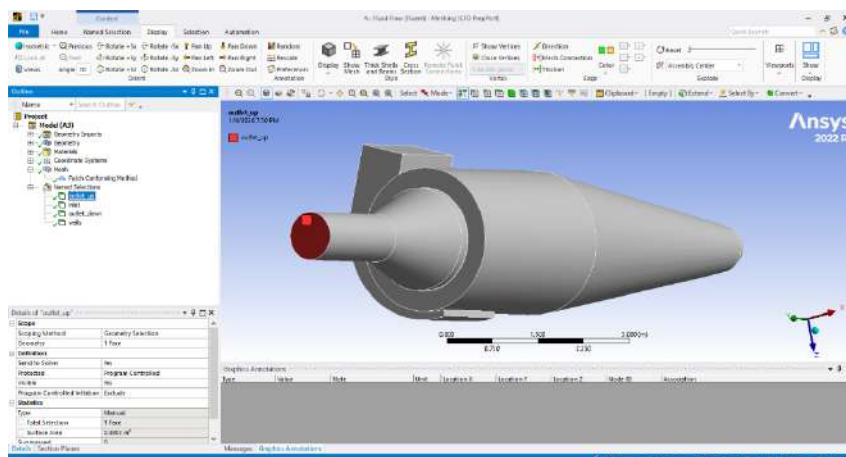
Penentuan *named selections* sangat krusial agar perangkat lunak solver (Fluent) dapat mengidentifikasi lokasi masuk, keluar, dan batasan fisik fluida. Berdasarkan pengaturan yang telah dilakukan, berikut adalah rincian kondisi batasnya:

- a. **Inlet:** Ditetapkan sebagai masukan kecepatan (*velocity inlet*) di mana fluida masuk secara tangensial untuk menciptakan efek pusaran (*vortex*).

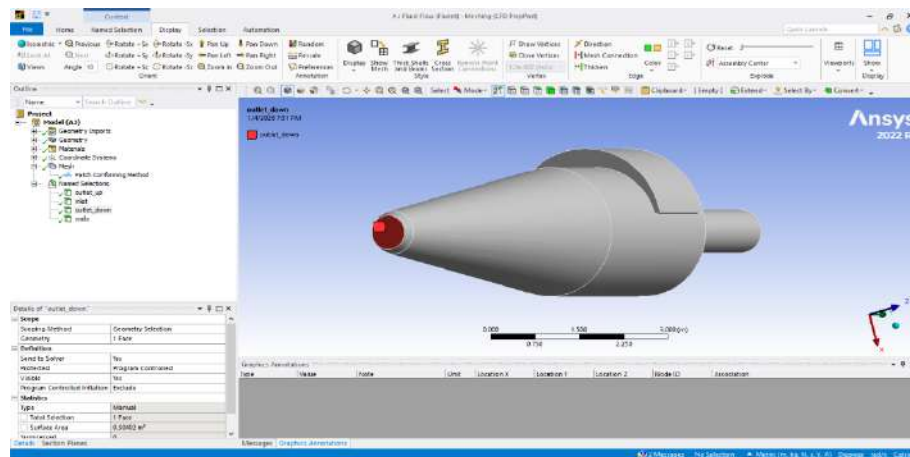


Gambar IX. 14 Inlet Cyclone

- b. **Outlet (Up & Down):** Keduanya ditetapkan sebagai keluaran tekanan (*pressure outlet*), biasanya pada tekanan atmosfer (0 Pa gauge), untuk memungkinkan fluida keluar dari sistem secara alami berdasarkan perbedaan tekanan.

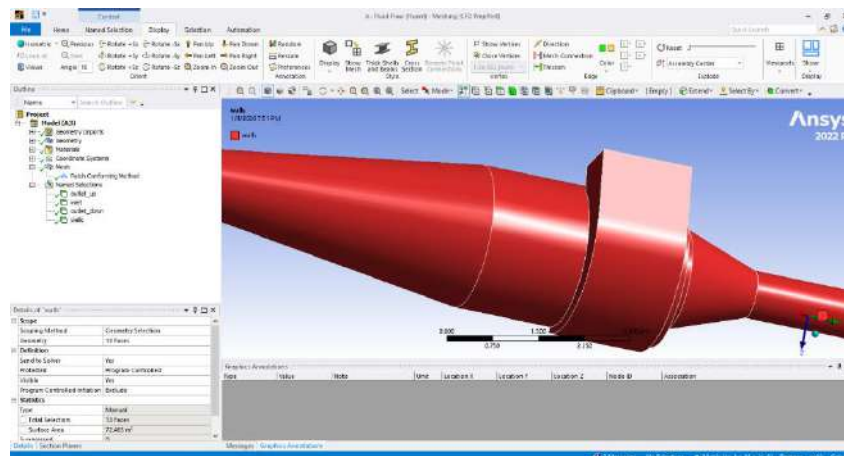


Gambar IX. 15 Outlet Up Cyclone



Gambar IX. 16 Outlet Down Cyclone

- c. **Walls:** Seluruh dinding menggunakan kondisi *no-slip condition*, yang berarti kecepatan fluida tepat di dinding adalah nol, untuk mensimulasikan gesekan antara fluida dan dinding alat.



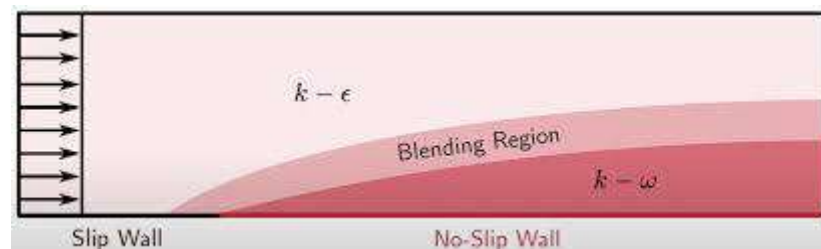
Gambar IX. 17 Walls Cyclone

IX.3.5 Model Aliran dan Partikel dalam Simulasi CFD

Pendekatan numerik dalam simulasi ini dilakukan untuk memahami karakteristik aliran fluida dan perilaku partikel di dalam *cyclone* secara mendalam. Penentuan model yang tepat sangat krusial untuk menghasilkan data yang merepresentasikan kondisi fisik aliran yang sebenarnya di lapangan.

1. Pemodelan Turbulensi (*Fluid Flow*)

Aliran udara di dalam cyclone memiliki karakteristik turbulensi yang sangat tinggi dengan pola pusaran (*swirling flow*) yang kompleks. Untuk menangani fenomena tersebut, simulasi ini menerapkan model turbulensi *Shear Stress Transport* (SST) $k - \omega$ ($k - \omega$). Model ini dipilih karena kemampuannya menggabungkan akurasi model $k - \omega$ ($k - \omega$) di area dekat dinding dengan stabilitas model $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$) pada aliran bebas di bagian tengah *cyclone*. Kestabilan hasil perhitungan dipantau melalui grafik *scaled residuals*, di mana konvergensi dianggap tercapai ketika seluruh variabel utama telah menunjukkan tren yang stabil dan melandai hingga iterasi terakhir.



Gambar IX. 18 Model Turbulensi $k - \omega$ ($k - \omega$) dan $k - \epsilon$ ($k - \epsilon$)
(Menter, 1994)

2. Pemodelan Fase Diskrit (*Discrete Phase Model*)

Pergerakan partikel debu di dalam domain dihitung menggunakan pendekatan Lagrangian *Discrete Phase Model* (DPM). Dalam metode ini, udara dianggap sebagai fase kontinu, sementara partikel debu dianggap sebagai fase diskrit yang lintasannya dipengaruhi oleh interaksi gaya hambat (*drag force*) dan gaya gravitasi. Partikel diinjeksikan melalui saluran masuk (*inlet*) dengan parameter fisik yang telah ditentukan untuk mengamati efisiensi pemisahan (Wang et al., 2006). Hasil pelacakan partikel di dalam cyclone diklasifikasikan ke dalam tiga kategori kondisi akhir, yaitu:

Trapped: Partikel yang berhasil sampai ke *outlet down* dan dianggap telah terpisah dari aliran udara.

Escaped: Partikel yang terbawa oleh pusaran udara dan keluar melalui saluran *outlet up*.

Incomplete: Partikel yang masih terjebak dalam aliran udara atau pusaran balik udara sehingga belum mencapai batas domain hingga batas langkah perhitungan berakhir.

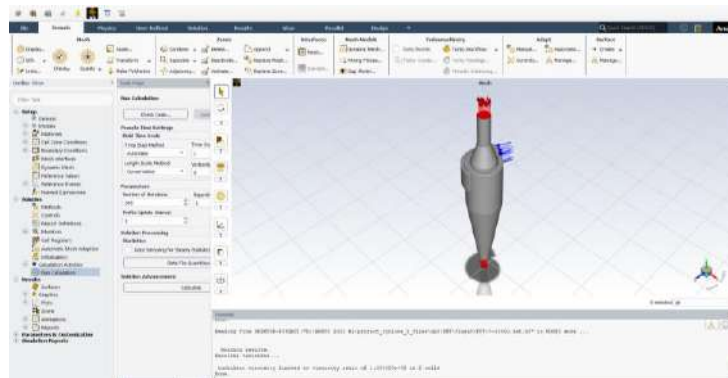
(Elsayed & Lacor, 2011)

IX.3.6 Tahapan Simulasi dan Validasi Model

Prosedur simulasi dilakukan secara sistematis untuk memastikan hasil yang diperoleh memiliki tingkat akurasi dan keterulangan (iteration) yang tinggi (Wang et al., 2006). Validasi model merupakan tahap krusial untuk membuktikan bahwa model numerik yang dibangun mampu merepresentasikan fenomena fisik pada unit *cyclone* yang sebenarnya (Elsayed and Lacor, 2011).

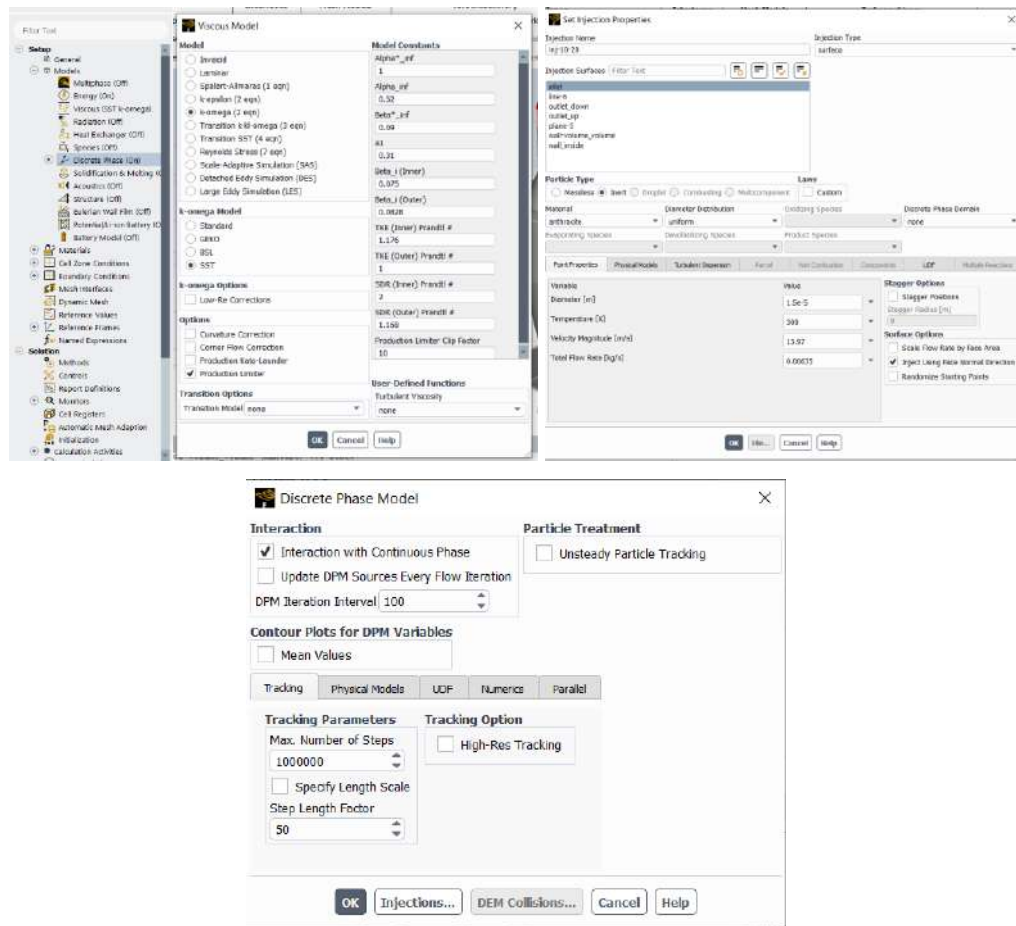
1. Tahapan Eksekusi Simulasi

Proses simulasi dimulai dengan tahap pra – pemrosesan yang meliputi pembentukan geometri dan diskritisasi domain menggunakan metode *meshing*.



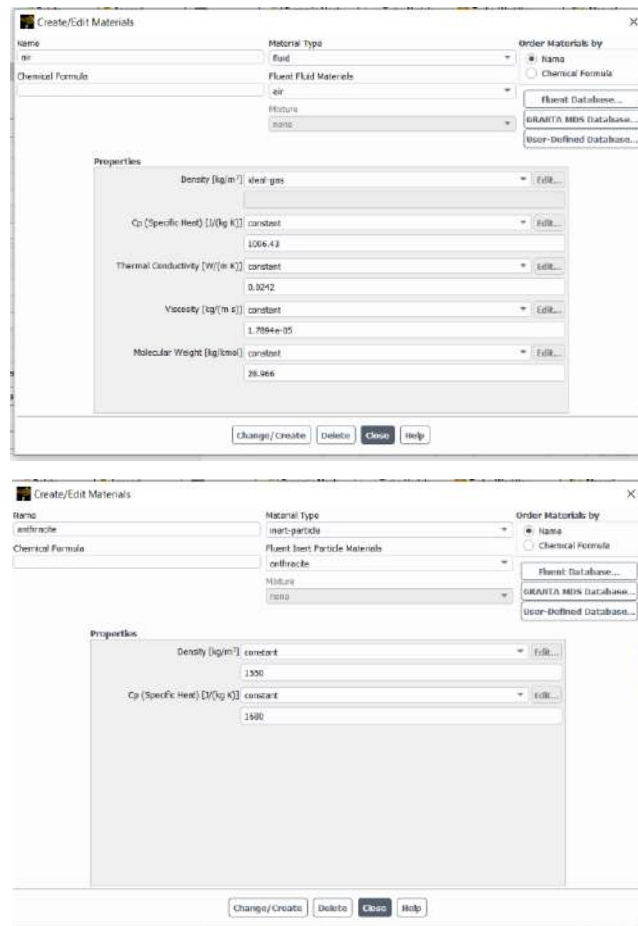
Gambar IX. 19 Pembentukan Geometri dan Diskritisasi Domain Menggunakan Metode Meshing

Selanjutnya, dilakukan pengaturan model fisik, kondisi batas (*boundary conditions*), dan pemilihan skema numerik di dalam perangkat lunak Ansys Fluent.



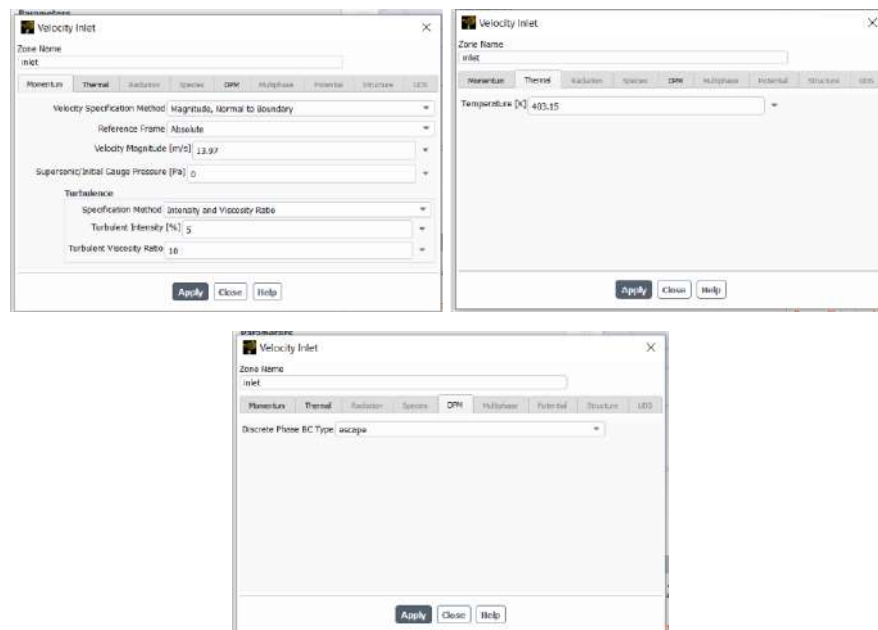
Gambar IX. 20 Pemilihan Set – Up Model

Tahap *set up model* diawali dengan memilih *Viscous Model* dengan pilihan *k-omega (2 eqn)* dengan pilihan *shear stress transport (SST)* untuk menentukan bagaimana perangkat lunak menghitung efek kekentalan (viskositas) fluida dan *Discrete Phase Model (DPM)* untuk mengaktifkan partikel injeksi debu, selanjutnya memasukkan parameter dari berbagai ukuran diameter debu diinjeksikan yaitu diameter partikel, temperature partikel, kecepatan aliran udara dan laju alir total



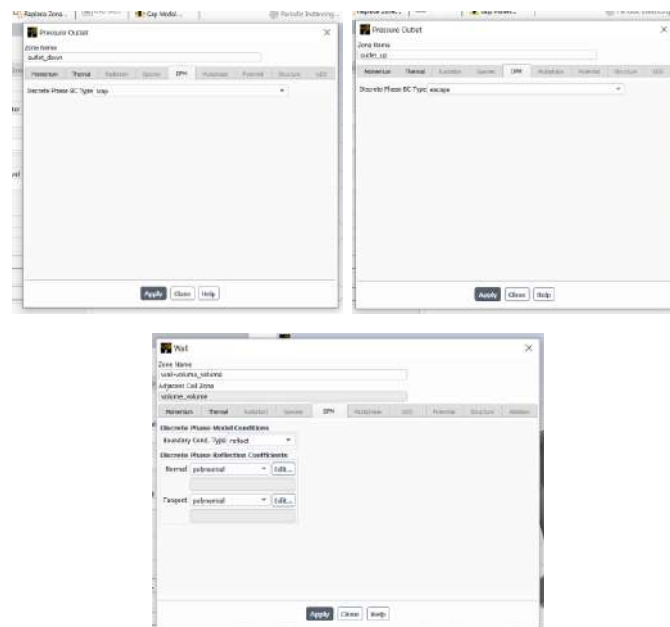
Gambar IX. 21 Parameter pada *Tab Materials*

Selanjutnya kembali kepada tab set up dan memilih material pengisi sebagai material fluida dan memasukkan parameter berupa densitas, kalor jenis, konduktivitas termal, viskositas dan berat molekul. Lalu material injeksi sebagai material inert dan memasukkan beberapa parameter yaitu densitas, dan nilai Cp (*Specific Heat*)



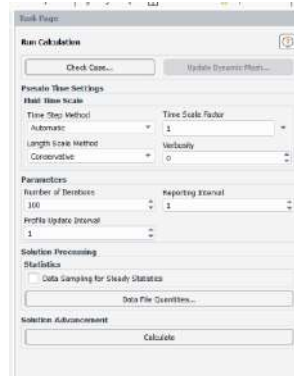
Gambar IX. 22 Parameter pada Boundary Conditions Inlet

Kembali pada *tab set up* pada *boundary conditions inlet*, memasukkan nilai kecepatan aliran udara keseluruhan dan temperatur, dan merubah setting *Discrete Phase Model (DPM)* menjadi *escape*



Gambar IX. 23 Parameter pada *Boundary Conditions Outlet Down*, *Outlet Up* dan *Wall*

Kembali pada *tab set up* pada *boundary conditions outlet down, outlet up* dan *wall*, merubah setting *Discrete Phase Model (DPM)* menjadi *trap* untuk *outlet down, escape* untuk *outlet up* dan *reflect* untuk *wall*



Gambar IX. 24 Pengaturan Skema Iterasi

Tahap perhitungan (solving) dijalankan hingga mencapai batas iterasi yang ditentukan untuk memastikan profil aliran udara telah berkembang sepenuhnya. Setelah fase fluida stabil, dilakukan pelacakan fasa diskrit (DPM) untuk mengamati lintasan partikel debu di dalam alat. Seluruh tahapan ini mengikuti prosedur standar pemodelan dinamika fluida komputasi untuk mendapatkan hasil yang kredibel (Wang et al., 2006).

2. Kriteria Konvergensi

Keakuratan hasil simulasi dipantau melalui kriteria konvergensi menggunakan parameter Scaled Residuals (Menter, 1994). Konvergensi dianggap tercapai ketika grafik residual untuk kontinuitas, momentum, dan variabel turbulensi telah menunjukkan tren yang stabil dan mendatar (Elsayed and Lacor, 2011). Penurunan nilai residual di bawah standar toleransi yang ditetapkan menjadi indikator bahwa kesalahan numerik telah diminimalisir. Kondisi stabil pada grafik residual ini menandakan bahwa hukum kekekalan massa dan momentum telah terpenuhi di dalam domain simulasi (Elsayed and Lacor, 2011).

3. Validasi Model dengan Data Aktual

Validasi dilakukan dengan membandingkan parameter performa hasil simulasi, seperti efisiensi pemisahan atau penurunan tekanan (pressure drop), dengan data aktual hasil pengujian eksperimental (Swamee et al., 2009). Model dinyatakan



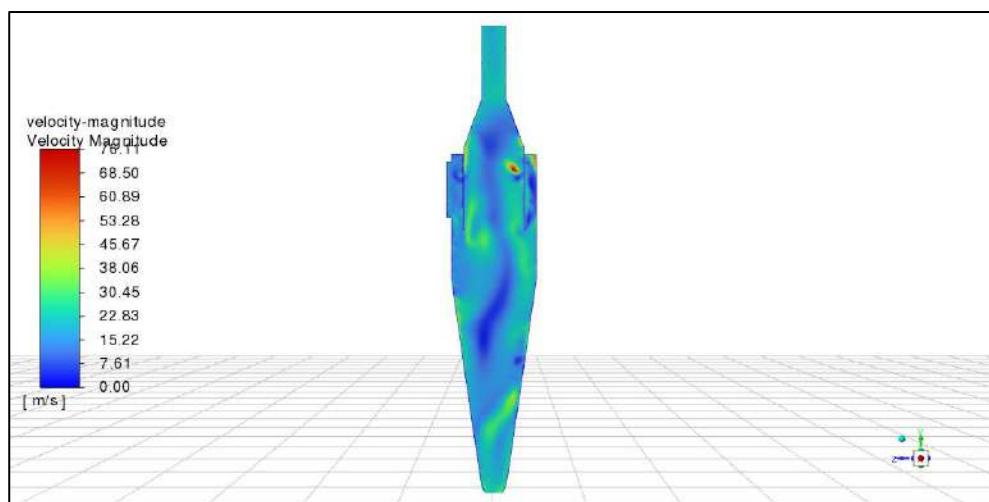
valid apabila deviasi atau persentase kesalahan antara hasil komputasi dan data eksperimen berada dalam rentang yang dapat diterima secara ilmiah (Elsayed and Lacor, 2011). Perbandingan ini memastikan bahwa interaksi antara fasa gas dan partikel debu di dalam model DPM telah mendekati kondisi operasional yang nyata (Wang et al., 2006). Hasil validasi yang sinkron memberikan dasar yang kuat untuk menggunakan model ini dalam analisis optimasi desain cyclone selanjutnya (Swamee et al., 2009).

IX.4 Hasil Simulasi Dan Pembahasan

IX.4.1 Distribusi Kecepatan dan Pola Aliran Udara dalam Cyclone

Analisis medan aliran udara pada cyclone dilakukan dengan membedah besaran kecepatan aliran udara total (magnitude) dan komponennya pada tiga sumbu utama (X, Y dan Z) untuk memahami mengenai profil kecepatan aliran udara sangat krusial karena gaya sentrifugal yang memisahkan partikel berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan tangensial.

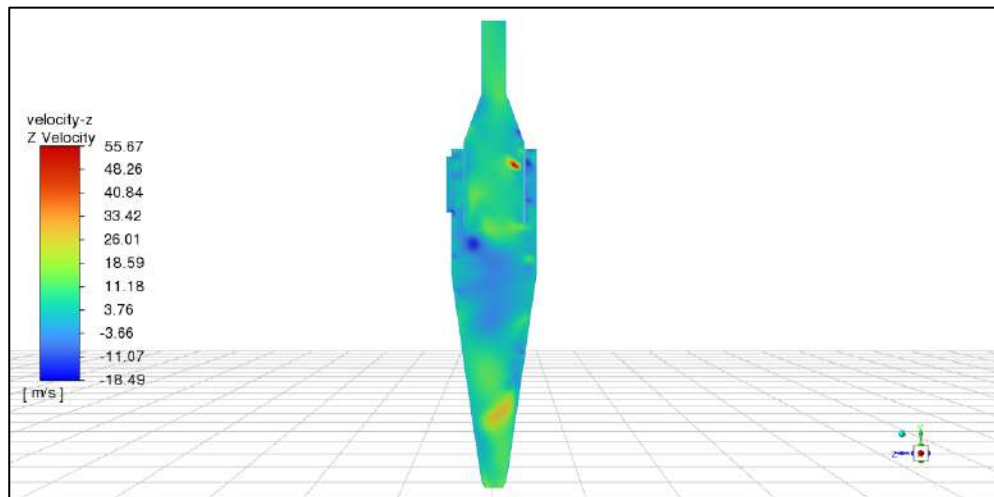
1. Analisis Velocity Magnitude (Kecepatan Aliran Udara Total)



Gambar IX. 25 Kontur Kecepatan Aliran Udara Total (*Velocity Magnitude*)

Berdasarkan kontur *velocity magnitude*, kecepatan aliran udara di dalam *cyclone* menunjukkan distribusi yang tidak seragam dengan nilai maksimal mencapai 76,11 m/s pada area *inlet*. Tingginya kecepatan aliran udara pada area masuk ini sangat penting untuk memberikan momentum awal yang cukup besar bagi partikel bermassa besar agar dapat segera bermigrasi ke arah dinding silinder. Di dalam ruang silinder setinggi 3398 mm, terlihat pola degradasi kecepatan yang teratur dari dinding menuju pusat, yang menandakan bahwa aliran gas mentransfer energi kinetiknya untuk membentuk struktur pusaran yang stabil (Elsayed & Lacor, 2011). Area biru di tengah kontur menunjukkan zona kecepatan rendah yang menjadi inti dari pusaran tersebut.

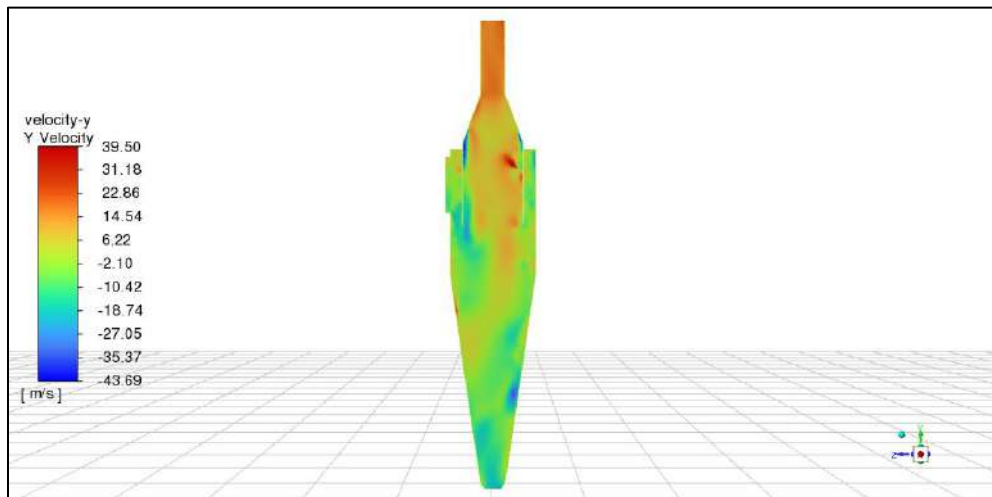
2. Analisis Kecepatan Aliran Udara Tangensial (Z-Velocity)



Gambar IX. 26 Kontur Kecepatan Aliran Udara Tangensial (Z-Velocity)

Komponen kecepatan aliran udara tangensial (sumbu Z) adalah parameter paling kritis yang menentukan keberhasilan pemisahan partikel dalam sistem cyclone. Kontur menunjukkan rentang kecepatan yang sangat lebar, yaitu dari -18,49 m/s hingga 55,67 m/s. Distribusi nilai positif dan negatif yang simetris pada bidang potong membuktikan terjadinya rotasi massa udara yang sempurna di sekeliling sumbu pusat. Kecepatan tangensial yang tinggi di dekat dinding menciptakan gaya sentrifugal yang mendominasi gaya hambat (drag force) fluida (Wang et al., 2006), sehingga partikel debu terlempar keluar dari aliran utama dan menabrak dinding silinder

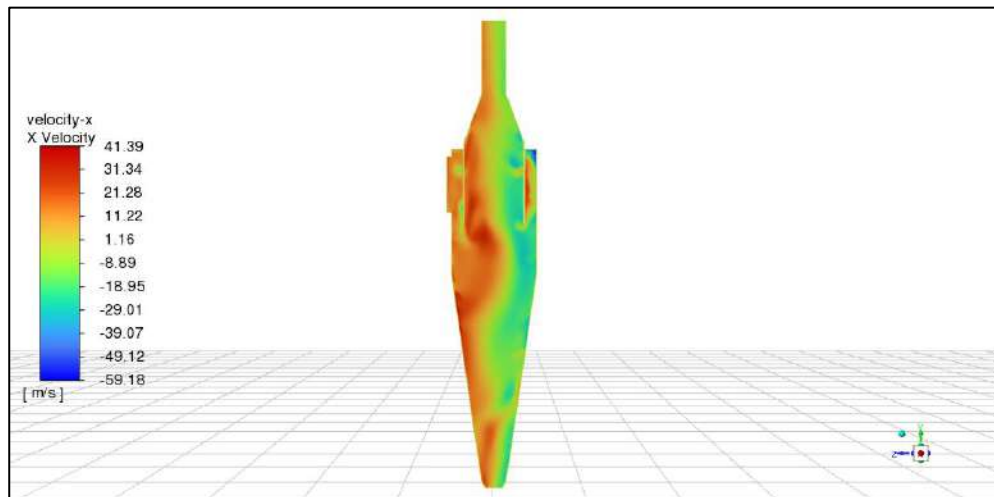
3. Analisis Kecepatan Aksial (Y-Velocity)



Gambar IX. 27 Kontur Kecepatan Aliran Udara Aksial (Y-Velocity)

Kontur kecepatan aliran udara aksial (sumbu Y) memberikan gambaran visual mengenai fenomena *double vortex* yang terjadi di dalam unit. Hasil simulasi menunjukkan rentang nilai antara -43,69 m/s hingga 39,50 m/s. Nilai negatif yang dominan di pusat sumbu (warna biru) merepresentasikan *inner vortex* atau aliran udara bersih yang bergerak naik secara vertikal menuju *outlet up* (*vortex finder*). Sebaliknya, nilai positif di area dekat dinding menunjukkan *outer vortex* yang membawa partikel debu turun menuju *outlet down* (Hoekstra et al., 1999).

4. Analisis Kecepatan Radial (X-Velocity)



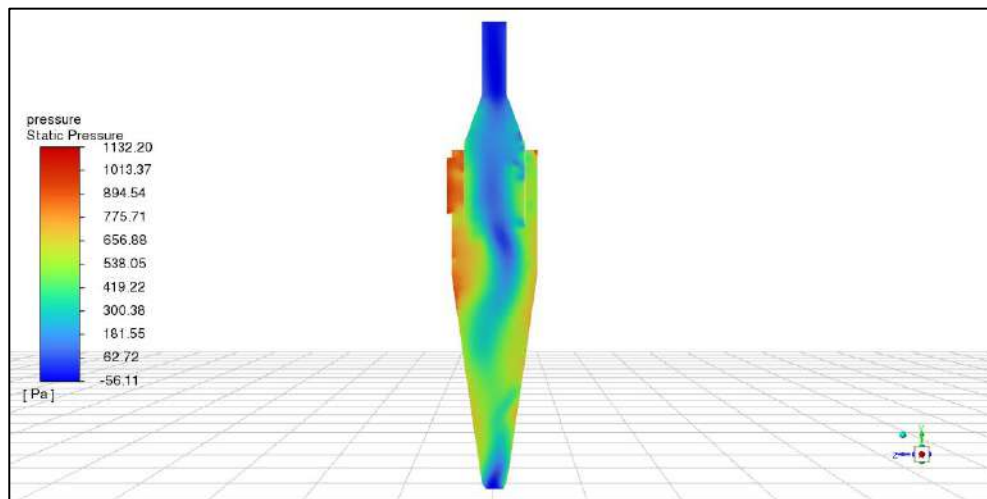
Gambar IX. 28 Kontur Kecepatan Aliran Udara Radial (*X-Velocity*)

Kecepatan aliran udara radial mencerminkan laju aliran yang memotong garis arus menuju pusat atau dinding. Pada unit berdiameter 2384 mm, kecepatan radial tercatat berada pada rentang -59,18 m/s hingga 41,39 m/s. Meskipun komponen ini secara numerik sering kali lebih kecil pengaruhnya dibanding kecepatan aliran udara tangensial, kestabilan aliran radial sangat penting untuk mencegah fenomena *re-entrainment*, yaitu kondisi di mana partikel yang sudah berada di dekat dinding terhisap kembali ke pusat pusaran (Gronald & Derksen, 2011). Gambar yang dihasilkan menunjukkan bahwa gradien tekanan di dalam silinder cukup kuat untuk mempertahankan partikel tetap pada jalurnya menuju *outlet down*.

IX.4.2 Distribusi Tekanan dan Pressure Drop Cyclone

Evaluasi profil tekanan di dalam *cyclone* dilakukan untuk menentukan beban kerja sistem dan stabilitas pusaran aliran. Distribusi tekanan statik merupakan indikator kunci dalam memahami transformasi energi kinetik menjadi energi tekan di dalam domain fluida.

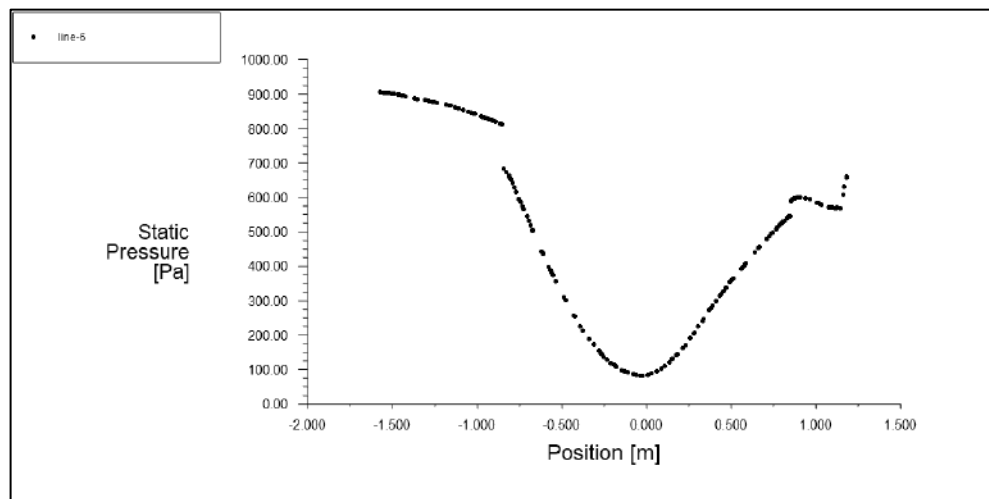
1. Analisis Profil Tekanan Statis dan Stabilitas Vortex Core



Gambar IX. 29 Kontur Tekanan Statik

Berdasarkan visualisasi kontur tekanan statik pada bidang potong vertikal, terlihat gradasi tekanan yang sangat jelas dari arah dinding menuju pusat silinder. Nilai tekanan tertinggi terdeteksi pada area dekat dinding silinder dengan nilai mencapai 1132,20 Pa. Sebaliknya, tekanan menurun secara drastis hingga mencapai nilai minimum sebesar -56,11 Pa di pusat sumbu silinder, yang mengindikasikan terbentuknya zona vakum relatif atau inti vorteks (*vortex core*). Penurunan tekanan ke arah pusat ini menciptakan gradien tekanan radial yang berfungsi sebagai gaya sentripetal, mengimbangi gaya sentrifugal partikel sehingga aliran gas tetap berputar secara stabil di dalam ruang silinder yang luas (Wang et al., 2006).

2. Evaluasi Pressure Drop



Gambar IX. 30 Grafik Distribusi Tekanan Statik

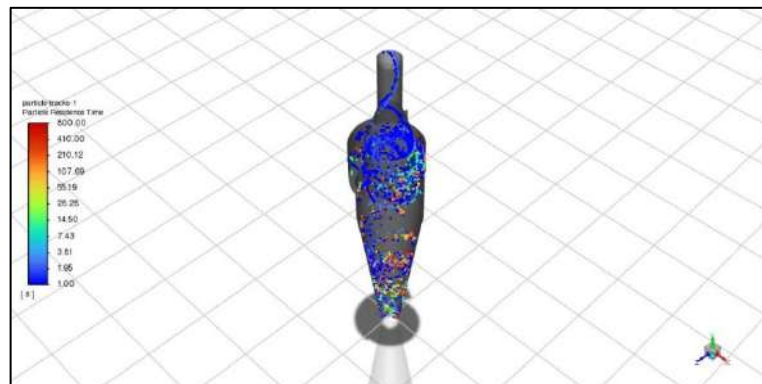
Grafik menunjukkan penurunan tekanan yang konsisten dari arah dinding silinder menuju pusat sumbu. Karakteristik profil berbentuk "U" ini merupakan indikator standar keberadaan *vortex* yang stabil di dalam *cyclone* (Hoekstra et al., 1999). Titik terendah pada grafik berada tepat pada posisi 0.000 m (pusat sumbu), dengan nilai tekanan statik terukur sebesar 80.00 hingga 100.00 Pa. Penurunan drastis ini mengonfirmasi terjadinya percepatan aliran tangensial yang tinggi di pusat, menciptakan zona vakum yang menarik udara bersih naik menuju *outlet up* (*vortex finder*). Tekanan meningkat secara signifikan saat menjauh dari pusat menuju dinding ($x = \pm 1.192$ m), mencapai nilai di atas 900.00 Pa pada sisi kiri dan sekitar 650.00 Pa pada sisi kanan. Asimetri kecil pada puncak tekanan ini sering kali dipengaruhi oleh turbulensi di dekat area *inlet* atau pengaruh geometri inlet (Wang et al., 2006).

3. Implikasi Terhadap Konsumsi Energi Blower

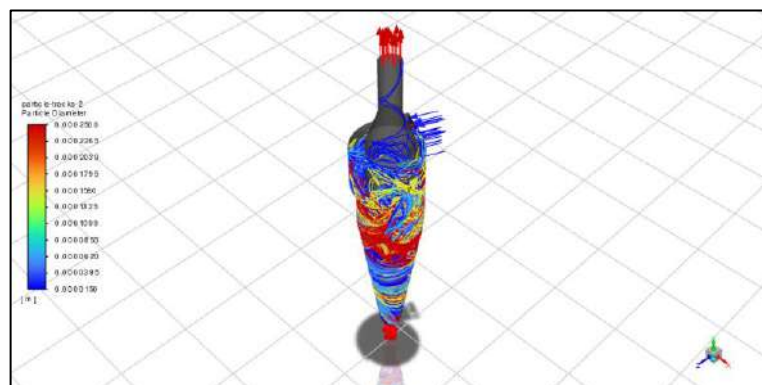
Data kuantitatif yang diperoleh dari grafik distribusi tekanan statik pada Gambar IX.30 memberikan dasar untuk estimasi beban kerja *blower* secara lebih akurat. Distribusi gradien tekanan secara radial mengindikasikan besarnya kebutuhan daya dorong mekanis yang diperlukan *blower* untuk menjaga stabilitas formasi pusaran (*vortex*) di dalam tabung. Efisiensi energi pada unit berdiameter besar ini tercapai karena profil tekanan menunjukkan transisi yang stabil tanpa adanya

fluktuasi tajam, sehingga kerugian energi akibat gesekan internal fluida dapat diminimalisir (Elsayed & Lacor, 2011). Nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) maksimal sebesar 1132,19 Pa merepresentasikan total hambatan aliran yang harus diatasi oleh daya hisap (*suction*) atau tiup (*discharge*) dari sistem *blower*. Mengingat dimensi unit yang dikategorikan untuk skala industri, nilai (ΔP) tersebut menunjukkan efisiensi desain yang optimal karena tidak menciptakan beban berlebih pada motor penggerak pada *blower*. Keseimbangan desain ini terbukti efektif, di mana hambatan aliran tetap rendah namun sistem tetap mampu menghasilkan kecepatan tangensial maksimal hingga 76,1 m/s yang krusial untuk efektivitas pemisahan partikel (Elsayed & Lacor, 2011).

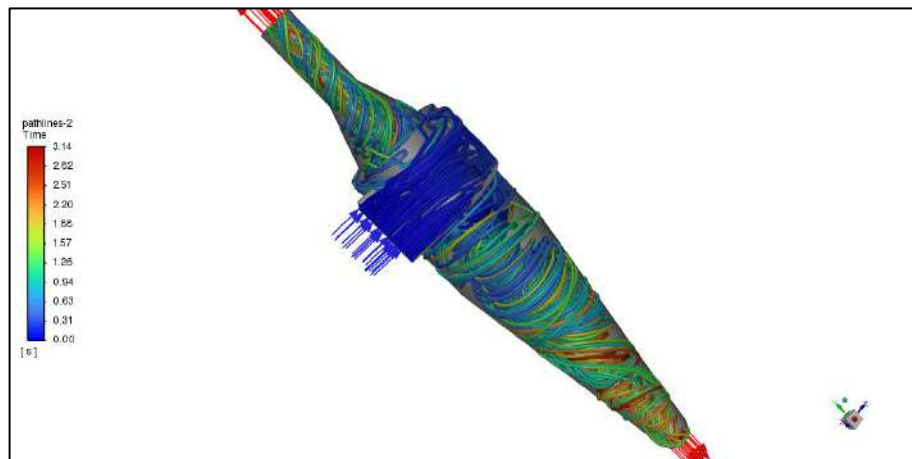
IX.4.3 Perilaku Partikel Debu dalam Cyclone



Gambar IX. 31 Pola Aliran Partikel Menggunakan *Point Track Style*



Gambar IX. 32 Pola Aliran Partikel Menggunakan *Line Track Style*

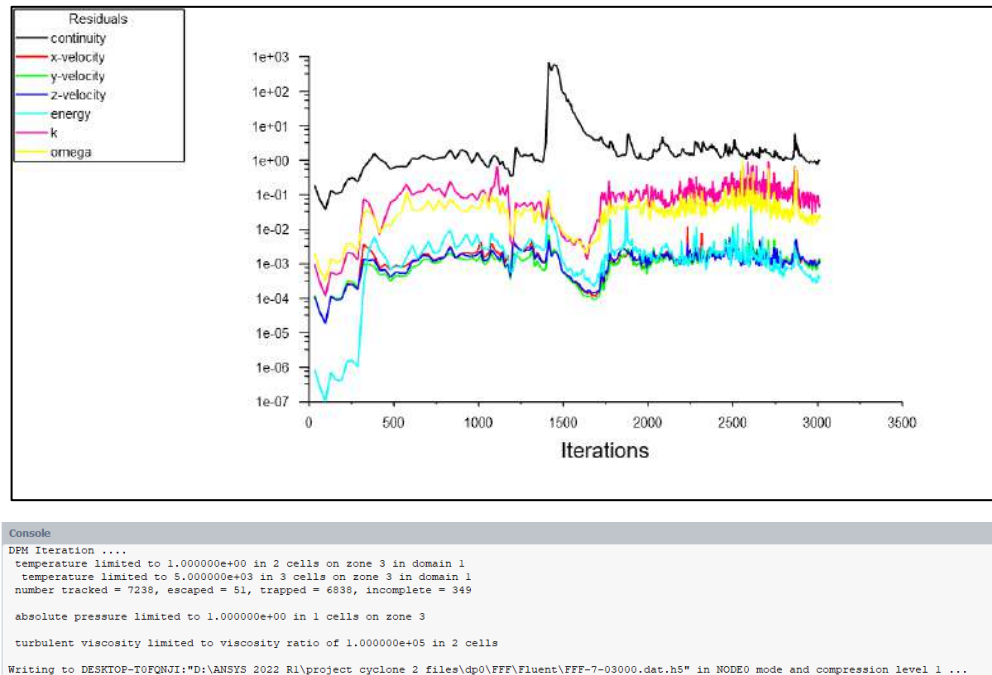


Gambar IX. 33 Pola Aliran Udara

Berdasarkan hasil simulasi lintasan partikel, teramati bahwa partikel debu yang diinjeksikan secara tangensial ke dalam *cyclone* membentuk pola aliran spiral mengikuti pusaran luar (*outer vortex*) menuju bagian *outlet down*. Kecepatan tangensial gas yang tinggi menyebabkan gaya sentrifugal mendorong partikel-partikel debu menuju dinding *cyclone*. Hal ini menciptakan zona penangkapan partikel berdiameter besar yang optimal, di mana partikel kehilangan momentum liniernya akibat gesekan dengan dinding *cyclone* dan jatuh menuju saluran pembuangan bawah (*outlet down*). Parameter waktu tinggal (*residence time*) mengonfirmasi bahwa partikel yang berhasil tertangkap (*trapped*) memiliki durasi waktu tinggal yang lebih lama di dalam *cyclone* sebelum mencapai *outlet down*, yang menandakan efektivitas lintasan spiral dalam proses pemisahan.

Hasil dari pemodelan juga menunjukkan adanya fenomena *re-entrainment*, yaitu terangkatnya kembali partikel berukuran halus oleh aliran pusaran dalam (*inner vortex*) menuju saluran *vortex finder*. Fenomena ini dibuktikan melalui data statistik *Discrete Phase Model* (DPM) yang melaporkan sebanyak 51 partikel berstatus *escaped* melalui *outlet up*. Hal ini terjadi akibat gaya hambat (*drag force*) yang melampaui gaya sentrifugal pada partikel dengan diameter kecil $< 15 \mu\text{m}$ sehingga partikel tersebut tertarik ke area inti (Elsayed & Lacor, 2011). Stabilitas pergerakan partikel pada lintasan luar didukung oleh distribusi tekanan statis yang mencapai puncaknya pada nilai 1132,20 Pa di area dinding bodi, yang memberikan dorongan agar partikel tidak terhisap ke area inti yang turbulen.

IX.4.4 Evaluasi Efektivitas Cyclone terhadap Debu Kasar dan Halus



Gambar IX. 34 Hasil Perhitungan Iterasi

Berdasarkan hasil rekapitulasi pelacakan partikel (*particle tracking*) menggunakan *Discrete Phase Model* (DPM) pada jendela *console*, simulasi dilakukan dengan menginjeksikan total 7238 partikel ke dalam domain komputasi. Distribusi nasib partikel (*particle fate*) menunjukkan efektivitas pemisahan yang signifikan, di mana dominasi gaya sentrifugal berhasil mengarahkan mayoritas partikel menuju dinding pengumpul.

Secara spesifik, sebanyak 6838 partikel tercatat berstatus *trapped* (tertangkap) pada *outlet down*. Angka ini merepresentasikan partikel debu kasar yang memiliki inersia cukup besar untuk memisahkan diri dari garis arus gas (*streamline*) dan meluncur turun ke *outlet down*.

$$\eta = \frac{N_{\text{tracked}}}{N_{\text{trapped}}} \times 100\%$$

Keterangan :

η : Efisiensi

N_{tracked} : Partikel yang terinjeksi

N_{tracked} : Partikel yang tertahan

(Wang et al., 2006).

$$\eta = \frac{7238}{6838} \times 100\%$$

$$\eta = 94,47\%$$

Jika dikalkulasikan, efisiensi penangkapan (*collection efficiency*) pada simulasi ini mencapai **94,47%**, yang dihitung berdasarkan rasio partikel tertangkap terhadap total partikel yang dilacak. Tingginya angka ini mengindikasikan bahwa desain *cyclone* bekerja sangat optimal untuk distribusi ukuran partikel yang diujikan.

Namun, terdapat 51 partikel yang berstatus *escaped* (lolos) melalui saluran pembuangan gas bersih (*vortex finder*) dan menuju *outlet up*. Partikel-partikel ini diasumsikan sebagai debu berukuran sangat halus (*fine particles*) di mana gaya hambat (*drag force*) dari aliran gas lebih dominan dibandingkan gaya sentrifugal, sehingga partikel tersebut ikut terbawa naik oleh pusaran dalam (*inner vortex*) (Rhodes, 2008).

Selain itu, simulasi juga mencatat adanya 349 partikel dengan status *incomplete*. Status ini menunjukkan bahwa partikel-partikel tersebut masih berada di dalam domain simulasi ketika batas langkah waktu maksimum (*max number of steps*) tercapai. Hal ini mengindikasikan adanya zona resirkulasi atau turbulensi lokal di dalam bodi *cyclone* yang menyebabkan sebagian partikel terperangkap dalam pusaran yang berputar-putar tanpa segera keluar menuju *trap* maupun *escape*.

IX.4.5 Dampak Kinerja Cyclone terhadap Sistem Scrubbing

Kinerja cyclone pada sistem dedusting Unit NPK Granulasi II memiliki pengaruh langsung terhadap beban kerja dan efektivitas unit *scrubbing* yang berada di bagian hilir proses pengolahan gas buang (Cooper & Alley, 2011). *Cyclone*



berfungsi sebagai pemisah awal (*primary separator*) yang bertujuan menghilangkan fraksi debu kasar dari aliran gas sebelum gas tersebut dialirkan ke *scrubber room*, sehingga beban partikulat pada unit *scrubbing* dapat ditekan sejak tahap awal (Perry & Green, 2008).

Penurunan efisiensi *cyclone* menyebabkan sebagian debu kasar yang seharusnya terpisah ikut terbawa menuju sistem *scrubbing* bersama aliran gas (Strauss, 1975). Kondisi ini mengakibatkan meningkatnya *loading* partikulat pada *scrubber*, yang berdampak pada kenaikan konsumsi air semprot, peningkatan pembentukan *slurry*, serta potensi terjadinya *fouling* dan *plugging* pada *spray nozzle* maupun saluran *slurry* (Cooper & Alley, 2011). Beban padatan yang berlebih juga dapat menurunkan efektivitas kontak gas-cair di dalam *scrubber*, sehingga efisiensi penangkapan debu halus menjadi tidak optimal (Crowe et al., 2012).

Sebaliknya, *cyclone* yang beroperasi dengan kinerja pemisahan yang baik akan memastikan bahwa hanya debu halus yang masuk ke *scrubber room* untuk ditangani oleh sistem *scrubbing* basah (Perry & Green, 2008). Debu halus tersebut akan tertangkap oleh air semprot dan membentuk *slurry* dengan karakteristik yang lebih stabil serta mudah dikendalikan secara operasional (Strauss, 1975). *Slurry* hasil proses *scrubbing* ini selanjutnya dimanfaatkan kembali sebagai bagian dari aliran *slurry* yang mendukung proses granulasi pada unit granulator, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan material dan mengurangi pembentukan limbah padat baru (Cooper & Alley, 2011).

Selain mempengaruhi pembentukan *slurry*, kinerja *cyclone* juga berpengaruh terhadap stabilitas aliran dan distribusi tekanan gas menuju unit *scrubbing* (Leith & Licht, 1972). *Cyclone* yang beroperasi pada kapasitas dan *pressure drop* yang sesuai akan menghasilkan aliran gas yang lebih seragam, sehingga distribusi gas dan air semprot di dalam *scrubber* menjadi lebih merata (Perry & Green, 2008). Kondisi ini penting untuk mencegah terjadinya *short-circuiting* aliran gas yang dapat menurunkan efisiensi penangkapan partikulat dan meningkatkan potensi emisi debu ke atmosfer melalui *stack* (Cooper & Alley, 2011).



Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kinerja *cyclone* tidak hanya menentukan keberhasilan pemisahan debu kasar, tetapi juga sangat mempengaruhi performa unit *scrubbing* dan unit *downstream* lainnya secara keseluruhan (Strauss, 1975).



IX.5 Kesimpulan dan Rekomendasi

IX.5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisis kinerja *cyclone* dan sistem *dedusting* pada Unit NPK Granulasi II PT Petrokimia Gresik, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem *dedusting* Unit NPK Granulasi II berperan penting dalam mengendalikan emisi debu yang dihasilkan dari peralatan proses seperti *crusher*, *rotary dryer*, *rotary cooler*, dan *dozometer*. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai pengendali pencemaran udara, tetapi juga mendukung efisiensi proses produksi melalui pemanfaatan kembali debu hasil pemisahan ke dalam sistem granulasi
2. *Cyclone* 18D–2115 berfungsi sebagai pemisah awal (*primary separator*) yang efektif untuk memisahkan debu kasar dengan memanfaatkan gaya sentrifugal. Debu kasar yang terpisah dikembalikan ke proses produksi sebagai material *recycle*, sedangkan debu halus diteruskan ke unit *scrubbing* untuk penanganan lanjutan
3. Berdasarkan data operasi aktual, *cyclone* bekerja pada kecepatan gas inlet 10–20 m/s dengan estimasi efisiensi pemisahan sekitar 85%, sehingga masih berada dalam rentang kinerja yang sesuai dengan literatur desain *cyclone* industri.
4. Kinerja *cyclone* memiliki keterkaitan langsung dengan performa unit downstream, khususnya *scrubber room*. *Cyclone* yang beroperasi optimal mampu menurunkan beban partikulat ke *scrubber room*, sehingga mengurangi pembentukan *slurry* berlebih, konsumsi air, serta potensi *fouling* pada sistem *scrubbing*.
5. Pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan ANSYS Fluent 2022 terbukti efektif untuk memvisualisasikan distribusi kecepatan, tekanan, dan lintasan partikel di dalam *cyclone*. Hasil simulasi CFD menggunakan ANSYS Fluent memperkuat evaluasi teoritis, di mana pelacakan partikel (DPM) menunjukkan efisiensi penangkapan mencapai **94,47%**. Dari total 7.238 partikel yang diinjeksi, sebanyak

6.838 partikel tertangkap (*trapped*) sebagai debu kasar, sedangkan sebagian kecil partikel halus lolos ke *outlet up* dan menuju unit *scrubbing*. Simulasi ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap fenomena aliran internal yang sulit diamati secara langsung di lapangan.

6. Secara keseluruhan, evaluasi menunjukkan bahwa *cyclone* pada sistem *dedusting* Unit NPK Granulasi II masih mampu menjalankan fungsinya, namun optimalisasi tetap diperlukan untuk menjaga kestabilan operasi dan meningkatkan efisiensi sistem secara berkelanjutan.

IX.5.2 Rekomendasi

1. Optimasi kondisi operasi *cyclone* perlu dipertahankan, khususnya kecepatan inlet gas pada rentang 10–20 m/s agar efisiensi pemisahan tetap tinggi tanpa meningkatkan *pressure drop* yang berlebihan dan membebani *blower dedusting*.
2. Perlu dilakukan pemantauan rutin terhadap distribusi ukuran partikel debu, terutama fraksi debu halus ($<10\ \mu\text{m}$) yang berpotensi lolos dari *cyclone*, guna memastikan beban *scrubber room* tetap dalam batas desain dan tidak menurunkan efektivitas sistem *scrubbing*.
3. Evaluasi periodik terhadap *pressure drop cyclone* dan *ducting* disarankan untuk mendeteksi dini adanya *fouling* dan ketidakseimbangan aliran yang dapat menurunkan performa *blower* dan efisiensi hisapan di area proses
4. Pemanfaatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebaiknya dilanjutkan sebagai alat evaluasi lanjutan, terutama untuk mengkaji potensi modifikasi geometri *cyclone*, posisi *inlet*, atau *outlet* guna menekan *re-entrainment* partikel dan meningkatkan pemisahan debu kasar secara lebih konsisten.