

BAB I

PENDAHULUAN

Bab satu pendahuluan berisi mengenai latar belakang penelitian yang mendasari pemilihan topik, rumusan masalah yang menjadi fokus utama kajian, tujuan penelitian yang ingin dicapai, manfaat penelitian baik secara teoritis maupun praktis, batasan penelitian untuk menjaga fokus pembahasan, serta sistematika penulisan penelitian yang berguna untuk memberikan gambaran alur skripsi secara keseluruhan.

1.1 Latar Belakang

Dalam berbagai sektor strategis seperti industri semen, pembangkit listrik, hingga unit pengolahan kimia dan pupuk, proses pemisahan partikel padat dari aliran gas merupakan tahapan kritis untuk menjaga efisiensi produksi dan memenuhi standar emisi lingkungan. Perangkat yang paling umum diandalkan untuk kebutuhan ini adalah *cyclone separator*, sebuah alat pemisahan mekanis statis yang memanfaatkan tarikan gaya sentrifugal untuk memisahkan material debu tanpa memerlukan komponen penyaring yang bergerak. Keandalan alat pengendali polusi ini sangat bergantung pada interaksi mekanika fluida dan partikel di dalam bodi silindernya.

Salah satu implementasi nyatanya terdapat pada unit *single cyclone separator* di PT Petrokimia Gresik yang dirancang khusus untuk menangani aliran udara bermuatan debu pupuk. Unit ini beroperasi dengan kapasitas laju alir normal yang sangat masif, yakni sebesar $52.000 \text{ Am}^3/\text{h}$ pada rentang suhu $40\text{--}55^\circ\text{C}$ operasional. Adapun fase diskrit atau partikel target yang dipisahkan memiliki ukuran rata-rata 20 mikron dengan densitas konstan sebesar 1.150 kg/m^3 . Namun, dalam praktiknya saat ini, unit *existing* tersebut menghadapi kendala operasional yang serius akibat ketidakseimbangan parameter performa alat yang jauh dari kriteria desain optimal.

Kendala operasional utama bermula dari sangat rendahnya hambatan tekanan atau *pressure drop* pada desain *existing* alat, yang tercatat hanya sebesar 39,8 mmH₂O. Rendahnya nilai kerugian tekanan ini mengindikasikan bahwa kecepatan aliran pusaran gas di dalam bodi siklon sangatlah lemah. Akibatnya, energi gaya sentrifugal yang dihasilkan tidak mampu memberikan dorongan yang cukup kuat untuk memaksa partikel debu pupuk jatuh sepenuhnya ke saluran penampung. Kelemahan momentum dorong ini justru memicu fenomena stagnasi partikel pada area dinding kerucut (*cone*), yang perlahan membentuk deposisi permanen dan secara fatal menyumbat saluran pengeluaran bawah (*dust outlet*).

Secara fundamental, parameter keberhasilan operasional dari sebuah *cyclone separator* dievaluasi berdasarkan dua indikator kinerja utama, yaitu persentase efisiensi pengumpulan partikel dan tingkat kerugian penurunan tekanan (*pressure drop*). Keseimbangan kinerja pemisahan ini sangat dikendalikan oleh karakteristik siklon itu sendiri, baik dari segi karakteristik geometris seperti rasio dimensi bodi silinder terhadap saluran masuk (*inlet*) dan saluran keluar (*vortex finder*) maupun karakteristik hidrodinamika alirannya yang dicirikan oleh fenomena pusaran ganda (*double vortex*). Perubahan sekecil apa pun pada karakteristik dimensi geometri tersebut akan secara drastis mengubah struktur kecepatan aliran gas, khususnya pada distribusi kecepatan tangensial sebagai penghasil gaya sentrifugal dan kecepatan aksial sebagai pendorong partikel. Oleh karena itu, modifikasi rasio geometri menjadi langkah mutlak untuk mencari titik keseimbangan antara peningkatan gaya sapu aliran terhadap debu pupuk dan pembengkakan konsumsi energi pada *blower*.

Untuk mengatasi kesenjangan performa dan masalah penumpukan tersebut, diperlukan suatu analisis perbandingan yang menyeluruh antara konfigurasi geometri *existing* alat dengan berbagai variasi desain rasio empiris berstandar global, seperti tipe Stairmand, Swift, dan Lapple. Penelitian ini menerapkan pendekatan matematis teoretis yang mengombinasikan Metode Leith dan Mehta untuk memprediksi efisiensi separasi yang sensitif terhadap suhu termofisika gas, serta Metode Stairmand untuk kalkulasi rugi-rugi *pressure drop* secara mendetail. Sebagai tahap validasi akhir, rancangan geometri modifikasi yang berhasil mengunci target tekanan di rentang batas aman operasional pabrik (100–150 mmH₂O) akan diuji kelayakannya menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Simulasi komputasi yang ditenagai oleh model turbulensi *Reynolds Stress Model* (RSM) dan *Discrete Phase Model* (DPM) ini bertujuan untuk membuktikan secara visual bahwa modifikasi dimensi tersebut sukses mengeliminasi fenomena stagnasi debu di lapangan.

Sebagai hasil akhir, penelitian ini diharapkan mampu merekomendasikan desain geometri modifikasi yang paling komprehensif bagi PT Petrokimia Gresik. Desain terpilih tidak hanya dituntut untuk mengeliminasi fenomena stagnasi debu pupuk secara tuntas, tetapi juga harus menjaga lonjakan *pressure drop* agar tetap berada pada rentang spesifikasi aman motor *blower* pabrik (100–150 mmH₂O). Melalui pendekatan ini, industri dapat mengimplementasikan solusi teknis untuk mencegah penyumbatan permanen sekaligus meminimalkan pemborosan konsumsi energi, demi menjaga keandalan dan kontinuitas produksi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, terlihat adanya urgensi teknis untuk menyelaraskan desain geometri dengan efisiensi operasional pada alat pemisah. Mengingat adanya kompleksitas aliran di dalam unit *cyclone separator* serta kebutuhan untuk menemukan titik temu antara efisiensi penangkapan partikel dan minimalisasi kerugian tekanan, maka permasalahan mendasar dalam penelitian ini dapat dirumuskan ke dalam beberapa poin pertanyaan sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan kinerja efisiensi separasi dan *pressure drop* antara geometri *existing cyclone separator* dengan enam variasi desain standar (seperti Stairmand, Lapple, dan Swift) melalui perhitungan teoretis?
2. Bagaimana modifikasi desain geometri hasil seleksi komparatif mampu menaikkan *pressure drop* ke rentang spesifikasi aman pabrik (100–150 mmH₂O) sebagai titik keseimbangan (*trade-off*) untuk mencegah penumpukan debu?
3. Bagaimana perbandingan visualisasi fenomena aliran dan trajektori partikel antara desain *existing* dan desain modifikasi terpilih menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk membuktikan hilangnya masalah penumpukan debu?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan utama untuk membandingkan kinerja dari variasi geometri pada *single cyclone separator* sesuai dengan rumusan masalah yang telah ditetapkan.

1. Mengevaluasi dan membandingkan secara kuantitatif efisiensi serta *pressure drop* desain *existing* dengan desain baru melalui pendekatan analitis guna menemukan konfigurasi geometri *cyclone separator* yang lebih unggul.
2. Mendapatkan desain geometri modifikasi terbaik yang mampu menaikkan *pressure drop* ke rentang spesifikasi aman pabrik (100–150 mmH₂O). Peningkatan ini ditargetkan untuk menjaga titik keseimbangan (*trade-off*) kerugian energi (*losses*) agar daya hisap motor *blower* tidak terbebani.
3. Membuktikan secara visual melalui simulasi numerik bahwa desain geometri hasil seleksi komparatif tersebut mampu memitigasi fenomena stagnasi partikel pada dinding kerucut yang selama ini dikeluhkan operator.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup tertentu guna memastikan analisis tetap terarah, terukur, dan praktis secara teknis sesuai dengan kondisi operasional di industri. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:.

1. Fokus pada unit single *cyclone separator* tipe saluran masuk tangensial (*tangential inlet*) dengan konfigurasi silinder konik (*cone under cylinder layout*).
2. Analisis dibatasi pada tujuh rasio dimensi utama terhadap diameter bodi (D), yaitu: rasio tinggi inlet (a), lebar inlet (b), diameter outlet gas (D_e), panjang pipa outlet (S), tinggi silinder (h), tinggi total (H), dan diameter outlet debu (B).
3. Pemilihan parameter geometri dilakukan melalui pendekatan Studi Parametrik Komparatif berdasarkan enam variasi rasio dimensi standar empiris (Stairmand, Lapple, dan Swift), dan tidak menggunakan algoritma optimasi komputasional otomatis.
4. Analisis komparatif dibatasi untuk mencapai nilai penurunan tekanan (*pressure drop*) dalam rentang 100 mmH₂O hingga 150 mmH₂O sesuai dengan spesifikasi teknis manufaktur.
5. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Ansys CFD dengan fokus pada penggunaan *Reynolds Stress Model* (RSM) untuk menangkap fenomena aliran pusaran (*swirling flow*) yang kompleks.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian mengenai analisis perbandingan parameter geometri *cyclone separator* ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata, baik untuk pengembangan ilmu pengetahuan maupun aplikasi praktis di sektor industri. Berikut manfaat penelitian ini:

1. Penelitian ini menambah referensi ilmiah mengenai pengaruh variasi tujuh rasio dimensi utama terhadap performa siklon, khususnya melalui integrasi pendekatan matematis Leith and Licht (1972) yang dimodifikasi oleh David Leith dan Dilip Mehta dan Stairmand (1949).
2. Memberikan rekomendasi desain geometri yang mampu menghilangkan fenomena stagnasi partikel di dinding kerucut, sehingga mencegah penumpukan debu di *outlet dust* yang selama ini menghambat kontinuitas produksi.
3. Membantu industri meminimalkan konsumsi energi pada unit penggerak udara (*fan/blower*) dengan menghasilkan desain yang memiliki *pressure drop* tepat pada rentang target 100 mmH₂O hingga 150 mmH₂O.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini dirancang untuk memberikan gambaran yang jelas tentang struktur skripsi ini. Penulisan skripsi ini terdiri dari lima bab yang saling berkaitan, yang masing-masing memiliki tujuan untuk menjelaskan bagian tertentu dari penelitian. Berikut adalah penjelasan mengenai sistematika penulisan yang akan digunakan dalam skripsi ini.

BAB 1: PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang penelitian yang berfokus pada permasalahan penumpukan debu pupuk (20 mikron) pada unit *existing* akibat *pressure drop* yang terlalu rendah (39,8 mmH₂O). Di dalamnya mencakup rumusan masalah mengenai analisis perbandingan tujuh rasio geometri utama, tujuan untuk mencapai target tekanan operasional industri sebesar 100 mmH₂O – 150 mmH₂O, batasan masalah pada unit *single cyclone* tipe *tangential inlet*, serta manfaat penelitian bagi efisiensi energi industri.

BAB II: DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan landasan ilmiah yang mendukung penelitian, meliputi prinsip kerja *cyclone separator* berdasarkan fenomena *Rankine Double Vortex* (pusaran ganda). Pembahasan mencakup mekanika partikel (interaksi gaya sentrifugal, hambat/drag, dan gravitasi), model teoritis efisiensi Metode Leith Mehta, serta perhitungan *pressure drop* Metode Stairmand. Bab ini juga menjelaskan penggunaan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan model turbulensi *Reynolds Stress Model* (RSM).

BAB III: METODE PERANCANGAN

Bab ini menjelaskan tahapan pelaksanaan perancangan yang bersifat kuantitatif dengan pendekatan studi komputasi. Dimulai dari pengumpulan data operasional (laju alir 52.000 Am³/h, suhu 323,15 K), identifikasi variabel bebas berupa rasio geometri, hingga prosedur analisis komparatif menggunakan perhitungan matematis. Selanjutnya dipaparkan langkah-langkah simulasi pada *Ansys Fluent*, mulai dari pemodelan 3D, proses *meshing* dengan kontrol kualitas *skewness* dan *orthogonal*, pengaturan kondisi batas (*boundary conditions*), hingga teknik validasi melalui analisis komparatif antara hasil teoritis dan numerik.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan secara komprehensif pangkalan data kuantitatif dan visual yang diperoleh dari tahap perhitungan analitis maupun simulasi komputasional. Pemaparan data mencakup hasil perhitungan efisiensi separasi (Metode Leith-Mehta) dan *pressure drop* (Metode Stairmand) untuk desain *existing* beserta 48 variasi rancangan geometrinya, serta visualisasi CFD berupa kontur medan tekanan, kecepatan aliran, dan pelacakan trajektori partikel debu. Pada bagian pembahasan, bab ini mengeksekusi analisis komparatif untuk menyeleksi satu desain modifikasi terbaik yang memenuhi target *pressure drop* pabrik (100–150 mmH₂O), memvalidasi model komputasi numerik melalui analisis galat statistik (RMSE dan persentase deviasi), serta membuktikan secara visual keberhasilan desain baru dalam menghilangkan fenomena stagnasi penumpukan debu.

BAB V: PENUTUP

Bab ini menyajikan kesimpulan utama yang ditarik berdasarkan hasil evaluasi analitis teoretis komparatif dan visualisasi hidrodinamika dari simulasi CFD guna menjawab seluruh rumusan masalah penelitian secara definitif. Selain itu, bab ini juga memuat saran teknis yang direkomendasikan sebagai bahan evaluasi untuk pengembangan penelitian mekanika fluida selanjutnya maupun untuk tahapan implementasi perbaikan alat *cyclone separator* di sektor industri.