

PENGARUH VARIASI DESAIN INLET HYDROCYCLONE MENGGUNAKAN SIMULASI CFD UNTUK PENINGKATAN EFISIENSI PEMISAHAN GARAM

THE EFFECT OF HYDROCYCLONE INLET DESIGN VARIATIONS USING CFD SIMULATION TO IMPROVE SALT SEPARATION EFFICIENCY

Fauzan Hibatullah*, Marno, Deri Teguh Santoso

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

*fauzanh03@gmail.com, marno@staff.unsika.ac.id, deri.teguh@ft.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 22 November 2025

Direvisi: 25 Januari 2026

Disetujui: 15 Juli 2026

Kata Kunci: Dinamika aliran, Hydrocyclone, Optimasi inlet, Pressure drop, Simulasi CFD, Separation efficiency

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja hydrocyclone dalam memisahkan partikel garam dari larutan air garam melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Konfigurasi *hydrocyclone* yang dianalisis mencakup variasi sudut inlet (0° dan 90°), kecepatan inlet (1,5 m/s dan 2,25 m/s), serta ukuran partikel garam (210 mikron dan 250 mikron). Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tekanan statis memiliki pola khas, dengan tekanan tertinggi sekitar 1130,26 Pa pada konfigurasi S2 (A) dan terendah -177,36 Pa di pusat aliran, yang menunjukkan gaya sentrifugal yang cukup efisien. Kecepatan radial pada S2 (A) menunjukkan variasi moderat, dengan kecepatan mencapai 1,42 m/s di bagian atas dan menurun secara bertahap hingga -0,19 m/s di bagian bawah. Kecepatan tangensial pada S2 (A) juga relatif stabil, dengan nilai tertinggi mencapai 1,68 m/s, yang menunjukkan aliran yang lebih terkendali dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Konfigurasi S2 (A) juga mencatatkan efisiensi pemisahan tertinggi sebesar 96,48%, dengan penurunan tekanan yang moderat, yaitu 835,07 Pa, yang mengindikasikan bahwa sistem ini tidak hanya efektif dalam memisahkan partikel, tetapi juga efisien dalam penggunaan energi. Dibandingkan dengan konfigurasi lainnya, seperti S1 (A) yang memiliki efisiensi sedikit lebih rendah (95,85%) dan S1 (B) serta S2 (B) yang menunjukkan efisiensi pemisahan lebih rendah, S2 (A) memberikan kombinasi optimal antara *separation efficiency* dan *pressure drop*.

ABSTRACT

This study aims to analyze the performance of a hydrocyclone in separating salt particles from brine solution using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) simulations. The analyzed hydrocyclone configurations include variations in inlet angles (0° and 90°), inlet velocities (1.5 m/s and 2.25 m/s), and salt particle sizes (210 microns and 250 microns). The simulation results show that the distribution of static pressure follows a characteristic pattern, with the highest pressure around 1130.26 Pa in the S2 (A) configuration and the lowest at -177.36 Pa in the center of the flow, indicating an efficient centrifugal force. The radial velocity in S2 (A) shows a moderate variation, reaching 1.42 m/s at the top and gradually decreasing to -0.19 m/s at the bottom. The tangential velocity in S2 (A) is also relatively stable, with the highest value reaching 1.68 m/s, indicating a more controlled flow compared to other configurations. The S2 (A) configuration also shows the highest separation efficiency of 96.48%, with a moderate pressure drop of 835.07 Pa, indicating that this system is not only effective in separating particles but also energy-efficient in the separation process. Compared to other configurations, such as S1 (A), which has a slightly lower efficiency (95.85%), and S1 (B) and S2 (B), which show lower separation efficiencies, S2 (A) provides an optimal combination of separation efficiency and pressure drop.

Keywords: CFD simulation, Flow dynamics, Hydrocyclone, Inlet optimization, Pressure drop, Separation efficiency

*Corresponding author: fauzanh03@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Hydrocyclone merupakan alat pemisahan yang banyak digunakan karena memiliki efisiensi tinggi, desain sederhana tanpa komponen bergerak, kebutuhan energi rendah, serta biaya perawatan yang kecil [1]. Alat ini bekerja berdasarkan gaya sentrifugal yang dihasilkan dari aliran fluida yang masuk secara tangensial ke ruang berbentuk silinder, sehingga partikel dengan densitas lebih tinggi terdorong ke dinding dan keluar melalui underflow, sedangkan partikel dengan densitas lebih rendah keluar melalui overflow [2]. Kinerja pemisahan sangat dipengaruhi oleh desain struktural karena pola aliran yang terbentuk menentukan lintasan dan akumulasi partikel.

Dalam pemurnian garam, hydrocyclone menjadi solusi yang efektif karena mampu memisahkan partikel berdasarkan perbedaan densitas dan ukuran tanpa memerlukan bagian bergerak [3, 4]. Penelitian menunjukkan bahwa ukuran *cut size* (D_{50}) berperan penting, di mana hydrocyclone dengan D_{50} lebih kecil dari desain awalnya mampu memisahkan partikel garam hingga ukuran $69,73 \mu\text{m}$ [5].

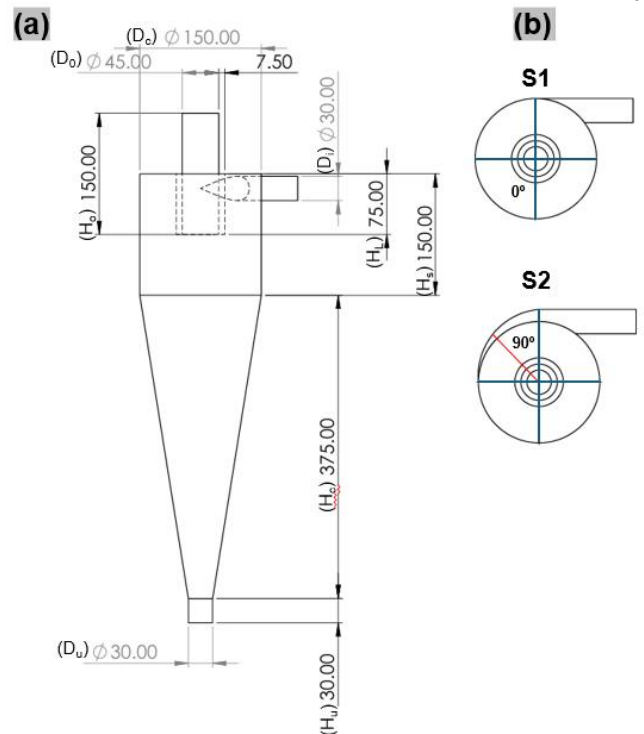
Pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) semakin banyak digunakan untuk menganalisis dan mengoptimalkan performa hydrocyclone. Model multiphase mixture mampu mengidentifikasi distribusi tekanan dan pola aliran turbulen sebagai dasar optimasi pemisahan [6], [7]. Selain itu, modifikasi struktur inlet dapat meningkatkan efisiensi pemisahan dari 70% hingga 94% [8].

Dengan demikian, optimalisasi desain hydrocyclone untuk pemurnian garam dapat memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan kualitas produk, mempercepat produksi, serta menekan biaya operasional. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa desain hydrocyclone dapat dioptimalkan melalui pemodelan dan analisis berbasis simulasi CFD.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja hydrocyclone dalam memisahkan partikel garam dari larutan air garam jenuh dengan menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Tahapan penelitian meliputi:

A. Konfigurasi Geometri dan Variabel Operasional



Gambar 1 Geometri hydrocyclone terdiri atas: (a) desain dasar, (b) konfigurasi desain inlet, dan (c) variasi yang dianalisis dalam penelitian ini.

Geometri hydrocyclone dimodelkan dan dianalisis menggunakan *ANSYS 2025 R1 Student* guna mengevaluasi pengaruh variasi sudut inlet 0° dan 90° terhadap performa pemisahan garam. Aliran umpan berupa campuran air garam jenuh dan partikel NaCl dimasukkan secara tangensial melalui saluran masuk. Di dalam hydrocyclone, partikel padat dipengaruhi oleh gaya sentrifugal dan gravitasi, sehingga partikel berukuran lebih besar dan lebih berat terdorong mengikuti dinding menuju underflow, sedangkan partikel yang lebih halus dapat tetap terbawa keluar melalui overflow. Gambar 1(a) menampilkan konfigurasi geometri dasar yang digunakan, Gambar 1(b) menunjukkan variasi desain inlet yang dianalisis. Pada Tabel 1 menunjukkan variasi S1 dan S2 yang merepresentasikan perbedaan pada sudut inlet serta parameter analisis lainnya.

No	Type Hydrocyclone	Sudut Inlet	Ukuran Partikel	Kecepatan Inlet
1	S1 (A)	0°	210	1.5
2	S1 (B)	0°	250	2.25
3	S2 (A)	90°	250	1.5
4	S2 (B)	90°	210	2.25

B. Metode Numerik dan Kondisi Batas

Seluruh simulasi dilakukan menggunakan *ANSYS Fluent* dengan menggunakan solver berbasis tekanan dalam kondisi tunak (*steady*). Model turbulensi yang dipilih adalah *Reynolds Stress Model* (RSM) untuk merepresentasikan aliran berputar kuat di dalam hydrocyclone, karena mampu menggambarkan pemisahan lapisan batas dan dinamika vortisitas dengan lebih baik,

dengan bantuan penerapan fungsi dinding standar untuk mengakomodasi efek gesekan di dekat permukaan padat [9]. Pendekatan multiphase mixture diterapkan untuk memodelkan interaksi antara fase kontinu berupa fluida air garam jenuh serta fase terdispersi berupa partikel garam. Kecepatan aliran pada inlet diset sebesar 1.5 m/s dan 2.25 m/s, yang masih berada dalam kisaran umum operasi hydrocyclone, yaitu 1–2.5 m/s berdasarkan literatur sebelumnya [10, 11]. Pemilihan nilai ini bertujuan untuk memastikan terbentuknya aliran berpusar yang stabil serta mendukung efektivitas pemisahan partikel. Untuk rincian utama parameter operasional yang digunakan dalam simulasi diuraikan secara lengkap pada Tabel 2.

Tabel 1 Parameter *boundary conditions*

No	Aspek Simulasi	Pengaturan
1	Materials Fluid	bittern-fluid (Air Jenuh), $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.0012 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
2	Materials NaCl	NaCl Particles, $\rho = 2160 \text{ kg/m}^3$
3	Velocity Inlet	1.5 m/s dan 2.25 m/s
	Volume Fraction	2%
4	Operating Pressure	1 atm (101325 Pa)
5	Initialization	Standard Initialization from Inlet
6	Run Calculation	1000 Iterations

C. Metode Numerik dan Kondisi Batas

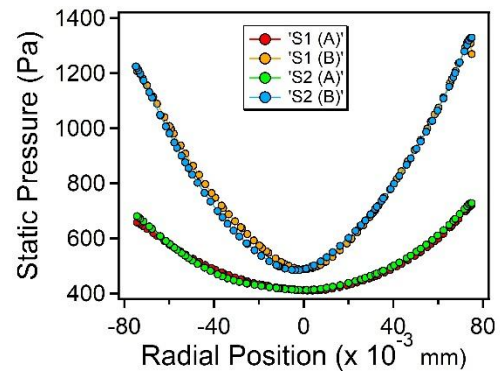
Evaluasi performa setiap konfigurasi hydrocyclone dilakukan berdasarkan hasil simulasi CFD yang mencakup analisis medan aliran serta efektivitas pemisahan. Parameter hidrodinamik kunci, seperti distribusi tekanan, kecepatan radial dan tangensial, serta intensitas turbulensi, dianalisis untuk memahami pengaruhnya terhadap lintasan partikel dan stabilitas aliran internal. Selain itu, dua parameter kinerja utama dihitung, yaitu: (a) *Pressure Drop* (ΔP), yakni selisih tekanan statis antara inlet dan outlet yang menggambarkan kebutuhan energi dan kekuatan gaya sentrifugal; dan (b) *Separation Efficiency* (η), yang merupakan rasio massa partikel garam yang keluar melalui underflow terhadap massa total yang masuk, sebagai indikator efektivitas pemisahan padat-cair. Pendekatan ini memungkinkan penilaian menyeluruh terhadap dampak variasi desain pada karakteristik aliran dan performa pemisahan hydrocyclone.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pola Aliran

1. Static Pressure

Pada hydrocyclone, energi kinetik diperoleh dengan mengubah tekanan fluida, yang berperan penting dalam proses pemisahan. Namun, proses ini juga mengakibatkan terjadinya kehilangan energi selama operasi. Selain itu, hydrocyclone terdiri dari dua area utama, yaitu zona pra-pemisahan yang terletak di bagian inti, dan zona pemisahan utama yang terdapat pada bagian kerucut.



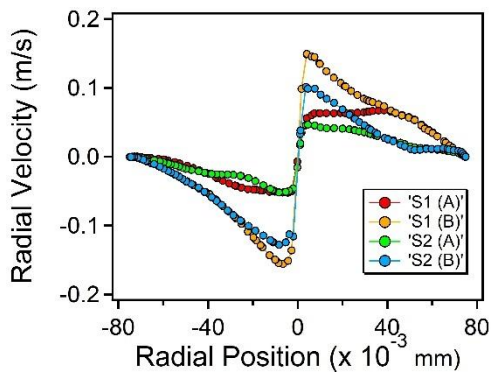
Gambar 2 Distribusi radial tekanan statis untuk konfigurasi hydrocyclone: (a) seri S1 dan (b) seri S2 dengan variasi kecepatan dan ukuran partikel

Gambar 2 menunjukkan grafik pola distribusi tekanan statis yang membentuk kurva "U", dengan tekanan tertinggi terletak di dinding dan terendah di tengah aliran. Fenomena ini menggambarkan adanya gradien tekanan radial yang menyebabkan gaya sentrifugal, yang mengarah pada pergerakan partikel dengan densitas lebih tinggi (seperti partikel garam) menuju dinding untuk dikeluarkan melalui aliran bawah, sedangkan fluida yang lebih ringan (*bittern*) tetap berada di bagian tengah yang memiliki tekanan lebih rendah.

Data yang diperoleh menunjukkan variasi distribusi tekanan statis pada berbagai konfigurasi hydrocyclone dan posisi radial. Pada konfigurasi S1 (A), tekanan statis dimulai sekitar 414,35 Pa di pusat aliran (pada posisi radial sekitar -0,004296 mm) dan meningkat hingga mencapai sekitar 1200 Pa di dekat dinding (pada posisi radial sekitar 0,08 mm). Konfigurasi S1 (B) menunjukkan tekanan statis yang dimulai dari 499,853 Pa di pusat aliran dan mencapai puncaknya sekitar 1300 Pa pada posisi radial ekstrem. Pada S2 (A), tekanan statis dimulai sedikit lebih rendah, yaitu 413,182 Pa, dan meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 1200 Pa di dinding. Sedangkan pada S2 (B), tekanan statis meningkat dari 490,5 Pa di pusat aliran hingga mencapai sekitar 1300 Pa pada posisi radial paling luar. Pola distribusi tekanan ini menunjukkan adanya gradien tekanan radial yang khas dalam sistem aliran sentrifugal, dengan tekanan tertinggi ditemukan di dinding dan terendah di pusat aliran.

2. Radial Velocity

Radial velocity adalah komponen kecepatan fluida yang bergerak sejajar dengan arah tegak lurus terhadap sumbu silinder, baik menuju dinding maupun ke pusat pusaran aliran. Secara fisik, besar kecilnya kecepatan radial sangat terkait dengan intensitas gaya sentrifugal yang mempengaruhi campuran partikel garam dan air tua. Semakin besar kecepatan fluida menuju dinding, semakin besar percepatan radial yang diterima oleh partikel garam, yang menyebabkan partikel tersebut lebih cenderung terdorong ke dinding dan akhirnya mengalir ke underflow.



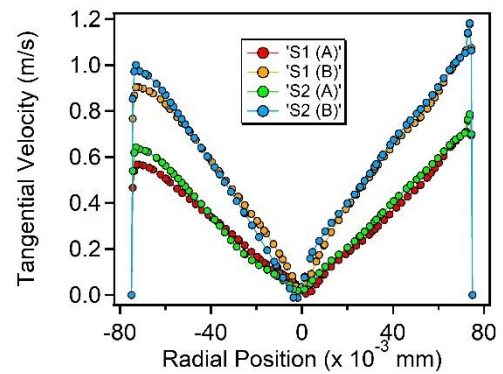
Gambar 3 Distribusi radial kecepatan radial untuk konfigurasi hydrocyclone: (a) seri S1 dan (b) seri S2 dengan variasi kecepatan dan ukuran partikel

Gambar 3 memperlihatkan pola fluktuasi kecepatan radial yang khas di sepanjang posisi radial, dengan kecepatan yang lebih tinggi di dekat dinding dan cenderung mendekati 0 m/s di pusat aliran. Pola ini menggambarkan bahwa fluida bergerak lebih cepat di dekat dinding dan melambat di pusat, yang sejalan dengan teori gaya sentrifugal yang memisahkan partikel berdasarkan densitasnya. Pada konfigurasi S1 (B) dan S2 (B), kecepatan radial lebih tinggi di area pusat aliran, sementara pada S1 (A) dan S2 (A), kecepatan lebih stabil.

Data yang diperoleh menunjukkan distribusi kecepatan radial pada berbagai posisi radial dan konfigurasi hydrocyclone yang diberi label S1 (A), S1 (B), S2 (A), dan S2 (B). Pada S1 (A), kecepatan radial berkisar dari -0.052006 m/s pada posisi radial sekitar -0.004296 mm dan meningkat menjadi 0.019645 m/s pada posisi radial yang lebih besar. Pada konfigurasi S1 (B), kecepatan radial dimulai dari -0.155585 m/s dan berkurang seiring dengan bertambahnya posisi radial. Di sisi lain, pada S2 (A), kecepatan radial dimulai dari 0.019645 m/s dan sedikit menurun hingga mencapai -0.049497 m/s pada posisi radial yang lebih besar. Pada S2 (B), kecepatan radial mengalami fluktuasi signifikan, dimulai dari 0.038442 m/s dan turun tajam menjadi -0.115576 m/s pada posisi radial yang lebih tinggi. Pola distribusi kecepatan ini memberikan pemahaman tentang dinamika aliran pada setiap konfigurasi dan bagaimana perbedaan aliran ini memengaruhi proses pemisahan dalam sistem hydrocyclone.

3. Tangential Velocity

Kecepatan tangensial merupakan komponen aliran yang paling dominan dalam hydrocyclone, karena berfungsi langsung dalam menghasilkan gaya sentrifugal yang diperlukan untuk memisahkan partikel padat dari fase cair. Medan kecepatan tangensial yang kuat memungkinkan partikel bergerak lebih efektif menuju dinding, sementara distribusi yang lemah atau tidak stabil dapat menurunkan efisiensi proses klasifikasi.

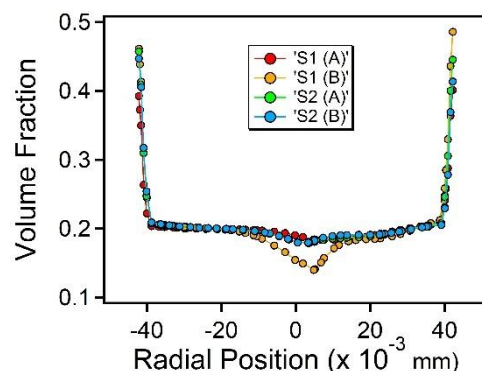


Gambar 4 Distribusi radial kecepatan tangensial untuk konfigurasi hydrocyclone: (a) seri S1 dan (b) seri S2 dengan variasi kecepatan dan ukuran partikel

Gambar 5 menunjukkan pola distribusi kecepatan tangensial yang khas, di mana kecepatan tertinggi ditemukan pada posisi radial yang lebih besar, dan kecepatan tersebut semakin menurun menuju pusat aliran. Pada S1 (A), kecepatan tangensial berkisar antara 0.064429 m/s pada posisi radial -0.004296 mm dan meningkat menjadi 0.097444 m/s pada posisi radial yang lebih besar. S1 (B) menunjukkan kecepatan tangensial yang lebih tinggi, dimulai dari 0.125069 m/s dan meningkat hingga 0.180598 m/s. Pada S2 (A), kecepatan tangensial dimulai dari 0.02524 m/s dan sedikit meningkat hingga mencapai 0.025015 m/s pada posisi radial yang lebih besar. Sementara itu, pada S2 (B), kecepatan tangensial bervariasi antara 0.080289 m/s hingga -0.012452 m/s, yang menunjukkan fluktuasi lebih signifikan pada posisi radial tertentu.

4. Volume Fraction

Dalam hydrocyclone, partikel terakumulasi secara radial akibat perbedaan gaya gradasi. Partikel yang lebih besar biasanya cenderung bergerak menuju dinding samping, membentuk daerah dengan konsentrasi tinggi pada posisi radial tertentu yang sebanding dengan fraksi volume maksimum di area tersebut. *Volume fraction* adalah persamaan transportasi fraksi volume yang digunakan untuk menggambarkan pola pemisahan dan akumulasi partikel sepanjang tubuh hydrocyclone.



Gambar 5 Distribusi radial volume untuk konfigurasi hydrocyclone: (a) seri S1 dan (b) seri S2 dengan variasi kecepatan dan ukuran partikel

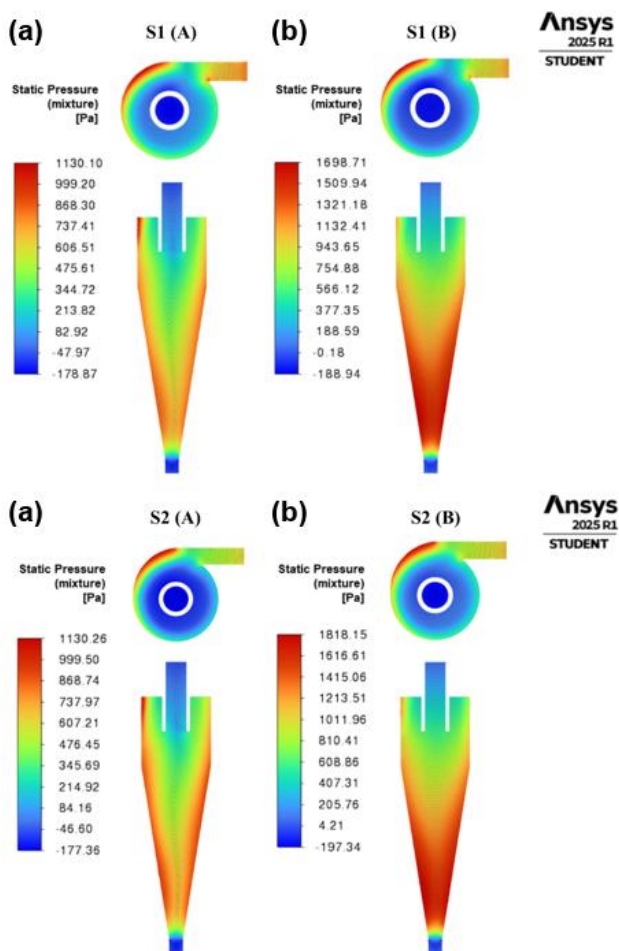
Gambar 6 menunjukkan distribusi volume fraction yang mengalami penurunan signifikan sepanjang posisi radial, dengan nilai tertinggi ditemukan di dekat dinding

aliran dan menurun tajam menuju pusat aliran. Pada S1 (A), volume fraction berkisar antara 0.401523 pada posisi radial sekitar 0.042162 mm dan menurun hingga sekitar 0.258373 pada posisi radial yang lebih besar. S1 (B) menunjukkan volume fraction yang sedikit lebih tinggi, dimulai dari 0.485906 dan menurun hingga 0.284553 pada posisi radial yang lebih besar. Pada S2 (A), volume fraction dimulai dari 0.445267 dan sedikit menurun menjadi 0.247955 pada posisi radial yang lebih besar. Sedangkan pada S2 (B), volume fraction berkisar antara 0.413635 dan menurun menjadi 0.230965 pada posisi radial yang lebih tinggi. Pola distribusi volume fraction ini menunjukkan bahwa pada semua konfigurasi, volume fraction lebih tinggi di dekat dinding dan menurun tajam di pusat aliran. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel yang lebih padat cenderung terdorong menuju dinding aliran, sementara fluida yang lebih ringan tetap berada di pusat aliran.

B. Karakteristik Medan Aliran

1. Static Pressure

Kontur tekanan umumnya menunjukkan nilai tertinggi di sekitar dinding inlet dan menurun tajam menuju pusat aliran, membentuk inti pusaran bertekanan rendah. Gradien tekanan ini menghasilkan gaya sentrifugal yang berperan dalam memisahkan partikel garam dari fluida.

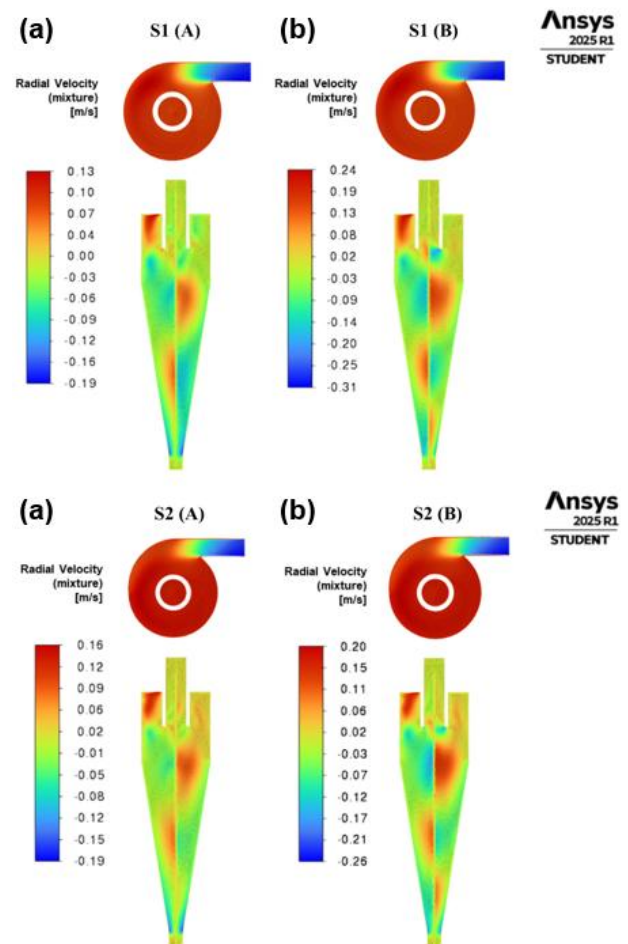


Gambar 6 Kontur static pressure konfigurasi hydrocyclone pada bidang YZ: (a) seri S1, (b) seri S2

Gambar 6 menunjukkan bahwa distribusi tekanan statis pada S1 (A) menunjukkan tekanan tertinggi sekitar 1130,10 Pa di bagian atas, yang kemudian menurun signifikan menjadi -178,87 Pa di bagian bawah aliran. Pada S1 (B), tekanan tertinggi tercatat sekitar 1698,71 Pa di bagian atas, dan turun tajam menjadi -188,94 Pa di bagian bawah, dengan distribusi tekanan yang lebih bervariasi dan perubahan yang lebih cepat. Di sisi lain, pada S2 (A), distribusi tekanan menunjukkan tekanan tertinggi sekitar 1130,26 Pa dan menurun lebih moderat hingga mencapai -177,36 Pa di bawah aliran. Konfigurasi S2 (B) menunjukkan pola serupa, dengan tekanan tertinggi 1818,15 Pa di bagian atas dan penurunan drastis hingga -197,34 Pa di bagian bawah.

Pola distribusi tekanan statis ini menunjukkan bahwa konfigurasi S1 (B) dan S2 (B) memiliki distribusi tekanan yang lebih ekstrem, dengan penurunan yang lebih tajam sepanjang aliran, yang mungkin mencerminkan gaya sentrifugal yang lebih kuat. Sementara itu, S1 (A) dan S2 (A) menunjukkan distribusi tekanan yang lebih stabil, dengan penurunan yang lebih moderat. Konfigurasi S1 (B) dan S2 (B) cenderung memiliki fluktuasi yang lebih besar dalam distribusinya.

2. Radial Velocity



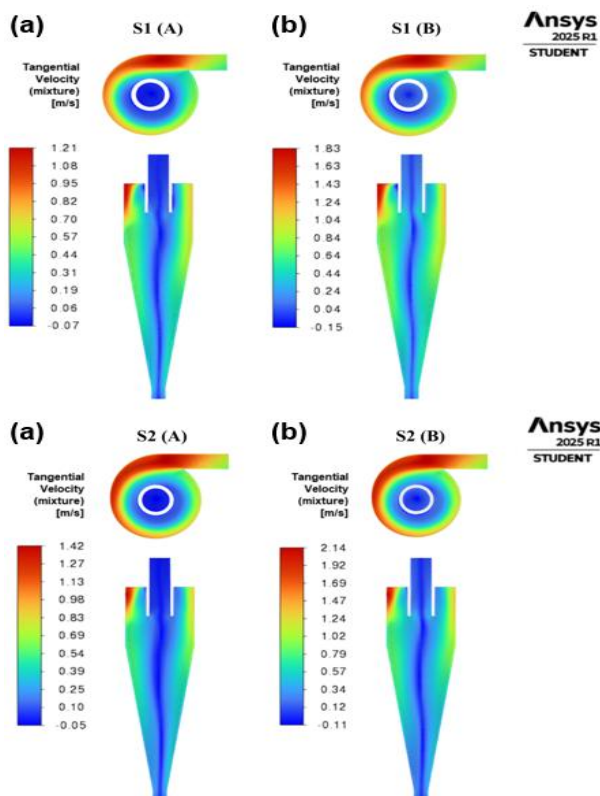
Gambar 7 Kontur radial velocity konfigurasi hydrocyclone pada bidang YZ: (a) seri S1 dan (b) seri S2

Gambar 7 menunjukkan bahwa distribusi kecepatan radial pada masing-masing konfigurasi menunjukkan pola

yang berbeda. Pada S1 (A), kecepatan radial tertinggi tercatat sekitar 0,13 m/s di bagian atas, sementara di bagian bawah aliran, kecepatan menurun menjadi -0,19 m/s, memperlihatkan perbedaan signifikan antara aliran di pusat dan di dinding aliran. Pada S1 (B), kecepatan radial mencapai 0,24 m/s di bagian atas dan turun tajam menjadi -0,31 m/s di bagian bawah, yang menunjukkan fluktuasi lebih besar antara kecepatan aliran di bagian atas dan bawah. Pada S2 (A), kecepatan radial dimulai dari 0,16 m/s di bagian atas dan menurun secara bertahap menjadi -0,19 m/s di bagian bawah, menunjukkan distribusi kecepatan yang lebih moderat dibandingkan dengan S1 (A) dan S1 (B). Pada S2 (B), kecepatan radial dimulai dari 0,20 m/s di bagian atas dan turun tajam hingga -0,26 m/s di bagian bawah, menunjukkan fluktuasi signifikan dalam distribusi kecepatan aliran. Pola distribusi kecepatan radial ini menunjukkan bahwa pada S1 (B) dan S2 (B), distribusi kecepatan lebih ekstrem, dengan perbedaan besar antara bagian atas dan bawah aliran, yang mengindikasikan gaya sentrifugal yang lebih kuat. Sementara itu, S1 (A) dan S2 (A) menunjukkan distribusi kecepatan yang lebih stabil, dengan fluktuasi lebih kecil sepanjang posisi radial.

3. Tangential Velocity

Kecepatan tangensial pada hydrocyclone merupakan komponen kecepatan fluida yang arahnya sejajar dengan lintasan melingkar di sekitar sumbu silinder, yang secara langsung menggambarkan intensitas gerakan pusaran (swirl) dalam alat tersebut. Aliran yang masuk secara tangensial ke bagian silinder akan menghasilkan kecepatan tangensial tinggi, yang memicu terbentuknya gaya sentrifugal besar.

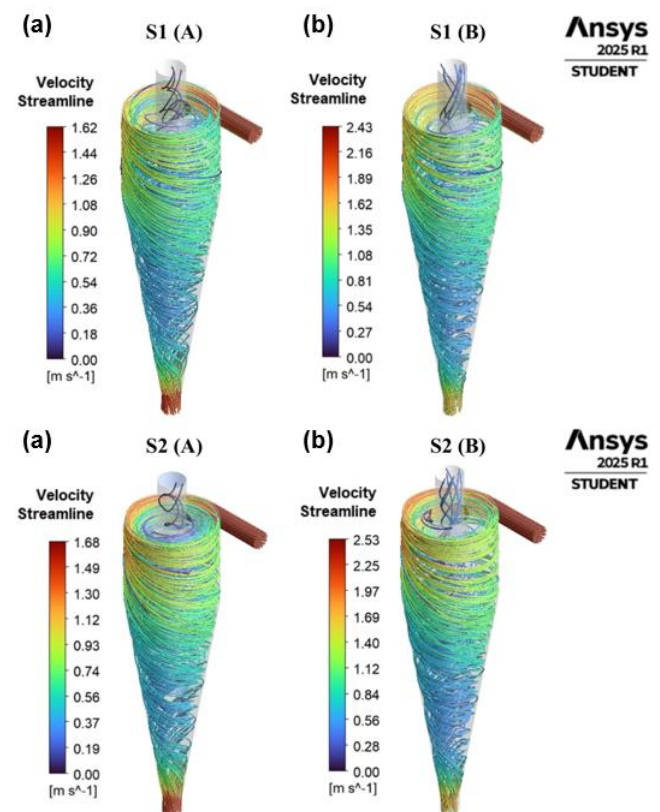


Gambar 8 Kontur tangential velocity konfigurasi hydrocyclone pada bidang YZ: (a) seri S1 dan (b) seri S2

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada S1 (A), distribusi kecepatan tangensial tertinggi tercatat di bagian atas aliran, mencapai 1,21 m/s, kemudian menurun tajam menjadi -0,07 m/s di bagian bawah aliran. Pada S1 (B), kecepatan tangensial mencapai puncaknya di 1,83 m/s di bagian atas dan menurun menjadi -0,15 m/s di bagian bawah, menunjukkan fluktuasi yang signifikan antara bagian atas dan bawah aliran. Pada S2 (A), distribusi kecepatan tangensial lebih stabil, dimulai dari 1,42 m/s di bagian atas dan turun secara moderat menjadi -0,05 m/s di bagian bawah aliran. Sementara itu, pada S2 (B), kecepatan tangensial mencapai nilai tertinggi 2,14 m/s di bagian atas dan turun tajam menjadi -0,11 m/s di bagian bawah, menunjukkan variasi yang lebih ekstrem dalam distribusi kecepatan.

Pola distribusi kecepatan tangensial ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi S1 (B) dan S2 (B), terdapat fluktuasi besar dalam kecepatan antara bagian atas dan bawah aliran. Sebaliknya, pada S1 (A) dan S2 (A), distribusi kecepatan lebih stabil, dengan penurunan kecepatan yang lebih moderat, yang mencerminkan aliran yang lebih terkontrol. Fluktuasi besar yang teramati pada S1 (B) dan S2 (B) menunjukkan kemungkinan adanya turbulensi yang lebih besar, yang dapat mempengaruhi efisiensi pemisahan partikel dalam aliran.

4. Velocity Streamline



Gambar 9 Distribusi velocity streamline konfigurasi hydrocyclone pada bidang YZ: (a) seri S1 dan (b) seri S2

Velocity streamline adalah representasi garis aliran fluida yang menunjukkan arah dan pola kecepatan aliran di dalam hydrocyclone. Dalam simulasi hydrocyclone yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan partikel

garam dan air jenuh, *velocity streamline* sangat penting untuk memahami dinamika aliran yang mempengaruhi proses pemisahan berdasarkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh aliran berputar. Garis aliran ini menggambarkan pergerakan fluida dari inlet menuju bagian bawah hingga keluar, termasuk pola vorteks yang terbentuk akibat putaran aliran, yang berperan dalam memisahkan partikel berdasarkan perbedaan densitas.

Gambar 9 menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran pada setiap konfigurasi memiliki pola yang berbeda. Pada S1 (A), kecepatan aliran mencapai nilai tertinggi sekitar 1,62 m/s di bagian atas, yang kemudian menurun tajam hingga mencapai 0 m/s di bagian bawah aliran. Pada S1 (B), distribusi aliran menunjukkan fluktuasi yang lebih besar, dengan kecepatan maksimum sekitar 2,43 m/s di bagian atas dan menurun tajam menjadi 0,27 m/s di bagian bawah, menunjukkan perbedaan yang lebih ekstrem antara bagian atas dan bawah aliran. Sementara itu, pada S2 (A), distribusi kecepatan dimulai dari 1,68 m/s di bagian atas dan menurun lebih moderat menjadi 0,74 m/s di bagian bawah, menggambarkan aliran yang lebih stabil dan terkendali. Pada S2 (B), distribusi kecepatan menunjukkan nilai tertinggi 2,53 m/s di bagian atas, dengan penurunan signifikan hingga -0,11 m/s di bagian bawah, yang menunjukkan fluktuasi besar dalam kecepatan aliran. Pola distribusi kecepatan pada S1 (B) dan S2 (B) menunjukkan fluktuasi yang lebih tinggi, sedangkan pada S1 (A) dan S2 (A), distribusi kecepatan lebih moderat, memberikan kontrol aliran yang lebih baik dengan fluktuasi yang lebih kecil.

C. Pressure Drop dan Separation Efficiency

Pressure drop di seluruh hydrocyclone merupakan indikator utama kinerja, yang menggambarkan energi yang diperlukan untuk mempertahankan proses pemisahan sentrifugal. Penurunan tekanan yang lebih tinggi umumnya menunjukkan gerakan putar yang lebih kuat dan gaya sentrifugal yang lebih besar, namun nilai yang terlalu tinggi juga dapat meningkatkan konsumsi energi dan berpotensi menyebabkan ketidakstabilan aliran. Perbedaan tekanan statis antara vortex finder dan saluran masuk (inlet) didefinisikan sebagai penurunan tekanan, yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta p_o = p_i - p_o \quad (1)$$

Di mana p_i dan p_o masing-masing merupakan tekanan statis pada saluran masuk (*inlet*) dan pada saluran keluar (*overflow*).

Tabel 2 Nilai pressure drop untuk konfigurasi hydrocyclone yang berbeda

Sudut Inlet (°)	Pressure Drop (Pa)
0	762.77
0	1723.16
90	835.07
90	1809.85

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan (2), nilai pressure drop pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perubahan tekanan secara langsung dipengaruhi oleh variasi kecepatan inlet dan ukuran partikel. Pada sudut inlet 0°, dengan kecepatan inlet 1,5 m/s dan ukuran partikel 210 mikron, pressure drop tercatat sebesar 762,77 Pa, yang merupakan nilai terendah. Namun, ketika kecepatan inlet meningkat menjadi 2,25 m/s dan ukuran partikel menjadi 250 mikron, pressure drop meningkat signifikan menjadi 1723,16 Pa, menunjukkan peningkatan kerugian energi pada konfigurasi tersebut. Pada sudut inlet 90°, meskipun kecepatan inlet tetap 1,5 m/s dengan ukuran partikel 250 mikron, pressure drop tercatat 835,07 Pa, yang lebih tinggi dibandingkan dengan sudut inlet 0°. Di sisi lain, pada sudut inlet 90° dengan kecepatan inlet 2,25 m/s dan ukuran partikel 210 mikron, pressure drop tercatat 1809,85 Pa, yang merupakan nilai tertinggi, menunjukkan peningkatan kerugian energi yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan inlet yang lebih tinggi dan ukuran partikel yang lebih besar cenderung meningkatkan pressure drop, yang berhubungan langsung dengan peningkatan kerugian energi dalam sistem.

Efisiensi pemisahan dalam hydrocyclone mengacu pada kemampuan alat ini untuk memisahkan partikel padat atau cairan berdasarkan perbedaan ukuran, densitas, atau karakteristik fisiknya dari fluida pembawa. Hydrocyclone bekerja dengan memanfaatkan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh aliran fluida yang masuk secara tangensial melalui inlet, sehingga membentuk pusaran (*vortex*) di dalam ruang berbentuk kerucut. Pusaran ini menyebabkan partikel dengan densitas lebih tinggi terdorong ke arah dinding luar dan bergerak ke bawah menuju *underflow*, sedangkan partikel atau fluida dengan densitas lebih rendah bergerak ke pusat *vortex* dan keluar melalui bagian atas (*overflow*). Efisiensi pemisahan dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{UF}}{\dot{m}_{UF} + \dot{m}_{OF}} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

$\dot{m}_{UF}$ = Mass flow rate underflow *NaCl* partikel

$\dot{m}_{OF}$ = Mass flow rate overflow *NaCl* partikel

Tabel 3 Separation efficiency konfigurasi hydrocyclone yang berbeda

Sudut Inlet (°)	Separation Efficiency (%)
0	95.85
0	70.79
90	96.48
90	70.21

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan (2), data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa sudut inlet, kecepatan inlet, dan ukuran partikel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *separation efficiency*. Pada sudut inlet 0° dengan kecepatan inlet 1,5 m/s dan ukuran partikel 210 mikron, efisiensi

pemisahan tercatat sebesar 95,85%, yang menunjukkan kinerja terbaik dalam pemisahan. Namun, ketika kecepatan inlet meningkat menjadi 2,25 m/s dan ukuran partikel menjadi 250 mikron, efisiensi pemisahan menurun menjadi 70,79%. Sebaliknya, pada sudut inlet 90° dengan kecepatan inlet 1,5 m/s dan ukuran partikel 250 mikron, efisiensi pemisahan meningkat lagi menjadi 96,48%. Namun, pada sudut inlet 90° dan kecepatan inlet 2,25 m/s dengan ukuran partikel 210 mikron, efisiensi pemisahan menurun lagi menjadi 70,21%. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan inlet dan ukuran partikel memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi pemisahan. Berdasarkan data yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi S2 (A) dengan sudut inlet 90°, kecepatan inlet 1,5 m/s, dan ukuran partikel 250 mikron memberikan hasil pemisahan yang paling efisien.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis distribusi tekanan statis, kecepatan radial, kecepatan tangensial, garis aliran kecepatan, penurunan tekanan, dan efisiensi pemisahan pada berbagai konfigurasi hydrocyclone (S1 (A), S1 (B), S2 (A), dan S2 (B)), dapat disimpulkan bahwa konfigurasi S1 (A) dan S2 (A) menunjukkan kinerja yang lebih optimal dibandingkan dengan S1 (B) dan S2 (B). Pada S1 (A), distribusi tekanan statis menunjukkan penurunan yang moderat dan efisiensi pemisahan yang tinggi (95,85%) dengan penurunan tekanan yang rendah (762,77 Pa). Konfigurasi S2 (A) juga menunjukkan efisiensi pemisahan yang sangat baik (96,48%) dengan penurunan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan S1 (B) dan S2 (B). Sebaliknya, S1 (B) dan S2 (B) menunjukkan distribusi kecepatan yang lebih ekstrem dengan fluktuasi besar pada kecepatan radial dan tangensial, serta penurunan tekanan yang lebih tinggi, yang mengindikasikan bahwa meskipun gaya sentrifugal lebih besar, efisiensi pemisahan lebih rendah. S1 (B) dan S2 (B) memiliki efisiensi pemisahan yang lebih rendah (70,79% dan 70,21%), dengan penurunan tekanan yang lebih tinggi (1723,16 Pa dan 1809,85 Pa), yang menunjukkan adanya ketidakstabilan aliran yang lebih besar. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa S2 (A) lebih unggul dalam hal kontrol aliran dan efisiensi pemisahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, saran, dan bimbingan yang berharga selama proses penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] L. Ni, J. Tian, and J. Zhao, "Experimental study of the relationship between separation performance and lengths of vortex finder of a novel de-foulant hydrocyclone with continuous underflow and reflux function," *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, vol. 52,

- no. 1, pp. 142–154, Jan. 2017, doi: 10.1080/01496395.2016.1250780.
- [2] J. Tian, L. Ni, T. Song, J. Olson, and J. Zhao, "An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations," Nov. 29, 2018, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.seppur.2018.06.015.
- [3] B. T. I. Ali *et al.*, "Refining NaCl: Elevating Salt's quality from coarse to industrial and Pharmacy grade through innovative hydroextraction techniques," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.csee.2024.100752.
- [4] M. Durango-Cogollo, J. Garcia-Bravo, B. Newell, and A. Gonzalez-Mancera, "CFD modeling of hydrocyclones-A study of efficiency of hydrodynamic reservoirs," *Fluids*, vol. 5, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.3390/fluids5030118.
- [5] D. Paramitasari and D. Avianto Sugeng, "Cut-size diameter calculation of salt crystals from a hydrocyclone," *M.I.P.I. Vol.15, No 3*, vol. 15, no. 3, pp. 168–173, 2021.
- [6] K. Chu, J. Chen, A. B. Yu, and R. A. Williams, "Numerical studies of multiphase flow and separation performance of natural medium cyclones for recovering waste coal," *Powder Technol*, vol. 314, pp. 532–541, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.10.047.
- [7] Y. Zhang, M. Yang, L. Jiang, H. Wang, J. Xu, and J. Yang, "High concentration fine particle separation performance in hydrocyclones," *Minerals*, vol. 11, no. 3, pp. 1–17, Mar. 2021, doi: 10.3390/min11030307.
- [8] D. E *et al.*, "Numerical investigation of hydrocyclone inlet configurations for improving separation performance," *Powder Technol*, vol. 434, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119384.
- [9] D. E *et al.*, "Numerical study of the effect of cylinder-to-cone ratio on the classification performance in hydrocyclones," *Powder Technol*, vol. 454, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.powtec.2025.120736.
- [10] R. Wang, Z. Zhang, X. Yan, H. Zhang, and L. Wang, "Hydrocyclone separation enhancement of fine particles based on interface control," *Miner Eng*, vol. 209, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.mineng.2024.108628.
- [11] D. E *et al.*, "Numerical study of the multiphase flows and separation performance of hydrocyclone with tapered cross-section inlet," *Powder Technol*, vol. 416, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2022.118208.