

# Penerapan Teknologi *Pneumatic Rapid Mixing* dan *Hydrocyclone Flocculator* untuk Penyisihan Kekeruhan dan TSS

Rafif Permata Dwidewitra<sup>1</sup>, Firra Rosariawari<sup>1\*</sup>, Hendrata Wibisana<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: firra.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 19 Agustus 2025

Disetujui: 29 Agustus 2025

## Abstract

River water is a crucial resource that continues to experience a decline in quality due to high levels of turbidity and Total Suspended Solids (TSS). This study aims to analyze the effectiveness of combining *pneumatic rapid mixing* and *hydrocyclone flocculator* technologies in reducing TSS and turbidity in river water, using a laboratory-scale experimental approach. The independent variables tested were air flow rate (70, 55, and 40 L/min) and *hydrocyclone* diameter (15 cm and 20 cm), with water quality parameters including turbidity, TSS, and pH. Testing was conducted using standard methods (SNI), and data analysis employed removal efficiency and two-way ANOVA statistical tests. The results showed that the optimal configuration was achieved at an air flow rate of 70 L/min and a *hydrocyclone* diameter of 15 cm, with turbidity reduction efficiency of 73.1% and TSS reduction efficiency of 63.8%. These findings indicate that the integration of both technologies can produce an efficient and stable coagulation-flocculation process, with potential for application in sustainable surface water treatment.

**Keywords:** *pneumatic rapid mixing, hydrocyclone flocculator, coagulation-flocculation, water treatment, total suspended solid*

## Abstrak

Air sungai merupakan sumber daya krusial yang terus mengalami penurunan kualitas akibat tingginya kadar kekeruhan dan *Total Suspended Solids* (TSS). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* dalam menurunkan TSS dan kekeruhan pada air sungai, menggunakan pendekatan eksperimen skala laboratorium. Variabel bebas yang diuji adalah debit udara (70, 55, dan 40 L/min) dan diameter *hydrocyclone* (15 cm dan 20 cm), dengan parameter kualitas air berupa kekeruhan, TSS, dan pH. Pengujian dilakukan dengan metode standar (SNI), dan analisis data menggunakan efisiensi removal serta uji statistik ANOVA *Two Way* m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi optimal diperoleh pada debit udara 70 L/min dan diameter *hydrocyclone* 15 cm, dengan efisiensi penurunan kekeruhan sebesar 84% dan TSS sebesar 81%. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi kedua teknologi tersebut mampu menghasilkan proses koagulasi-flokulasi yang efisien dan stabil, serta memiliki potensi aplikatif dalam pengolahan air permukaan secara berkelanjutan.

**Kata Kunci:** *koagulasi pneumatik, flokulasi hidrosiklon, koagulasi-flokulasi, pengolahan air, total padatan tersuspensi*

## 1. Pendahuluan

Air sungai merupakan salah satu komponen vital dalam sistem hidrologi yang mendukung keberlangsungan hidup manusia dan keseimbangan ekosistem alami. Sepanjang sejarah peradaban, sungai telah menjadi pusat kegiatan manusia menyediakan air bersih untuk kebutuhan domestik seperti minum, memasak, dan mandi; mengairi lahan pertanian; mendukung proses-proses industri; hingga menjadi jalur transportasi dan mata pencaharian. Di Indonesia, keberadaan sungai memiliki peran strategis, dengan lebih dari 70% penduduk bergantung pada sumber daya ini sebagai air baku utama untuk konsumsi sehari-hari dan kebutuhan sanitasi [1].

Sayangnya, intensifikasi aktivitas antropogenik yang tidak diimbangi dengan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan telah menyebabkan pencemaran air sungai semakin meluas. Pembuangan limbah domestik, residu industri, serta aliran permukaan dari lahan pertanian membawa kontaminan organik dan anorganik yang menurunkan kualitas fisik dan kimia air. Parameter pencemar yang paling umum dan signifikan adalah tingginya kadar *Total Suspended Solids* (TSS) dan kekeruhan, yang tidak hanya mengganggu estetika dan pencahayaan air, tetapi juga dapat mengganggu proses fotosintesis organisme akuatik dan mempersulit pengolahan air menjadi layak konsumsi [2].

Untuk menjamin ketersediaan air bersih yang aman dan sesuai standar kesehatan, proses pengolahan air menjadi suatu keniscayaan. Teknologi konvensional yang banyak digunakan saat ini, seperti sistem koagulasi dan flokulasi menggunakan pengaduk mekanis, terbukti mampu menyisihkan partikel-partikel koloid dan tersuspensi [3]. Namun, efektivitas metode tersebut sangat bergantung pada optimalisasi parameter proses, terutama pada tahap pengadukan cepat dan pembentukan flok yang menjadi fondasi dari efisiensi penyisihan partikel [4]. Meski fungsional, metode konvensional memiliki keterbatasan yang cukup nyata, seperti konsumsi energi yang tinggi untuk pengadukan mekanis, kebutuhan lahan yang luas untuk proses retensi dan sedimentasi, serta waktu pemrosesan yang relatif lama. Hal ini menjadi tantangan tersendiri bagi daerah yang memiliki keterbatasan ruang dan sumber daya energi [5].

Sebagai respon atas tantangan tersebut, teknologi alternatif yang lebih efisien dan berkelanjutan mulai dikembangkan. Dua teknologi yang tengah mendapat perhatian adalah *Pneumatic rapid mixing* (PRM) dan *Hydrocyclone flocculator* (HCF). PRM memanfaatkan tekanan udara untuk menciptakan turbulensi yang merata dalam pencampuran koagulan dengan air baku, tanpa memerlukan pengaduk mekanis yang boros energi [6]. Di sisi lain, HCF memanfaatkan gaya sentrifugal dalam aliran tangensial untuk mempercepat pembentukan flok, sehingga waktu retensi dapat dipersingkat dan efisiensi pemisahan partikel meningkat [7].

Meskipun teknologi ini telah menunjukkan performa yang menjanjikan dalam beberapa studi internasional, aplikasi nyata di Indonesia masih tergolong minim. Mayoritas instalasi pengolahan air di Indonesia masih mengandalkan metode konvensional yang padat lahan dan energi, sementara kebutuhan akan air bersih meningkat tajam seiring pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perubahan iklim yang berimplikasi pada ketersediaan sumber air [8].

Penelitian ini berfokus untuk mengevaluasi secara sistematis efektivitas kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* dalam mengolah air sungai yang terkontaminasi, dengan menitikberatkan pada penyisihan parameter TSS dan kekeruhan. Dengan memvariasikan parameter teknis seperti aliran udara dan diameter hidrosiklon, serta menerapkan analisis statistik ANOVA dua arah, studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang relevan dalam pengembangan teknologi pengolahan air permukaan yang efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental skala laboratorium yang dilaksanakan untuk mengkaji efektivitas kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* dalam pengolahan air sungai. Air baku diambil dari Sungai Jagir, Surabaya, yang merepresentasikan kondisi perairan perkotaan dengan tingkat pencemaran tinggi. Rangkaian eksperimen dilakukan di Laboratorium Riset Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, pada periode Juni hingga Juli 2025. Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan dua variabel bebas utama, yaitu debit udara injeksi dan diameter hidrosiklon, sementara parameter uji meliputi *Total Suspended Solids* (TSS) dan kekeruhan yang dianalisis secara statistik menggunakan uji ANOVA dua arah

Penelitian ini menguji tiga parameter kualitas air sebagai indikator efektivitas sistem pengolahan, yaitu kekeruhan, Total Suspended Solids (TSS), dan pH. Pengukuran dilakukan sebelum dan sesudah proses pengolahan menggunakan teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator*, dengan mengacu pada metode Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk memastikan validitas dan keterbandingan data.

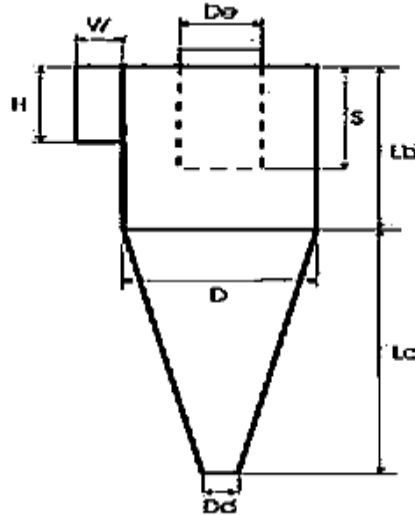
Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas debit udara injeksi, yang divariasikan pada tiga tingkat yaitu 70 L/min, 55 L/min, dan 40 L/min, serta diameter *hydrocyclone*, yaitu 15 cm dan 20 cm. Variasi ini dipilih untuk menganalisis pengaruh masing-masing konfigurasi terhadap efisiensi penyisihan partikel. Variabel tetap meliputi debit air yang dialirkan ke dalam sistem reaktor sebesar 12 L/min, jenis koagulan yang digunakan yaitu *Poly Aluminium Chloride* (PAC) dengan konsentrasi 75 mg/L, serta karakteristik air sampel yang berasal dari Sungai Jagir, Surabaya. Selain itu, *Detail Engineering Design* (DED) reaktor juga dijaga tetap sepanjang seluruh rangkaian eksperimen untuk memastikan konsistensi kondisi operasi.

Menurut Cooper & Alley [9] penentuan dimensi *hydrocyclone* adalah sebagai berikut.

**Tabel 1.** Penentuan Dimensi *Hydrocyclone*

Dimensi	Perbandingan
Diameter <i>Hydrocyclone</i> D/D	1.0
Tinggi Inlet H/D	0.5
Lebar Inlet W/D	0.2

Dimensi	Perbandingan
Diameter Overflow $D_e/D$	0.5
Panjang Vortex Finder $S/D$	0.5
Panjang Cylindrical Section $L_b/D$	1.5
Panjang Conical Section $L_c/D$	2.5
Diameter Underflow $D_d/D$	0.375



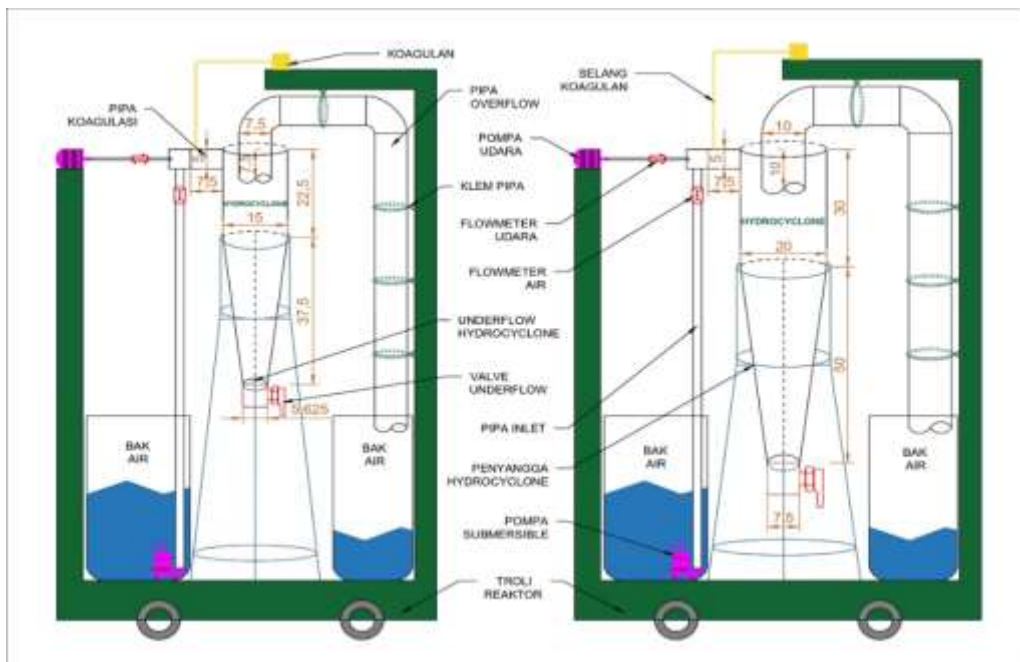
Gambar 1. Keterangan Dimensi *Hydrocyclone*

### Prosedur Penelitian

Sebelum pelaksanaan eksperimen utama, dilakukan *jar test* koagulan PAC untuk menentukan dosis optimum. [10] melakukan penelitian terhadap air baku PDAM Tirta Musi Palembang yang bersumber dari Sungai Musi dan Sungai Ogan, dengan tujuan menentukan dosis optimum koagulan PAC melalui uji *jar test* pada rentang konsentrasi 15–90 mg/L. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dosis 75 mg/L merupakan yang paling efektif untuk kondisi air sungai dengan kekeruhan sedang hingga tinggi, dengan mempertimbangkan aspek efisiensi proses, kestabilan pH, dan biaya operasional. Selain itu, PAC dinilai lebih unggul secara efisiensi karena dosis 75 mg/L tersebut sebanding dengan penggunaan tawas pada kisaran 30–50 ppm.

Hasil pengujian *jar test* juga menunjukkan bahwa konsentrasi 75 mg/L menghasilkan penyisihan TSS dan kekeruhan yang paling efektif, sehingga digunakan dalam seluruh tahapan berikutnya. Air sungai dari Sungai Jagir dicampurkan dengan larutan PAC sesuai dosis yang ditetapkan. Pencampuran ini dialirkan dalam sistem *pneumatic rapid mixing*, yang mana pencampuran berlangsung dengan injeksi udara bertekanan pada tiga variasi debit 70 L/min, 55 L/min, dan 40 L/min. Turbulensi yang dihasilkan udara menggantikan fungsi agitator mekanik, memungkinkan pencampuran cepat dalam waktu kontak tetap.

Selanjutnya, aliran dialirkan ke unit *hydrocyclone flocculator* dengan dua konfigurasi diameter, yaitu 15 cm dan 20 cm, untuk mempercepat proses flokulasi melalui gaya sentrifugal. Setelah proses flokulasi, air diarahkan ke unit sedimentasi sederhana untuk pemisahan flok secara gravitasi. Sampel air jernih yang diperoleh kemudian diuji untuk parameter kekeruhan, TSS, dan pH menggunakan alat ukur terstandar dan metode pengujian sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI). Berikut **Gambar 2** ilustrasi reaktor penelitian.



Gambar 2. Rangkaian Reaktor

### Analisis Data

Data hasil eksperimen disajikan dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah proses analisis secara deskriptif serta memberikan gambaran visual terhadap pengaruh masing-masing perlakuan. Grafik disusun dengan sumbu x merepresentasikan variasi variabel bebas, yaitu debit udara dan diameter *hydrocyclone*, sementara sumbu y menunjukkan persentase penurunan kekeruhan dan TSS sebagai parameter efektivitas. Selanjutnya, data dianalisis menggunakan dua pendekatan, yaitu analisis efisiensi penyisihan dan analisis statistik ANOVA dua arah. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menganalisis sejauh mana kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* mampu meningkatkan kualitas air sungai secara signifikan. Melalui pendekatan tersebut, diperoleh informasi mengenai kontribusi masing-masing perlakuan terhadap efisiensi pengolahan serta perbandingan antar konfigurasi, sehingga dapat diidentifikasi kombinasi sistem yang paling optimal.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Uji laboratorium pertama dilakukan pada air sampel yaitu air sungai, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui konsentrasi awal setiap parameter yang nanti akan diuji kembali setelah proses pengolahan. Hasil uji awal air sampel tertera pada tabel dibawah.

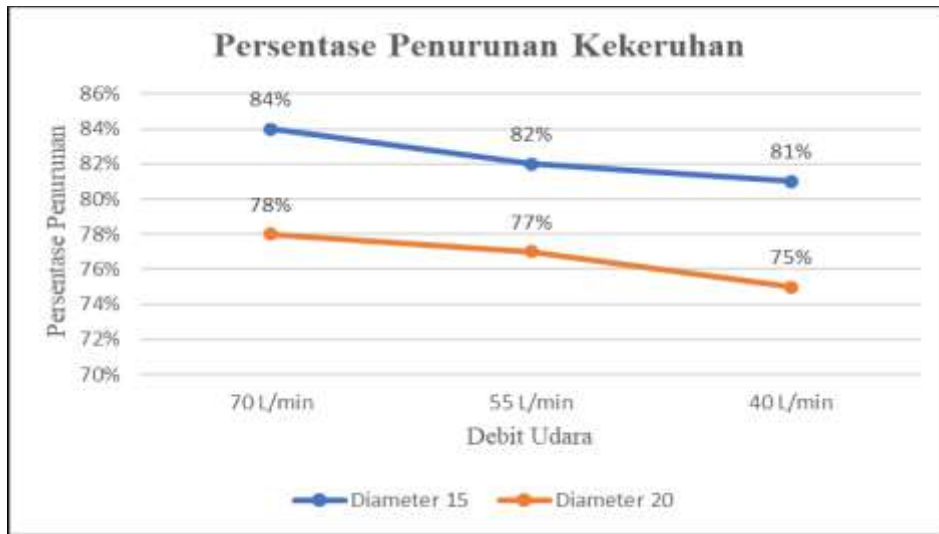
Tabel 2. Hasil Uji Awal Air Sungai

Parameter	Hasil Uji	Baku Mutu	Peraturan
Suhu	26,9°C	±3 suhu udara	PERMENKES RI No.2 Tahun 2023
pH	7,6	6,5 – 8,5	
Kekeruhan	28,7 NTU	<3 NTU	PP 22 Tahun 2021
TSS	82 mg/L	40 mg/L	

Pengujian awal menunjukkan bahwa kualitas air Sungai Jagir, khususnya pada parameter kekeruhan dan *Total Suspended Solids* (TSS), melebihi ambang batas yang ditentukan dalam peraturan baku mutu air di Indonesia. Kondisi ini mengindikasikan bahwa air sungai belum layak digunakan secara langsung dan memerlukan proses pengolahan lanjutan untuk menurunkan kadar partikel tersuspensi serta meningkatkan kejernihan. Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan pengujian lanjutan dengan memvariasikan debit udara dan diameter *hydrocyclone* guna mengevaluasi pengaruh masing-masing konfigurasi terhadap penurunan parameter kualitas air. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengidentifikasi kombinasi teknis yang paling efektif dalam meningkatkan efisiensi proses pengolahan air sungai dengan karakteristik yang telah teridentifikasi sebelumnya.

**Pengaruh Debit Udara dan Diameter Hydrocyclone Pada Penyisihan Kekeruhan**

Hasil penelitian yang telah dilakukan dengan variasi debit udara pneumatic rapid mixing dan variasi diameter hydrocyclone flocculator terhadap parameter uji kekeruhan tersaji dalam grafik dibawah ini.

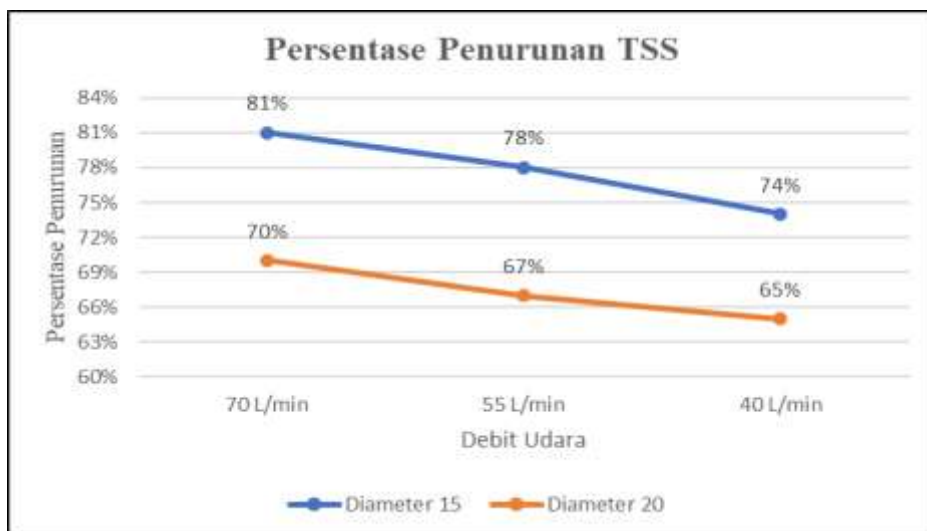


**Gambar 3.** Grafik Persentase Penyisihan Kekeruhan

Grafik penurunan kekeruhan menunjukkan bahwa peningkatan debit udara berkontribusi signifikan terhadap efektivitas proses koagulasi dan pembentukan flok. Debit udara sebesar 70 L/min menghasilkan kekeruhan akhir terendah, mencerminkan pencampuran cepat yang lebih efisien dan distribusi koagulan yang lebih seragam dalam aliran. Selain itu, diameter *hydrocyclone* turut memengaruhi hasil pemisahan, di mana penggunaan diameter 15 cm memberikan efisiensi penurunan kekeruhan yang lebih baik dibandingkan diameter 20 cm. Efektivitas ini kemungkinan disebabkan oleh gaya sentrifugal yang lebih kuat pada unit berdiameter kecil, sehingga flok yang terbentuk dapat terpisah lebih optimal dari aliran air[11].

**Pengaruh Debit Udara dan Diameter Hydrocyclone Pada Penyisihan TSS**

Hasil penelitian yang telah dilakukan dengan variasi debit udara pneumatic rapid mixing dan variasi diameter hydrocyclone flocculator terhadap parameter uji tss tersaji dalam grafik dibawah ini.



**Gambar 4.** Grafik Persentase Penyisihan TSS

Grafik penurunan TSS menunjukkan tren yang sejalan dengan hasil pengukuran kekeruhan. Kombinasi antara debit udara 70 L/min dan *hydrocyclone* berdiameter 15 cm memberikan hasil penurunan TSS paling optimal, menandakan efektivitas sistem dalam menangkap serta mengeluarkan partikel tersuspensi secara maksimal. Penurunan TSS pada konfigurasi ini jauh lebih signifikan dibandingkan perlakuan lainnya, mempertegas peran penting pencampuran cepat dan pemisahan berbasis gaya sentrifugal

dalam meningkatkan kinerja proses. Sebaliknya, penggunaan diameter 20 cm menunjukkan efisiensi yang lebih rendah, terutama saat debit udara kecil, yang kemungkinan disebabkan oleh melemahnya intensitas aliran pusaran di dalam unit

### ***Efektivitas Pnuematic Rapid Mixing dan Hydrocyclone Flocculator***

Kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* terbukti efektif dalam menurunkan kadar kekeruhan dan total suspended solids (TSS) pada air sungai dengan tingkat pencemaran awal yang tinggi. Proses pengolahan dengan variasi konfigurasi sistem menunjukkan bahwa peningkatan debit udara secara umum meningkatkan efisiensi pencampuran koagulan, sehingga menghasilkan flok yang lebih stabil dan mudah dipisahkan. Selain itu, pemilihan diameter hydrocyclone yang sesuai turut berperan penting dalam proses pemisahan, di mana diameter 15 cm memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan diameter 20 cm pada debit udara yang sama. Kombinasi optimal dari kedua parameter ini menunjukkan potensi besar dalam peningkatan kualitas fisik air sungai melalui proses koagulasi-flokulasi yang lebih efisien.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa kombinasi debit udara tinggi dan hydrocyclone berdiameter kecil secara konsisten menghasilkan performa terbaik dalam menurunkan kekeruhan dan TSS, sehingga dapat dijadikan acuan teknis dalam perancangan sistem pengolahan air sungai dengan karakteristik serupa. Efektivitas sistem *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* dalam pengolahan air Sungai Jagir terbukti signifikan berdasarkan hasil uji. Pada konfigurasi D15 (70 L/min), kekeruhan awal sebesar 28,7 NTU berhasil diturunkan menjadi 4,6 NTU, dan TSS dari 82 mg/L menjadi 15,6 mg/L, dengan efisiensi masing-masing sebesar 84% dan 81%. Efisiensi cenderung menurun pada debit udara yang lebih rendah atau diameter *hydrocyclone* yang lebih besar, menunjukkan bahwa intensitas turbulensi dan gaya sentrifugal berperan penting dalam pembentukan flok dan pemisahan partikel secara efektif.

Temuan ini konsisten dengan studi oleh [12], yang menunjukkan bahwa sistem koagulasi dengan *pneumatic rapid mixing* mampu menurunkan TDS hingga 78,9% dan kekeruhan hingga 90% pada air sungai. Dukungan tambahan diperoleh dari penelitian [13], yang mencatat efisiensi penyisihan kekeruhan sebesar 89% oleh teknologi *hydrocyclone flocculator* pada rentang awal 100–180 NTU. Dengan demikian, hasil empiris dari penelitian ini tidak hanya membuktikan efektivitas sistem secara mandiri, tetapi juga sejalan dengan literatur sebelumnya, memperkuat rekomendasi bahwa konfigurasi D15 dengan debit udara tinggi merupakan pendekatan optimal yang layak diadopsi untuk pengolahan air sungai dengan karakteristik serupa.



**Gambar 5.** Perbandingan Sampel Akhir dan Awal

**Gambar 5** memperlihatkan kontras visual yang jelas antara sampel awal dan akhir setelah melalui proses *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculation*. Sampel awal menunjukkan tingkat kekeruhan tinggi akibat konsentrasi partikel tersuspensi yang belum terflokulasi. Setelah dilakukan pencampuran cepat dengan udara bertekanan 70 L/min dan dialirkan ke dalam hydrocyclone berdiameter 15 cm, terbentuk flok yang besar dan stabil karena pengaruh gaya sentrifugal. Flok-flok tersebut berhasil terpisah dari air, menghasilkan sampel akhir yang lebih jernih. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut mampu meningkatkan efisiensi pembentukan dan pemisahan flok, sekaligus memperbaiki kualitas air secara fisik melalui pencampuran yang intensif dan distribusi partikel yang lebih merata.

**Analisis Statistik Terhadap Kekерuhan dan TSS**

Hasil analisis ANOVA dua arah terhadap parameter kekерuhan menunjukkan bahwa ukuran diameter *hydrocyclone* dan variasi debit udara berpengaruh secara signifikan terhadap efektivitas penurunan kekерuhan. Nilai P-value masing-masing sebesar 0,003 dan 0,036 mengindikasikan penolakan terhadap hipotesis nol (H0), yang berarti terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara perlakuan yang diuji.

**Two-way ANOVA: Kekерuhan versus Diameter Hydrocyclone; Debit Udara**

Source	DF	SS	MS	F	P
Diameter Hydrocyclone	1	7,4817	7,48167	4489,00	0,000
Debit Udara	2	9,9433	4,97167	2983,00	0,000
Error	2	0,0033	0,00167		
Total	5	17,4283			

S = 0,04082 R-Sq = 99,98% R-Sq(adj) = 99,95%

**Gambar 6.** Hasil Uji ANOVA Kekерuhan

Dari sisi diameter, *hydrocyclone* berukuran 15 cm menunjukkan kinerja yang lebih unggul dengan rata-rata efisiensi penurunan kekерuhan sebesar 82,33%, dibandingkan dengan diameter 20 cm yang hanya mencapai 76,67%. Selisih efisiensi sebesar 5,66% ini dapat dijelaskan secara teknis melalui prinsip kerja *hydrocyclone*, di mana ukuran yang lebih kecil menghasilkan kecepatan aliran dan gaya sentrifugal yang lebih besar, sehingga proses pemisahan partikel koloid berlangsung lebih efektif. Selain itu, debit udara juga terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Terdapat pola peningkatan efisiensi seiring dengan bertambahnya debit udara, yakni dari 78,0% pada 40 L/min, meningkat menjadi 79,5% pada 55 L/min, dan mencapai 81,0% pada 70 L/min. Perbedaan sebesar 3,0% antara debit terendah dan tertinggi menunjukkan bahwa peningkatan debit udara mampu memperkuat proses pencampuran cepat melalui pembentukan gelembung udara yang lebih intens, sehingga mempercepat destabilisasi partikel dan distribusi koagulan dalam sistem[14].

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa diameter *hydrocyclone* dan debit udara merupakan parameter utama dalam perancangan sistem pengolahan air berbasis teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator*. Kombinasi paling optimal untuk mencapai efisiensi penurunan kekерuhan tertinggi adalah penggunaan *hydrocyclone* berdiameter 15 cm dengan debit udara sebesar 70 L/min.

**Two-way ANOVA: TSS versus Diameter Hydrocyclone; Debit Udara**

Source	DF	SS	MS	F	P
Diameter Hydrocyclone	1	55,815	55,8150	146,88	0,007
Debit Udara	2	77,453	38,7267	101,91	0,010
Error	2	0,760	0,3800		
Total	5	134,028			

S = 0,6164 R-Sq = 99,43% R-Sq(adj) = 98,58%

**Gambar 7.** Hasil Uji ANOVA TSS

Sedangkan untuk analisis ANOVA dua arah terhadap parameter persentase penurunan padatan tersuspensi menunjukkan bahwa diameter *hydrocyclone* dan debit udara berpengaruh sangat signifikan terhadap efisiensi proses penyisihan. Nilai P-value sebesar 0,004 untuk diameter dan 0,036 untuk debit udara mengindikasikan penolakan terhadap hipotesis nol (H0), sehingga kedua variabel tersebut terbukti memberikan perbedaan yang signifikan secara statistik.

Dari aspek diameter, *hydrocyclone* berukuran 15 cm menunjukkan kinerja yang lebih optimal dengan rata-rata efisiensi penyisihan sebesar 77,67%, dibandingkan dengan diameter 20 cm yang hanya mencapai 67,33%. Selisih efisiensi sebesar 10,34% ini mengindikasikan bahwa pengurangan diameter secara signifikan meningkatkan efektivitas pemisahan partikel, yang didukung oleh peningkatan gaya sentrifugal pada ukuran yang lebih kecil. Sementara itu, debit udara juga menunjukkan pengaruh positif terhadap peningkatan efisiensi. Debit tertinggi sebesar 70 L/min menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 75,5%, diikuti oleh debit 55 L/min (72,5%) dan 40 L/min (69,5%). Perbedaan 6,0% antara debit terendah dan tertinggi menunjukkan bahwa peningkatan debit udara mampu memperkuat proses pencampuran cepat, memperbaiki distribusi koagulan dan mempercepat destabilisasi partikel koloid [15].

Model statistik yang digunakan memiliki tingkat keakuratan yang sangat tinggi, dengan nilai R-Squared sebesar 99,32% dan error rendah ( $S = 0,8165$ ), yang menunjukkan bahwa model tersebut mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data secara valid. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa diameter *hydrocyclone* dan debit udara merupakan parameter utama dalam perancangan sistem pengolahan air berbasis teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator*. Kombinasi paling efektif untuk mencapai efisiensi penyisihan maksimal adalah penggunaan *hydrocyclone* berdiameter 15 cm dengan debit udara sebesar 70 L/min.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi teknologi *pneumatic rapid mixing* dan *hydrocyclone flocculator* terbukti efektif dalam menurunkan Kekeruhan dan *Total Suspended Solids* (TSS) pada air sungai. Konfigurasi optimum diperoleh pada diameter *hydrocyclone* 15 cm dan debit udara 70 L/min, dengan efisiensi penyisihan mencapai 84% untuk kekeruhan dan 81% untuk TSS. Hasil uji ANOVA dua arah menunjukkan bahwa kedua variabel bebas tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas proses, serta adanya interaksi antara debit udara dan diameter *hydrocyclone* yang menentukan performa sistem secara keseluruhan. Secara mekanistik, pencampuran intens oleh injeksi udara dalam reaktor pipa, dikombinasikan dengan pemisahan flok berbasis gaya sentrifugal dalam reaktor cone, menghasilkan proses koagulasi-flokulasi yang efisien, stabil, dan sesuai untuk diterapkan dalam pengolahan air dengan tingkat kekeruhan tinggi.

#### 5. Referensi

- [1] A. Marganingrum, D., Roosmini, D., & Sabar, "River water quality status of Citarum river," *Indones. J. Environ. Prof.*, vol. 2, no. 1, pp. 55–64, 2018.
- [2] L. Fakhruddin, M., Nofdianto, N., & Subehi, "Penilaian Kualitas Air di Sungai-Sungai Indonesia: Tantangan Dan Peluang Untuk Pengelolaan Berkelanjutan," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 193(4), p. 186, 2021.
- [3] S. Albert, C. Pohan, and A. Amalia, "Perbandingan Diameter Hydrocyclone untuk Menurunkan Kadar Kekeruhan dan Total Suspended Solids pada Unit Flokulasi Hydrocyclone," *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 11676–11683, 2025, [Online]. Available: <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/613/474>.
- [4] E. Yohana, B. K. P. Mohammad Tauviquirrahman, K.-H. Choi, and H. Carles, "Karakteristik Dan Performa Cyclone Separator Dengan Penambahan Vortex Finder (Tapered Out – Cylinder In) Dan Variasi Pendinginan Pada Cone Cyclone Dengan Menggunakan Simulasi Numerik Eflita," *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 11, no. 2, pp. 191–204, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>.
- [5] M. Bahari and A. Amalia, "Perbandingan koagulan komersial dan biokoagulan biji pepaya pada flokulasi hydrocyclone terbuka dalam menurunkan total suspended solid (tss)," *J. Serambi Eng.*, vol. X, no. 1, pp. 11805–11812, 2025.
- [6] F. N. Zingga, F. Rosariawari, and E. Mulyadi, "Penyisihan TDS dan Kekeruhan Menggunakan Pneumatic Rapid Mixing dan Baffle Channel pada A," *Semin. Nas.*, vol. 1, no. 1, pp. 16–25, 2020.
- [7] B. Aryal, P. Gurung, S. Singh Pradhan, R. Shrestha, A. Kapali, and R. Dhakal, "Design, Fabrication and Testing of Hydrocyclone Separator As Sediment Separation System," *KEC Conf.*, no. January 2021, pp. 7–11, 2019.
- [8] D. R. Suminar and N. Nurcahyo, "Karakteristik Hydrocyclone untuk Pemisahan Minyak dan Air," *J. Tek. Kim. dan Lingkungan.*, vol. 4, no. 2, pp. 133–140, 2020, doi: 10.33795/jtkl.v4i2.160.
- [9] D. Cooper and C. Alley, "Air Pollution Control A Desing Approach." p. 738, 2002.
- [10] Sisnayati, E. Winoto, Yhopie, and S. Aprilyanti, "Perbandingan Penggunaan Tawas Dan PAC Terhadap Kekeruhan Dan Ph Air Baku Pdam Tirta Musi Palembang," *J. Redoks*, vol. 6, no. 2, pp. 107–116, 2021, doi: 10.31851/redoks.v6i2.5841.
- [11] Novianto, Dwi Agus. *Penyisihan Kekeruhan Air Permukaan Dengan Koagulan PAC Pada Proses Koagulasi Sistem Hidrolis*. Diss. UPN Veteran Jawa Timur, 2021.
- [12] T. Abdullah, "Studi Penurunan Kekeruhan Air Permukaan Dengan Proses Flokulasi Hydrocyclone Terbuka," *Tesis*, pp. 1–100, 2018.
- [13] H. S., "Kajian Pengendapan Partikel Flokulen dengan Hydrocyclone Terbuka," (*Doctoral Diss. Inst. Teknol. Sepuluh Nopember*)., pp. 35–55, 2019.

- 
- [14] Y. Wijayanti, “Pengaruh Debit Terhadap Dinamika Gelembung Udara dalam Kolom Aerator (Penelitian Awal Pembuatan Model Matematika Proses Aerasi),” *J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 133–147, 2008.
- [15] Ibrahim, Airlangga. *Karakteristik Aliran Dua Fasa Gas-Cairan Non-Newtonian Melalui Pipa Lurus*. Diss. Universitas Brawijaya, 2018.