

Pengaruh Jumlah Blade, Kemiringan Sudut dan Jarak Pengaduk dari Dasar Pada Proses Koagulasi Flokulasi dalam Menurunkan Parameter TSS dan Kekeruhan

Muhammad Luqman Dzaky, Tuhu Agung Rachmanto*

Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: tuhu.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 3 Februari 2025

Disetujui: 10 Februari 2025

Abstract

The quality of river water is influenced by the levels of Total Suspended Solids (TSS) and turbidity, which serve as indicators of environmental pollution. An effective method to reduce these parameters is the coagulation-flocculation process. The effectiveness of this process depends on physicochemical and hydrodynamic factors, including impeller design. However, hydrodynamic aspects such as the number of blades, blade angle, and distance of the impeller from the bottom are rarely considered in detail in previous studies. Therefore, the objective of this study is to analyze the optimal impeller design to improve TSS and turbidity removal efficiency. This study examines variations in the number of blades (2, 4, and 6), blade angles (0°, 30°, 45°, and 60°), and impeller distance from the bottom (3 cm, 4 cm, and 5 cm). The results indicate that the optimum impeller design for TSS and turbidity reduction is 6 blades, 0° blade angle, and 5 cm impeller distance from the bottom. Under these conditions, TSS removal reached 93.5%, while turbidity removal reached 98.2%. These results demonstrate that proper impeller design can significantly improve the efficiency of the coagulation-flocculation process.

Keywords: *coagulation-flocculation, impeller design, TSS, turbidity, hydrodynamics*

Abstrak

Kualitas air sungai dipengaruhi oleh tingkat Total Suspended Solids (TSS) dan kekeruhan, yang dapat menjadi indikator pencemaran lingkungan. Salah satu metode efektif untuk menurunkan kedua parameter ini adalah proses koagulasi-flokulasi. Faktor fisika kimia dan hidrodinamika merupakan faktor penentu pada proses koagulasi-flokulasi. Namun, aspek hidrodinamika seperti jumlah blade, sudut kemiringan blade, dan jarak pengaduk dari dasar jarang diperhitungkan secara mendetail dalam penelitian sebelumnya. Maka penelitian ini akan menganalisis desain optimum pengaduk dalam meningkatkan efisiensi penyisihan TSS dan kekeruhan. Metode penelitian ini melibatkan variasi jumlah blade (2, 4, dan 6), sudut kemiringan blade (0°, 30°, 45°, dan 60°), serta jarak pengaduk dari dasar (3 cm, 4 cm, dan 5 cm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain pengaduk terbaik untuk menurunkan parameter TSS dan kekeruhan adalah konfigurasi dengan 6 blade, sudut kemiringan 0°, dan jarak pengaduk dari dasar 5 cm. Pada kondisi ini, terjadi penyisihan TSS sebesar 93,5% dan penyisihan kekeruhan sebesar 98,2%. Hasil ini menunjukkan bahwa desain pengaduk yang tepat dapat meningkatkan efisiensi koagulasi-flokulasi secara signifikan.

Kata Kunci: *koagulasi-flokulasi, desain pengaduk, TSS, kekeruhan, hidrodinamika*

1. Pendahuluan

Di sepanjang aliran sungai, kualitas air sangat penting untuk menjaga ekosistem yang seimbang dan keberlanjutan lingkungan. Salah satu aspek penting yang mempengaruhi kualitas air adalah konsentrasi suspended solid dan kekeruhan [6]. Kedua parameter ini dapat memberikan indikasi tentang tingkat pencemaran. Suspended solid terdiri dari partikel-partikel padat yang terlarut dalam air, dan kekeruhan, yang merupakan kehadiran partikel-partikel koloid yang mengaburkan air, adalah indikator utama yang diperhatikan dalam pemantauan kualitas air sungai [10].

Salah satu metode pengolahannya yaitu koagulasi-flokulasi. Proses koagulasi flokulasi yang tidak efektif akan memberikan beban lebih terhadap pengolahan selanjutnya. Secara umum terdapat dua aspek yang mempengaruhi efisiensi koagulasi-flokulasi, kondisi fisika kimia dan kondisi hidrodinamika. Kondisi fisika kimia berkaitan dengan jenis dan dosis koagulan, konsentrasi partikel, pH larutan dan sebagainya. Kondisi hidrodinamik berkaitan dengan geometri tangki, jenis pengaduk, jumlah blade pada pengaduk dan sebagainya. Namun kondisi hidrodinamik pada proses koagulasi flokulasi jarang dilibatkan [14].

Pengaduk sebagai komponen utama dari sistem pengadukan pada proses koagulasi flokulasi memiliki berbagai desain dan geometri yang mempengaruhi pola aliran fluida dalam sistem [7]. Variasi seperti jumlah blade dan geometri blade pada pengaduk dapat mempengaruhi gaya gesek, arah aliran, dan distribusi energi dalam medium yang diaduk. Jumlah blade pada pengaduk yang tepat dapat mempercepat proses pembentukan flok dengan meningkatkan kontak antar partikel dan koagulan [1]

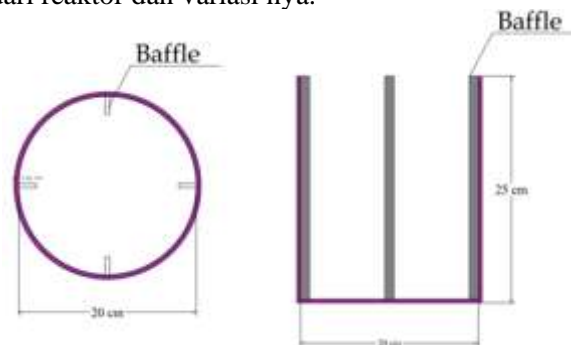
Jika ditinjau berdasarkan jenisnya, sudut kemiringan blade pada pengaduk juga mempengaruhi gaya gesek, arah aliran, dan distribusi energi dalam medium yang diaduk. Sudut kemiringan dan dimensi blade berpengaruh pada peningkatan efisiensi penyisihan. Sedangkan untuk pola penyebaran yang berbeda terjadi karena perbedaan jumlah blade [13].

2. Metode Penelitian

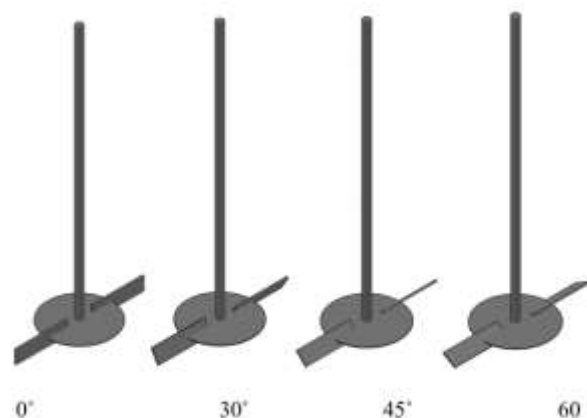
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh desain pengaduk terhadap efisiensi penyisihan Total Suspended Solids (TSS) dan kekeruhan dalam proses koagulasi-flokulasi. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi jumlah blade, sudut kemiringan blade, dan jarak pengaduk dari dasar tangki. Penelitian ini menggunakan sistem batch. Eksperimen dilakukan di laboratorium menggunakan sistem reaktor tangki berpengaduk yang dirancang khusus untuk proses koagulasi-flokulasi. Air uji yang digunakan berasal dari sampel air sungai yang memiliki kadar TSS dan kekeruhan tinggi. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah desain pengaduk, yang terdiri dari tiga parameter utama:

- Jumlah blade : 2 blade, 4 blade, dan 6 blade
- Sudut kemiringan blade : 0°, 30°, 45°, dan 60°
- Jarak pengaduk dari dasar tangki : 3 cm, 4 cm, dan 5 cm

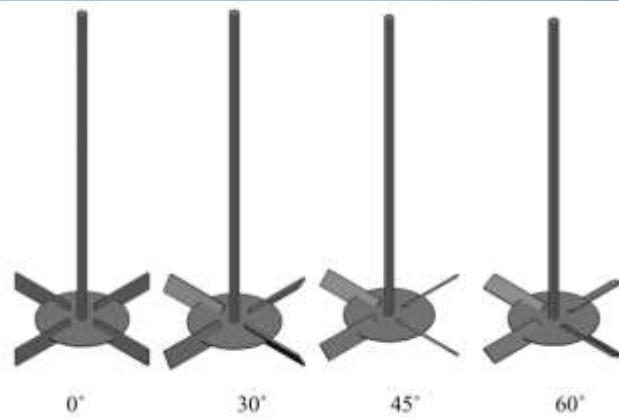
Tangki yang digunakan memiliki ukuran diameter 20 cm dengan kedalaman tangki 25 cm, diameter blade 10 cm, kecepatan putaran koagulasi 120 rpm, waktu pengadukan koagulasi 1 menit. Kecepatan putaran flokulasi 30 rpm dan waktu pengadukan flokulasi yaitu 20 menit. Untuk variabel jarak pengaduk dari dasar, nilainya didapat dari 30%, 40% dan 50% dari ukuran diameter blade. **Gambar 1** dibawah merupakan gambar desain dari reaktor dan variasi nya.



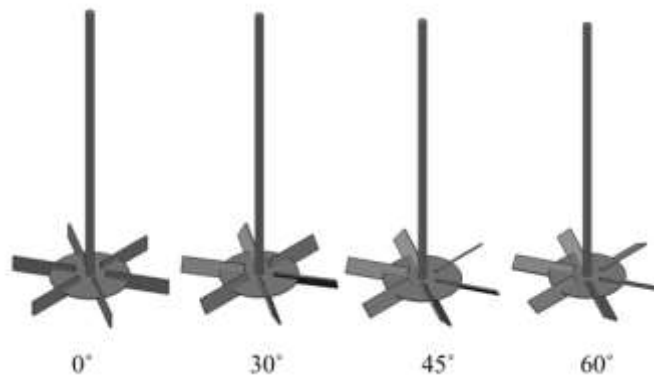
Gambar 1. Desain Tangki



Gambar 2. Pengaduk dengan 2 blade dan variasi sudut kemiringannya



Gambar 3. Pengaduk dengan 4 blade dan variasi sudut kemiringannya

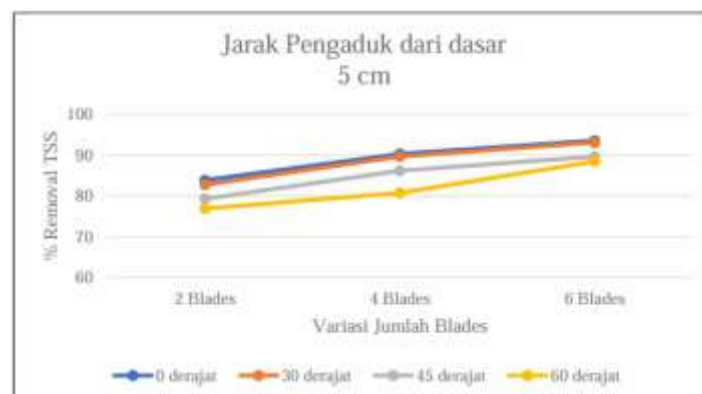


Gambar 4. Pengaduk dengan 6 blade dan variasi sudut kemiringannya

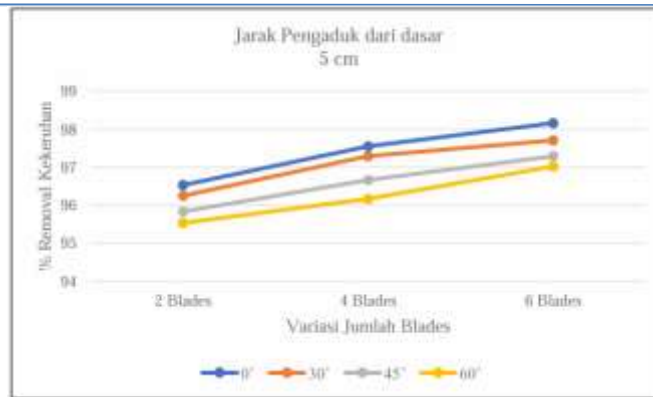
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Optimum Jumlah Blade

Jumlah blade pada pengaduk merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi proses koagulasi-flokulasi [5]. Peningkatan jumlah blade dapat meningkatkan distribusi gaya gesekan dan homogenisasi di dalam reaktor, sehingga mempercepat proses pembentukan flok. Namun, kelebihan jumlah blade juga dapat menyebabkan turbulensi berlebih, yang akan berpotensi merusak flok yang telah terbentuk [12]. Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap jumlah blade dengan variasi 2 blades, 4 blades, dan 6 blades, untuk menganalisis pengaruhnya terhadap parameter penurunan *Total Suspended Solids* (TSS) dan kekeruhan.



Gambar 5. Pengaruh Jumlah Blade Terhadap Penurunan Parameter TSS



Gambar 6. Pengaruh Jumlah Blade Terhadap Penurunan Parameter Kekeruhan

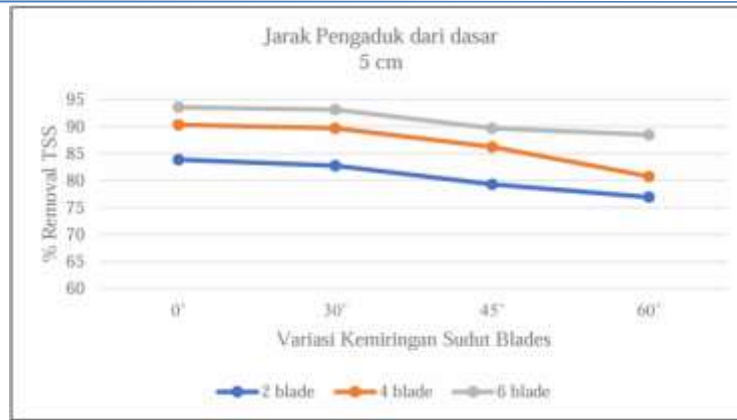
Gambar 5 dan **6** menunjukkan grafik hubungan Jumlah blade pada pengaduk terhadap % penyisihan parameter TSS dan Kekeruhan. Pada **Gambar 5** dapat dilihat bahwa penambahan jumlah blade dari 2 blades menjadi 4 blades hingga 6 blades memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi removal parameter TSS. Persentase removal TSS meningkat dari 83,9% untuk 2 blades, menjadi 90,3% pada 4 blades, hingga mencapai 93,5% dengan pengaduk yang menggunakan 6 blades. Peningkatan efisiensi removal parameter TSS ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah blades pada pengaduk memberikan pengaruh positif terhadap proses koagulasi flokulasi. Hal ini didasari dari jumlah blade yang lebih banyak akan menciptakan gaya pencampuran yang lebih merata di dalam tangki, sehingga meningkatkan peluang tumbukan antar partikel dan memungkinkan pembentukan flok yang lebih besar dan stabil.

Pada **Gambar 6** yang menunjukkan hubungan antara jumlah blade dengan % penyisihan parameter kekeruhan juga menunjukkan pola peningkatan pada setiap penambahan jumlah blades. Persentase removal kekeruhan meningkat dari 96,5% untuk 2 blades 97, 6% untuk 4 blades menjadi 98,2% pada pengaduk yang menggunakan 6 blades. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah blade mempengaruhi efisiensi pengurangan kekeruhan, efeknya cenderung mendekati saturasi pada jumlah blade yang lebih tinggi. Kekeruhan umumnya dipengaruhi oleh partikel halus yang lebih sulit diendapkan. Dengan jumlah blade yang lebih banyak, distribusi koagulan menjadi lebih merata, sehingga partikel-partikel kecil dapat lebih efektif terkoagulasi. Berdasarkan hasil analisa diatas, dapat disimpulkan bahwa jumlah blade yang paling optimal untuk proses koagulasi-flokulasi dalam penelitian ini adalah 6 blade. Efisiensi removal TSS dan kekeruhan yang dicapai masing-masing sebesar 93,5% dan 98,2%, menunjukkan bahwa penggunaan 6 blade merupakan kondisi optimum terhadap % penyisihan parameter TSS dan Kekeruhan pada proses koagulasi-flokulasi.

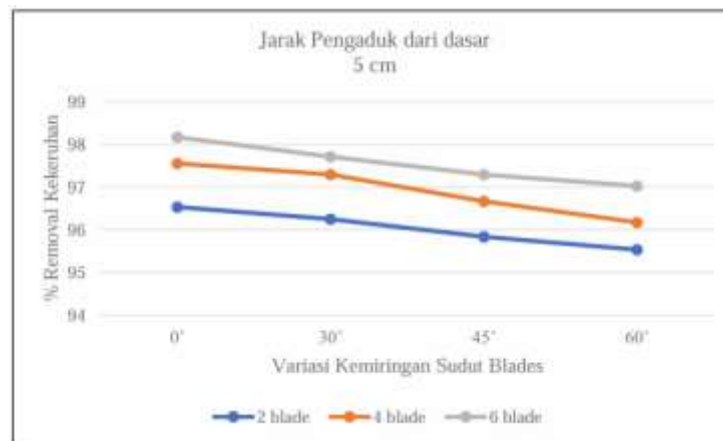
Hasil analisa jumlah blades diatas sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya [3], yang menyebutkan bahwa peningkatan jumlah blade dapat memperbaiki distribusi aliran tangensial dan radial dalam tangki pencampuran, sehingga mempercepat pembentukan flok. Selain itu, penggunaan blade dengan jumlah lebih banyak dapat memperbesar gaya geser yang membantu tumbukan antar partikel, mendukung pembentukan flok yang lebih besar dan stabil [15].

3.2 Kondisi Optimum Kemiringan Sudut Blade

Kemiringan sudut blade merupakan salah satu parameter desain pengaduk yang akan mempengaruhi pola aliran fluida di dalam reaktor pencampuran. Variasi sudut kemiringan blade dapat mempengaruhi gaya geser, pola aliran, dan distribusi energi turbulen di dalam larutan [15]. Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap sudut kemiringan blade pada pengaduk dengan variasi sudut kemiringan yaitu 0°, 30°, 45°, dan 60° untuk menganalisa pengaruhnya terhadap parameter penurunan Total Suspended Solids (TSS) dan kekeruhan. Parameter lain seperti jumlah blades dan jarak blade dari dasar reaktor dijaga konstan agar dapat memperoleh hubungan yang spesifik antara jumlah blade dan efisiensi proses. Berikut ini adalah hasil analisis untuk mendapatkan kemiringan sudut blades yang optimal:



Gambar 7. Pengaruh Kemiringan Sudut Blade Terhadap Penurunan Parameter TSS



Gambar 8. Pengaruh Kemiringan Sudut Blade Terhadap Penurunan Parameter Kekeruhan

Gambar 7 dan **8** menunjukkan grafik hubungan kemiringan sudut blades pada pengaduk terhadap % penyisihan parameter TSS dan kekeruhan. Berdasarkan grafik hasil penelitian, dapat diamati bahwa terdapat pengaruh signifikan dari variasi kemiringan sudut blades pengaduk terhadap % removal penurunan parameter (TSS) dan kekeruhan (turbidity). Dari **Gambar 7** menunjukkan pada sudut kemiringan 0°, % removal TSS mencapai nilai tertinggi yaitu sebesar 93,5%. Ketika sudut kemiringan meningkat menjadi 30°, nilai % removal parameter TSS sedikit menurun menjadi 92,9%. Nilai % removal parameter TSS mengalami penurunan yang lebih signifikan pada kemiringan sudut 45° dengan nilai % removal sebesar 89,7%, dan terus menurun hingga 88,5% pada sudut 60°. Penurunan ini menunjukkan bahwa sudut kemiringan yang lebih besar cenderung mengurangi efisiensi proses penghilangan TSS. Hal ini disebabkan oleh sudut kemiringan blades pengaduk yang lebih kecil dapat menciptakan gaya gesekan yang lebih besar antara blades dan cairan. Dan juga dengan sudut kemiringan yang lebih kecil maka blades memiliki luas permukaan yang lebih besar untuk melakukan kontak dengan aliran.

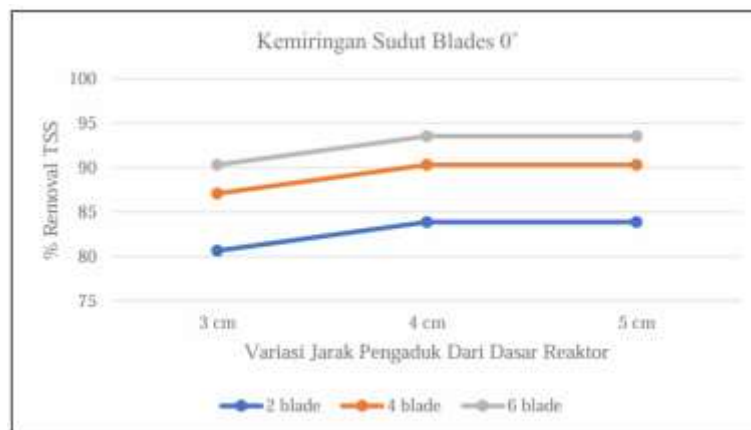
Hal tersebut dapat meningkatkan turbulensi dalam cairan, yang penting untuk mendukung pembentukan flok (gumpalan partikel) yang lebih efisien. Pembentukan flok yang baik sangat penting untuk penurunan parameter (TSS) dan penurunan kekeruhan. aliran turbulensi yang semakin tidak terfokus pada sudut yang lebih besar, sehingga partikel-partikel TSS tidak dapat mengendap secara optimal. Pada gambar 8, yang menunjukkan % removal parameter kekeruhan, tren serupa juga terlihat. Pada sudut kemiringan 0°, nilai % removal parameter kekeruhan mencapai nilai tertinggi, yaitu 98,2%. Ketika sudut kemiringan ditingkatkan menjadi 30°, nilai % removal parameter kekeruhan sedikit menurun menjadi 97,8%. Penurunan yang lebih besar terjadi pada sudut 45° dengan nilai 97,2%, dan mencapai nilai % removal parameter kekeruhan terendah sebesar 97,1% pada sudut 60°. Berdasarkan hasil analisa diatas, dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan blade yang paling optimal untuk proses koagulasi-flokulasi dalam penelitian ini adalah 0°. % removal parameter TSS didapati sebesar 93,5% dan % removal parameter kekeruhan sebesar 98,2%. Maka sudut kemiringan 0° merupakan kondisi optimum terhadap % penyisihan parameter TSS dan Kekeruhan pada proses koagulasi-flokulasi.

Hasil diatas sesuai berbagai penelitian sebelumnya [2] menyebutkan bahwa sudut blade pengaduk mempengaruhi pola aliran turbulensi di dalam reaktor pengendapan. Sudut yang lebih besar dari 30° cenderung meningkatkan turbulensi, tetapi aliran yang dihasilkan menjadi kurang terfokus, sehingga

menurunkan efisiensi penghilangan partikel tersuspensi. Kemiringan sudut blades pada pengaduk yang kecil memberikan keseimbangan optimal antara turbulensi dan sedimentasi, sehingga menghasilkan efisiensi tertinggi dalam penghilangan TSS dan kekeruhan [11].

3.3 Kondisi Optimum Jarak Pengaduk Dari Dasar Tangki

Pada proses koagulasi-flokulasi, desain pengaduk memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan nilai % penurunan parameter TSS dan penurunan kekeruhan. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi efektivitas pengadukan adalah jarak antara pengaduk dengan dasar tangki reaktor. Variasi jarak ini dapat mempengaruhi pola aliran dalam tangki dan distribusi energi yang diterapkan pada cairan, yang nantinya dapat memengaruhi pembentukan flok serta kecepatan pengendapan partikel. Jarak pengaduk dari dasar tangki juga mempengaruhi keberadaan zona mati atau area di dalam tangki yang tidak mendapat aliran pencampuran yang cukup. Jika pengaduk ditempatkan terlalu dekat dengan dasar, maka tidak ada cukup sirkulasi dibagian atas tangki dan begitupun sebaliknya. Berdasarkan rumus perhitungan, jarak pengaduk dari dasar tangki berkisar 30-50% dari diameter pengaduk [8]. Maka pada penelitian ini digunakan 3 variasi jarak pengaduk dari dasar yaitu 30%, 40% dan 50% dari diameter pengaduk. Pada penelitian ini digunakan pengaduk dengan ukuran diameter 10 cm, maka variasi jarak pengaduk dari dasarnya yaitu 3 cm, 4 cm dan 5 cm. Parameter lain seperti jumlah blades dan sudut kemiringan blades dijaga konstan agar dapat memperoleh hubungan yang spesifik antara jarak pengaduk dari dasar reaktor dengan % removal parameter TSS dan kekeruhan. Berikut ini adalah hasil analisis untuk mendapatkan kemiringan sudut blades yang optimal:



Gambar 9. Pengaruh Jarak Pengaduk Dari Dasar Terhadap Penurunan Parameter TSS



Gambar 10. Pengaruh Jarak Pengaduk Dari Dasar Terhadap Penurunan Parameter Kekeruhan

Gambar 9 dan 10 menunjukkan grafik hubungan jarak pengaduk dari dasar tangki terhadap % penyisihan parameter TSS dan Kekeruhan. Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa pada jarak pengaduk 3 cm dari dasar reaktor memiliki nilai % penurunan parameter TSS tercatat sebesar 90,3%. Dan variasi jarak pengaduk 4 cm dan 5 cm dari dasar reaktor menunjukkan hasil yang lebih baik, yaitu 93,5% untuk keduanya. Dengan demikian, pengaruh jarak pengaduk antara 4 cm dan 5 cm terhadap penurunan TSS ternyata tidak berbeda signifikan, meskipun keduanya memberikan peningkatan yang cukup besar

dibandingkan dengan jarak 3 cm. Hal ini mengindikasikan bahwa jarak pengaduk 3 cm dari dasar reaktor tidak memberikan aliran turbulen yang cukup untuk mendukung koagulasi dan flokulasi sebgus nilai dari jarak 4 cm dan 5 cm.

Pada **Gambar 10** yaitu hubungan jarak pengaduk dari dasar reaktor terhadap % removal parameter kekeruhan menunjukkan hasil yang sedikit berbeda. Pada jarak 3 cm, % penurunan parameter kekeruhan tercatat sebesar 97,3%, yang kemudian meningkat sedikit pada jarak 4 cm menjadi 97,7%. Pada jarak 5 cm, didapati nilai % removal parameter kekeruhan terbesar yang mencapai 98,2%, dengan peningkatan yang sangat kecil dibandingkan dengan jarak 4 cm. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat sedikit peningkatan efisiensi pada jarak yang lebih jauh, pengaruhnya terhadap penghilangan kekeruhan relatif kecil. Semua variasi jarak pengaduk (3 cm, 4 cm, dan 5 cm) menunjukkan hasil yang sangat baik dalam mengurangi kekeruhan, dengan hanya sedikit perbedaan antara jarak pengaduk 4 cm dan 5 cm.

Dari **Gambar 9 Dan 10** diatas dapat disimpulkan bahwa jarak pengaduk 4 cm dan 5 cm memberikan hasil % penurunan parameter TSS yang lebih tinggi (93,5%) dibandingkan dengan jarak 3 cm (90,3%). Namun, perbedaan nilai % penurunan parameter TSS antara jarak 4 cm dan 5 cm tidak signifikan, menunjukkan bahwa kedua jarak ini memiliki performa yang hampir sama. Dalam hal penghilangan kekeruhan, meskipun jarak 3 cm sudah memberikan nilai % penurunan parameter kekeruhan yang sangat baik (97,3%), pengaruh peningkatan jarak menjadi 4 cm (97,7%) dan 5 cm (98,2%) hanya sedikit menambah efisiensi. Peningkatan penghilangan kekeruhan cenderung lebih kecil, yang menunjukkan bahwa setelah mencapai jarak tertentu, tambahan jarak pengaduk tidak memberikan dampak yang signifikan pada pengurangan kekeruhan.

Hasil data analisa diatas selaras dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya Pengaduk dengan jarak yang lebih jauh dari dasar atau bisa dikatakan posisinya lebih berada di tengah-tengah reaktor (misalnya 4 cm dan 5 cm) memungkinkan aliran yang lebih merata dan distribusi energi yang lebih efisien, yang pada gilirannya mendukung pembentukan flok yang lebih baik dan meningkatkan penghilangan TSS. Namun, setelah jarak tertentu (sekitar 4 cm), peningkatan efisiensi menjadi lebih terbatas. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengaduk dengan jarak yang lebih dekat dengan dasar (misalnya 3 cm) dapat menghasilkan aliran yang cukup baik, tetapi tidak seoptimal pengaduk yang lebih berada di tengah-tengah reaktor, terutama dalam hal distribusi koagulan dan pengaruh turbulensi terhadap proses flokulasi [4]. Pada jarak yang lebih besar (50% dari diameter pengaduk) yang mana pada penelitian kali ini yaitu 5 cm, pengaduk cenderung menghasilkan aliran yang lebih kuat dan turbulen yang dapat lebih efektif dalam mengaduk dan mendistribusikan koagulan ke seluruh volume tangki. Penelitian oleh Xie et al. [9] menunjukkan bahwa pengaduk yang diposisikan lebih dekat dengan bagian tengah tangki (lebih jauh dari dasar) dapat menciptakan aliran yang lebih merata, yang dapat meningkatkan pembentukan flok dan mengurangi TSS secara lebih efektif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum desain pengaduk yang paling terbaik untuk penurunan parameter TSS dan kekeruhan ada pada desain pengaduk dengan variasi 6 blade, sudut kemiringan 0° dan jarak pengaduk dari dasar 5 cm dengan nilai persen removal parameter TSS sebesar 93,5% dan persen removal parameter kekeruhan sebesar 98,2%. Hal tersebut dikarenakan penambahan jumlah blade pada pengaduk dan nilai sudut kemiringan yang kecil pada blade akan meningkatkan luas area pencampuran, distribusi turbulensi, dan peluang interaksi antar partikel dan posisi pengaduk yang berada lebih di area tengah reaktor yang akan menghasilkan aliran yang lebih merata dan homogen. Sehingga pemilihan desain pengaduk dengan jumlah blade yang lebih banyak, sudut kemiringan yang kecil dan posisi pengaduk yang berada lebih di area tengah dapat meningkatkan efisiensi proses koagulasi-flokulasi, mengoptimalkan pencampuran, mengurangi konsumsi energi, menekan biaya operasional, serta meningkatkan kualitas air hasil pengolahan sehingga lebih sesuai dengan standar lingkungan dan industri.

5. Referensi

- [1] Madhania, S., Muharam, Y., Winardi, S., & Purwanto, W. W. (2019). Mechanism of molasses–water mixing behavior in bioethanol fermenter. Experiments and CFD modeling. *Energy Reports*, 5, 454-461
- [2] Ahmad, M., & Bello, M. M. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application in water and wastewater treatment: A review. *Water*, 12(6), 1812. <https://doi.org/10.3390/w12061812>
- [3] Anil Yadav, & Trivedi, M. (2021). Coagulation-flocculation process for the treatment of pulp and paper industry wastewater: A review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 14–25.

- [4] Huang, Q., Ni, M., Zhang, Q., & Li, H. (2016). Influence of impeller placement on the mixing time in stirred tanks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(14), 3878–3885.
- [5] Jafar, M., Ali, S. M., & Khan, M. A. (2018). Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater treatment using response surface methodology. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 215–223.
- [6] Jiang, X., Gao, Y., Wang, Z., Liu, J., & Li, H. (2019). Removal of suspended solids and turbidity by flocculation in a stirred tank reactor. *Journal of Environmental Management*, 231, 582–589.
- [7] Masduqi, A., & Assomadi, A. F. (2012). *Operasi & proses pengolahan air* (2nd ed.). ITS Press.
- [8] Reynolds, T. D., & Richard, P. A. (1996). *Unit operations and processes in environmental engineering* (2nd ed.). PWS Publishing Company.
- [9] Rong, X., Wang, Y., & Ma, J. (2016). Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization. *Water Research*, 89, 329–338.
- [10] Sharma, P., Gupta, S., & Kumar, R. (2020). Advanced techniques for water and wastewater treatment: Current trends and future perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101274.
- [11] Shihab, A. S., & Hamad, A. T. (2018). Effect of inclination angle, dimensions of impeller blades, and velocity gradient on the efficiency of water flocculation. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(5), 969–977.
- [12] Smith, J., & Brown, R. (2020). The role of coagulation and flocculation in water treatment. *Journal of Water Treatment Technology*, 35(4), 256–269. <https://doi.org/10.1234/jwtt.2020.03504>
- [13] Suryadhiyanto, U., & Qiram, I. (2018). Pengaruh jumlah dan kemiringan sudu mixer poros vertikal (vertical stirred mixer) terhadap unjuk kerja pencampuran. *ROTOR: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(1), 25–29. <https://doi.org/10.19184/rotor.v11i1.5299>
- [14] Yang, Z., Wu, Z., Zeng, G., Huang, J., Xu, H., Feng, J., Song, P., Li, M., & Wang, L. (2014). Assessing the effect of flow fields on flocculation of kaolin suspension using microbial flocculant GA1. *RSC Advances*, 4(76), 40304–40310. <https://doi.org/10.1039/C4RA05560K>
- [15] Zhang, Y., Liu, Y., & Chen, J. (2019). Effect of impeller design on flocculation performance in a mixing tank. *Chemical Engineering Journal*, 375, 122044.