

Efektivitas *Airlift Reactor* dalam Menurunkan Kadar Besi dan Mangan Pada Pengolahan Air Tanah

Mutiara Saniyyah Rochmasia*, Tuhu Agung Rachmanto

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

*Koresponden email: 22034010135@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 17 Juni 2026

Disetujui: 22 Juni 2026

Abstract

Groundwater is widely used for domestic and industrial purposes; however, its quality is often affected by elevated concentrations of dissolved iron (Fe) and manganese (Mn). This study aimed to analyze the effectiveness of an *Airlift Reactor* (ALR) in reducing Fe and Mn concentrations through an aeration process. The experiment was conducted using a continuous-flow ALR with diffuser diameter variations of 6, 8, 10, and 12 cm and process times of 10, 15, 20, 25, and 30 minutes. Parameters analyzed included dissolved oxygen (DO), Fe concentration, and Mn concentration. The results showed that increasing process time enhanced oxygen transfer and promoted the oxidation of dissolved metals. The highest Fe removal efficiency reached 90.69%, while the highest Mn removal efficiency reached 79.51%, both obtained using an 8 cm diffuser at a process time of 30 minutes. These findings indicate that ALR is a promising alternative technology for improving groundwater quality through effective iron and manganese removal processes.

Keywords: *airlift reactor, groundwater treatment, aeration, iron, manganese, dissolved oxygen*

Abstrak

Air tanah merupakan salah satu sumber air yang banyak dimanfaatkan untuk kebutuhan domestik maupun industri, namun kualitasnya sering dipengaruhi oleh tingginya kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) terlarut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas *Airlift Reactor* (ALR) dalam menurunkan kadar Fe dan Mn melalui proses aerasi. Pengujian dilakukan menggunakan ALR sistem kontinu dengan variasi diameter diffuser 6, 8, 10, dan 12 cm serta waktu proses 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Parameter yang dianalisis meliputi oksigen terlarut (DO), kadar Fe, dan kadar Mn. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu proses mampu meningkatkan transfer oksigen dan mempercepat oksidasi logam terlarut. Efisiensi penyisihan Fe tertinggi mencapai 90,69%, sedangkan efisiensi penyisihan Mn tertinggi mencapai 79,51%, yang keduanya diperoleh pada penggunaan diffuser berdiameter 8 cm dengan waktu proses 30 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Airlift Reactor* berpotensi menjadi alternatif teknologi pengolahan air tanah yang efektif untuk menurunkan kadar besi dan mangan yang terlarut.

Kata Kunci: *airlift reactor, pengolahan air tanah, aerasi, besi, mangan, oksigen terlarut*

1. Pendahuluan

Air tanah adalah sumber air yang paling banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan domestik maupun industri karena ketersediaannya yang relatif stabil dan mudah diperoleh. Meskipun demikian, Karakteristik sangat memengaruhi kualitas air tanah dalam segi geologi serta proses interaksi antara air dan material penyusun akuifer selama berada di bawah permukaan tanah [1]. Kondisi tersebut menyebabkan berbagai unsur mineral dapat terlarut ke dalam air tanah, termasuk besi (Fe) dan mangan (Mn) yang sering ditemukan dalam konsentrasi cukup tinggi [2]. Keberadaan kedua logam tersebut dapat menurunkan kualitas air karena menghasilkan endapan dan mengubah warna, rasa, dan bau pada sistem distribusi air [3]. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 menetapkan kadar maksimum mangan dan besi sebesar 0,1 mg/L dan 0,2 mg/L dalam air minum [4].

Besi dan mangan dalam air tanah umumnya berada dalam bentuk ion terlarut Fe^{2+} dan Mn^{2+} sehingga tidak dapat dipisahkan secara langsung melalui proses fisik sederhana [5]. Salah satu pendekatan yang banyak diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah aerasi, yaitu proses penambahan oksigen ke dalam air guna mendorong terjadinya reaksi oksidasi [6]. Melalui proses ini, ion besi dan mangan terlarut dapat diubah menjadi bentuk yang lebih mudah dipisahkan melalui pengendapan maupun filtrasi [3]. Meskipun memiliki luas permukaan antarmuka yang relatif lebih kecil dibandingkan beberapa metode aerasi lainnya, aerasi difusi mampu memberikan waktu kontak antara udara dan air yang lebih lama sehingga tetap efektif dalam meningkatkan transfer massa oksigen. Metode ini umumnya dioperasikan

dengan waktu tinggal (*detention time*) berkisar antara 10–30 menit [7]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aerasi mampu menurunkan konsentrasi besi terlarut melalui kontak langsung dengan oksigen [8]. Selain itu, efisiensi penyisihan besi dan mangan melalui proses aerasi dilaporkan dapat mencapai 20–90% dan 20–60% bergantung pada kondisi operasi yang digunakan [9].

Salah satu pengembangan teknologi aerasi yang saat ini banyak diteliti adalah *Airlift Reactor* (ALR). Reaktor ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan densitas fluida antara zona riser dan downcomer sehingga menghasilkan sirkulasi internal tanpa memerlukan pengaduk mekanis [10]. Mekanisme tersebut memungkinkan terjadinya distribusi gelembung udara yang lebih merata serta meningkatkan kontak antara fase gas dan cair selama proses aerasi berlangsung [11]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *Airlift Reactor* memiliki kemampuan transfer oksigen yang lebih baik dibandingkan bubble column pada kondisi operasi yang sama [12]. Selain itu, penggunaan diffuser dengan ukuran yang lebih kecil mampu meningkatkan luas permukaan kontak antara udara dan air sehingga efisiensi transfer oksigen menjadi lebih tinggi [13]. Kemampuan transfer oksigen yang baik tersebut menunjukkan bahwa *Airlift Reactor* berpotensi untuk diterapkan pada proses oksidasi besi dan mangan dalam pengolahan air tanah.

Berbagai penelitian mengenai *Airlift Reactor* umumnya masih berfokus pada karakteristik hidrodinamika, pola aliran fluida, serta transfer massa oksigen di dalam reaktor [10], [11]. Namun, penelitian yang secara khusus mengkaji efektivitas *Airlift Reactor* dalam menyisihkan besi dan mangan pada air tanah masih belum banyak dilaporkan. Peningkatan transfer oksigen merupakan salah satu faktor yang berperan penting dalam proses oksidasi besi dan mangan sehingga berpotensi memengaruhi efisiensi penyisihan kedua logam tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis penggunaan *Airlift Reactor* dalam menurunkan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah.

2. Metode Penelitian

Tujuan dari penelitian eksperimental ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan *Airlift Reactor* (ALR) untuk mengurangi kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah. Sistem pengolahan *Airlift Reactor* kontinu digunakan, dengan diffuser berdiameter 6 cm, 8 cm, 10 cm, dan 12 cm. Waktu proses adalah 10 menit, 15 menit, 20 menit, 25 menit, dan 30 menit. Selama proses pengolahan, kondisi operasi dipantau menggunakan sistem berbasis Arduino yang terintegrasi dengan sensor *Dissolved Oxygen* (DO), sensor suhu, sensor kecepatan air, dan sensor kecepatan udara untuk memperoleh data secara *real-time*. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi kadar oksigen terlarut (DO), kadar besi (Fe), dan kadar mangan (Mn). Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan perubahan kadar setiap parameter pada masing-masing variasi perlakuan serta menghitung efisiensi penyisihannya.

Prosedur Penelitian

Air tanah dialirkan ke dalam *Airlift Reactor* (ALR) dan diaerasi menggunakan udara yang diinjeksikan melalui diffuser. Udara yang masuk ke dalam reaktor membentuk gelembung-gelembung yang bergerak ke atas pada zona *riser* sehingga menghasilkan perbedaan densitas antara *riser* dan *downcomer* yang memicu sirkulasi fluida secara kontinu. Selama proses berlangsung, oksigen dari gelembung udara berpindah ke dalam air dan meningkatkan kadar oksigen terlarut yang berperan dalam mengoksidasi besi dan mangan terlarut. Pengambilan sampel dilakukan pada menit ke-0, 10, 15, 20, 25, dan 30 untuk menganalisis perubahan kadar Fe dan Mn pada setiap variasi diameter diffuser dan waktu proses. Sampel yang telah diambil disimpan dalam botol kaca gelap dan ditempatkan dalam kotak pendingin sebelum dilakukan analisis laboratorium menggunakan metode SM APHA 24th, 3030B, 3111 B, 2023. Hasil pengujian kemudian digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi diameter diffuser dan waktu proses terhadap efektivitas penyisihan besi dan mangan dalam air tanah.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Karakteristik Awal Air Tanah

Karakteristik awal air tanah memberikan gambaran mengenai kondisi kualitas air sebelum dilakukan pengolahan menggunakan *Airlift Reactor* (ALR). Parameter yang dianalisis meliputi konsentrasi besi (Fe), mangan (Mn), dan oksigen terlarut (DO) karena ketiga parameter tersebut berperan penting dalam proses aerasi dan penyisihan logam terlarut. Data karakteristik awal digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi perubahan kualitas air setelah proses pengolahan serta untuk menganalisis pengaruh variasi diameter fine bubble diffuser dan waktu aerasi terhadap peningkatan DO dan penurunan konsentrasi Fe maupun Mn. Hasil karakteristik awal air tanah disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Uji Sampel Karakteristik Awal Air Tanah

No	Parameter	Baku Mutu	Kandungan Air Sampel	Keterangan
1.	Besi (Fe)	0,2 mg/L	0,36 mg/L	Belum Memenuhi
2.	Mangan (Mn)	0,1 mg/L	0,61 mg/L	Belum Memenuhi
3.	Oksigen Terlarut (DO)	> 4 mg/L	3,4 mg/L	Belum Memenuhi

Sumber: Hasil Uji Laboratorium (2026)

Berdasarkan **Tabel 1**, konsentrasi besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah masih berada pada tingkat yang berpotensi menurunkan kualitas air, sementara konsentrasi oksigen terlarut (DO) relatif rendah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa air tanah memerlukan proses pengolahan untuk meningkatkan kualitasnya sebelum digunakan. Rendahnya kadar oksigen terlarut dapat menyebabkan Fe dan Mn tetap berada dalam bentuk terlarut sehingga sulit dipisahkan secara alami. Oleh karena itu, aerasi menggunakan Airlift Reactor (ALR) diterapkan untuk meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut yang selanjutnya diharapkan dapat mempercepat proses oksidasi dan penyisihan Fe serta Mn dari air tanah.

3.2 Analisis Oksigen Terlarut

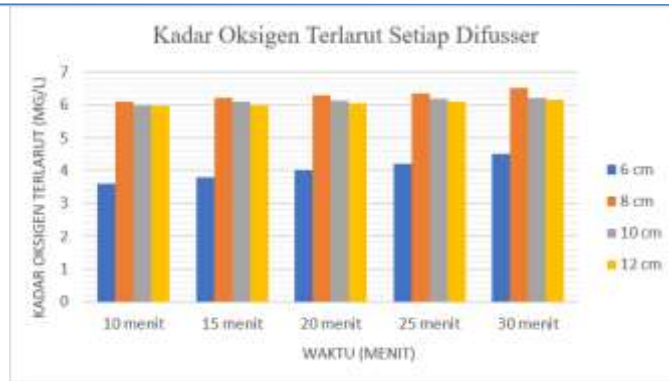
Konsentrasi oksigen terlarut (DO) digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengevaluasi kinerja proses aerasi pada *Airlift Reactor* (ALR). Peningkatan DO menunjukkan terjadinya transfer oksigen dari gelembung udara ke dalam air yang berperan penting dalam mendukung proses oksidasi besi (Fe) dan mangan (Mn). Oleh karena itu, pengaruh variasi diameter diffuser terhadap perubahan konsentrasi oksigen terlarut dianalisis berdasarkan hasil pengukuran pada setiap waktu aerasi. Perbedaan diameter diffuser dapat memengaruhi ukuran dan distribusi gelembung udara yang terbentuk selama proses aerasi. Kondisi tersebut berpengaruh terhadap luas bidang kontak antara udara dan air sehingga dapat memengaruhi efisiensi transfer oksigen ke dalam sistem. Hasil pengukuran konsentrasi DO untuk masing-masing variasi diffuser disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Analisis Oksigen Terlarut Setiap Diffuser

Diameter Diffuser (cm)	Waktu Proses (menit)	Oksigen Terlarut (mg/L)
6	10	5,97
	15	6
	20	6,05
	25	6,1
	30	6,15
	10	5,97
8	15	6
	20	6,05
	25	6,1
	30	6,15
	10	5,97
	15	6
10	20	6,05
	25	6,1
	30	6,15
	10	5,97
	15	6
	20	6,05
12	25	6,1
	30	6,15

Sumber: Hasil Penelitian (2026)

Berdasarkan **Tabel 1** dan **Gambar 1**, nilai oksigen terlarut (DO) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya durasi aerasi. Di antara seluruh variasi yang digunakan, diffuser berdiameter 8 cm menghasilkan konsentrasi DO tertinggi, yaitu meningkat dari 6,1 mg/L pada menit ke-10 menjadi 6,5 mg/L pada menit ke-30. Sebaliknya, diffuser berdiameter 6 cm menghasilkan peningkatan DO yang relatif lebih rendah, dari 3,6 mg/L pada awal pengamatan menjadi 4,5 mg/L pada menit ke-30. Temuan ini mengindikasikan bahwa perbedaan diameter diffuser berpengaruh terhadap kemampuan transfer oksigen ke dalam air selama proses aerasi berlangsung.



Gambar 1. Kadar Oksigen Terlarut Setiap Diffuser

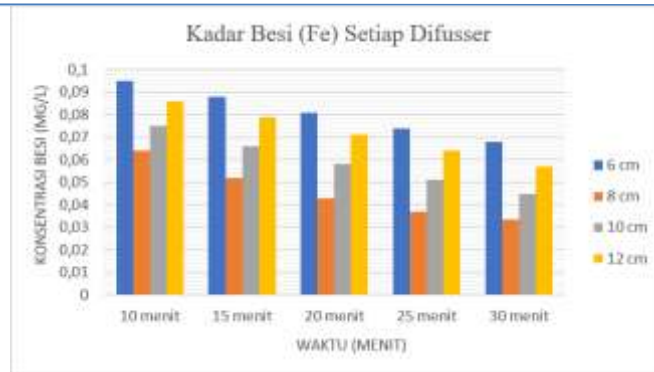
3.3 Analisis Kadar Besi

Pengambilan sampel dilakukan pada menit ke-0, 10, 15, 20, 25, dan 30 untuk mengevaluasi perubahan kadar besi (Fe) berdasarkan variasi diameter diffuser dan waktu aerasi. Selama penelitian, suhu air dipantau untuk mengetahui kondisi proses pengolahan. Sampel yang telah diambil disimpan dalam botol kaca gelap dan kotak pendingin sebelum dianalisis di laboratorium menggunakan metode SM APHA 24th, 3030B, 3111 B, 2023. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh diameter diffuser dan lama aerasi terhadap penurunan konsentrasi besi dalam air tanah. Hasil pengukuran kadar Fe pada setiap perlakuan disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Penurunan Kadar Besi (mg/L) dan % Removal

Diffuser (cm)	Waktu		% Removal
	Proses (menit)	Besi (mg/L)	
6	10	0,095	73,61%
	15	0,088	75,56%
	20	0,081	77,50%
	25	0,074	79,44%
	30	0,068	81,11%
8	10	0,064	82,22%
	15	0,052	85,56%
	20	0,043	88,06%
	25	0,037	89,72%
	30	0,0335	90,69%
10	10	0,075	79,17%
	15	0,066	81,67%
	20	0,058	83,89%
	25	0,051	85,83%
	30	0,045	87,50%
12	10	0,086	76,11%
	15	0,079	78,06%
	20	0,071	80,28%
	25	0,064	82,22%
	30	0,057	84,17%

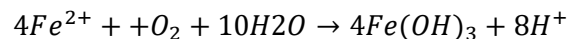
Sumber: Hasil Uji Laboratorium (2026)



Gambar 2. Grafik Penurunan Kadar Besi

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 2, kadar besi (Fe) menunjukkan tren penurunan pada seluruh variasi diameter diffuser seiring bertambahnya waktu aerasi. Pada menit ke-30, diffuser 8 cm menghasilkan kinerja terbaik dengan efisiensi penyisihan sebesar 90,69%, diikuti diffuser 10 cm sebesar 87,50%, diffuser 12 cm sebesar 84,17%, dan diffuser 6 cm sebesar 81,11%. Hasil ini menunjukkan bahwa lama kontak selama aerasi, semakin besar peluang terjadinya reaksi oksidasi antara oksigen terlarut dan besi terlarut sehingga konsentrasi Fe dalam air semakin berkurang. Tingginya efisiensi pada diffuser 8 cm diduga disebabkan oleh distribusi gelembung yang lebih optimal sehingga meningkatkan transfer oksigen ke dalam air.

Kondisi tersebut mempercepat oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} yang kemudian membentuk endapan hidroksida besi dan lebih mudah dipisahkan dari air, sehingga efisiensi penyisihan besi meningkat [14]. Dalam air tanah, besi dan mangan umumnya berada dalam bentuk ferro bikarbonat $[Fe(HCO_3)_2]$ dan sebagian dalam bentuk senyawa karbonat seperti $FeCO_3$ [15]. Reaksi oksidasi besi dan mangan selama proses aerasi dapat digambarkan sebagai berikut [16].



$Fe(OH)_3$ yang terbentuk sebagai hasil proses oksidasi merupakan senyawa besi ferri yang memiliki kelarutan sangat rendah di dalam air sehingga cenderung membentuk endapan.

3.4 Analisis Kadar Mangan

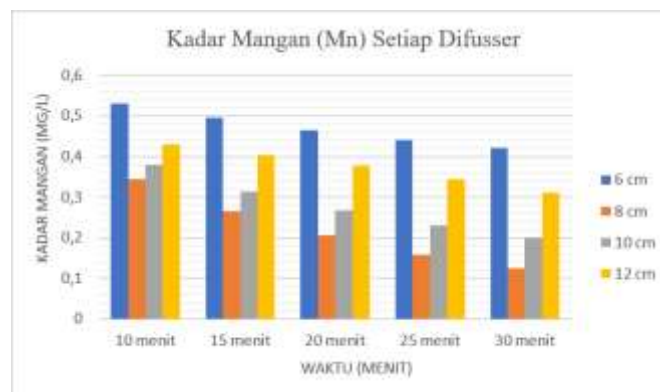
Pengambilan sampel dilakukan pada menit ke-0, 10, 15, 20, 25, dan 30 untuk mengevaluasi perubahan kadar mangan (Mn) berdasarkan variasi diameter diffuser dan waktu aerasi. Selama penelitian, suhu air dipantau untuk mengetahui kondisi proses pengolahan. Sampel yang telah diambil disimpan dalam botol kaca gelap dan kotak pendingin sebelum dianalisis di laboratorium menggunakan metode SM APHA 24th, 3030B, 3111 B, 2023. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh diameter diffuser dan lama aerasi terhadap penurunan konsentrasi mangan dalam air tanah. Hasil pengukuran kadar Mn pada setiap perlakuan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Penurunan Kadar Mangan (mg/L) dan % Removal

Diffuser (cm)	Waktu Proses (menit)	Mangan (mg/L)	% Removal
6	10	0,53	13,11%
	15	0,495	18,85%
	20	0,465	23,77%
	25	0,44	27,87%
	30	0,42	31,15%
8	10	0,344	43,61%
	15	0,265	56,56%
	20	0,205	66,39%

Diffuser (cm)	Waktu Proses (menit)	Mangan (mg/L)	%Removal
10	25	0,158	74,10%
	30	0,125	79,51%
	10	0,38	37,70%
	15	0,314	48,52%
	20	0,268	56,07%
	25	0,23	62,30%
12	30	0,2	67,21%
	10	0,43	29,51%
	15	0,404	33,77%
	20	0,378	38,03%
	25	0,345	43,44%
	30	0,312	48,85%

Sumber: Hasil Uji Laboratorium, 2026



Gambar 3. Grafik Penurunan Kadar Mangan

Berdasarkan **Tabel 4** dan **Gambar 3**, kadar mangan (Mn) menunjukkan kecenderungan menurun pada seluruh variasi diameter diffuser seiring dengan bertambahnya waktu aerasi. Kinerja terbaik diperoleh pada penggunaan diffuser berdiameter 8 cm, yang menghasilkan konsentrasi akhir mangan sebesar 0,125 mg/L dengan efisiensi penyisihan mencapai 79,51% pada menit ke-30. Sebaliknya, diffuser 6 cm memberikan hasil penyisihan paling rendah dengan efisiensi sebesar 13,11%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi diameter diffuser berpengaruh terhadap efektivitas penurunan konsentrasi mangan selama proses aerasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan mangan lebih rendah dibandingkan besi, yang mengindikasikan bahwa proses oksidasi mangan berlangsung lebih lambat selama aerasi. Variasi efisiensi yang diperoleh juga diduga dipengaruhi oleh sistem operasi kontinu, dimana konsentrasi mangan yang masuk ke dalam reaktor tidak selalu seragam sehingga kinerja penyisihan cenderung berfluktuasi [17]. Dalam air tanah, mangan umumnya ditemukan dalam bentuk mangano bikarbonat $[Mn(HCO_3)_2]$ serta sebagian dalam bentuk senyawa karbonat seperti $MnCO_3$ [15].

4. Kesimpulan

Penggunaan *Airlift Reactor* (ALR) terbukti mampu menurunkan kadar besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah melalui proses aerasi yang meningkatkan oksigen terlarut dan mempercepat oksidasi kedua logam tersebut. Variasi diameter diffuser memberikan pengaruh terhadap efektivitas penyisihan Fe dan Mn, dimana diffuser berdiameter 8 cm menghasilkan penurunan kadar besi tertinggi dengan efisiensi penyisihan sebesar 90,69%, sedangkan penurunan kadar mangan tertinggi diperoleh pada diffuser berdiameter 12 cm dengan efisiensi penyisihan sebesar 51,15%. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan oksigen terlarut selama proses aerasi berperan dalam mendukung proses oksidasi besi dan mangan sehingga

konsentrasi kedua parameter tersebut mengalami penurunan setelah pengolahan menggunakan *Airlift Reactor*.

5. Referensi

- [1] H. Hendrayana, *Pengelolaan Air Tanah di Indonesia*. 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Heru_Hendrayana/publication/275533360_Ketahanan_Air-Pengelolaan_Airtanah_di_Indonesia_2007_Heru_Hendrayana/links/553f36390cf20184050faacb.pdf
- [2] S. D. Nuryana, H. Hidartan, H. F. Yuda, and C. P. Riyandhani, "Penyaringan Unsur-Unsur Logam (Fe, Mn) Air Tanah Dangkal Di Kelurahan Jembatan Lima, Tambora, Jakarta Barat," *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia (JAMIN)*, vol. 1, no. 3, 2019, doi: 10.25105/jamin.v1i3.6044.
- [3] A. Muliawan and R. Ilmianih, "Metoda Pengurangan Zat Besi Dan Mangan Menggunakan Filter Bertingkat Dengan Penambahan UV Sterilizer Skala Rumah Tangga," *Jurnal Ilmiah Giga*, vol. 19, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.47313/jig.v19i1.298.
- [4] Kementerian Kesehatan, "Permenkes No. 2 Tahun 2023," *Kemendes Republik Indonesia*, no. 55, pp. 1–175, 2023.
- [5] N. Hendrasarie and R. Prihantini, "Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Menurunkan Besi Dan Mangan Terlarut Pada Air Sumur," *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, vol. 6, no. 2, pp. 136–146, 2020, doi: 10.20527/jukung.v6i2.9256.
- [6] D. W. Hendricks, *Water Treatment Unit Processes*. 2018. doi: 10.1201/9781315276052.
- [7] L. Streicher, *Treatment-Plant Design*, vol. 66, no. 11. 1974. doi: 10.1002/j.1551-8833.1974.tb02117.x.
- [8] R. H. Indriatmoko, R. H. Indriatmoko, A. Herlambang, and R. Nugroho, "Untuk Menurunkan Kandungan Zat Besi Dalam Air Tanah Experiment of the Application of the Micro Bubble," vol. 1, pp. 10–17, 2015.
- [9] C. Robichaud and J. Wiley, *This book was set in 10/12 Times Roman by Bi-Comp, Inc. and printed and bound by Hamilton Printing Company. Inc. The cover was printed by Lehigh Press*. 1997.
- [10] S. Drandev, K. I. Penev, and D. Karamanev, "Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 146, pp. 180–188, 2016, doi: 10.1016/j.ces.2016.02.041.
- [11] L. Li, X. Xu, W. Wang, R. Lau, and C. H. Wang, "Hydrodynamics and mass transfer of concentric-tube internal loop airlift reactors: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 359, no. May, p. 127451, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127451.
- [12] S. Bun, N. Chawaloesphonsiya, F. Nakajima, T. Tobino, and P. Painmanakul, "Comparative study of local gas-liquid hydrodynamics and mass transfer between conventional and modified airlift reactors," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 4, p. 103206, 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103206.
- [13] P. Ham, S. Bun, P. Painmanakul, and K. Wongwailikhit, "Effective analysis of different gas diffusers on bubble hydrodynamics in bubble column and airlift reactors towards mass transfer enhancement," *Processes*, vol. 9, no. 10, 2021, doi: 10.3390/pr9101765.
- [14] C. Rosidah, N. Pramitasari, A. M. Kartini, and T. K. Sari, "JURNAL JERNIH Vol . 3 No . 1 , Juni Tahun 2025 Pengaruh Waktu Aerasi Dan Sedimentasi Terhadap Penurunan Kadar Besi (Fe) Pada Air Sumur ISSN : 3025-3853 Air merupakan salah satu hal yang sangat diperlukan bagi semua makhluk hidup . Air memiliki banyak se," vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2025.
- [15] N. I. Said, "Pengantar Umum Perencanaan Fasilitas Pengolahan Air Minum," pp. 1–30, 2007.
- [16] B. Pradani, N. E. Hidayah, and H. O. Cahyonugroho, "Kinerja Aerasi Venturi Dalam Meningkatkan Kualitas Air," *Jurnal serambi engineering*, vol. IX, no. 4, pp. 10472–10745, 2024.
- [17] I. M. Novia, D. Hulu, and N. Hidayah, "Penggunaan Aerasi Venturi Dalam Menurunkan Kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Pengolahan Air Sumur," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. X, no. 4, pp. 15197–15201, 2025.