

Pengaruh Variasi Kerapatan *Draft Tube* Terhadap Karakteristik Hidrodinamika dan Kinerja *Airlift Reactor* Dalam Penyisihan Besi (Fe) dan Mangan (Mn)

Brigitta Ardiana Diva Azzahra¹, Tuhu Agung Rachmanto²

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

*Koresponden email: 22034010070@student.upnjatim.ac.id¹, tuhu.tl@upnjatim.ac.id²

Diterima: 12 Agustus 2026

Disetujui: 17 Agustus 2026

Abstract

Iron (Fe) and manganese (Mn) are parameters that must be considered in groundwater treatment because their concentrations can exceed quality standards, and their presence in dissolved form requires an oxidation process for removal. The airlift reactor (ALR) is one type of reactor that can be used in the aeration process, with its performance influenced by the hydrodynamic characteristics within the reactor. This study aims to analyze the effect of variations in the wire mesh density of the draft tube on the hydrodynamic characteristics and performance of the ALR in the removal of Fe and Mn. The study was conducted experimentally and via Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation, using draft tube sizes of 0 mm, 3 mm, and 5 mm. The results show that increasing the draft tube aperture size raised dissolved oxygen (DO) levels from 6.50 to 6.80 mg/L. Iron removal efficiency increased from 90.14% to 96.56%, while manganese removal efficiency rose from 79.51% to 86.07%. The CFD results showed that an increase in the draft tube opening size produced a wider flow pattern distribution and increased the simulated gas holdup from 0.0050 to 0.0069. These results indicate that the 5 mm draft tube variation produced the hydrodynamic and aeration conditions most conducive to Fe and Mn removal.

Keywords: *airlift reactor, hydrodynamic characteristics, gas holdup, computational fluid dynamics*

Abstrak

Besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan parameter yang perlu diperhatikan dalam pengolahan air tanah karena konsentrasinya dapat melebihi baku mutu dan keberadaannya dalam bentuk terlarut memerlukan proses oksidasi untuk dapat dipisahkan. *Airlift reactor* (ALR) merupakan salah satu reaktor yang dapat digunakan dalam proses aerasi, dimana kinerjanya dipengaruhi oleh karakteristik hidrodinamika di dalam reaktor. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kerapatan wire mesh draft tube terhadap karakteristik hidrodinamika dan kinerja ALR dalam penyisihan Fe dan Mn. Penelitian dilakukan secara eksperimen dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan variasi kerapatan *draft tube* 0 mm, 3 mm, dan 5 mm. Hasil pengukuran pada eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan ukuran kerapatan *draft tube* meningkatkan oksigen terlarut (DO) dari 6,50 mg/L menjadi 6,80 mg/L. Efisiensi penyisihan Fe meningkat dari 90,14% menjadi 96,56%, sedangkan penyisihan Mn meningkat dari 79,51% menjadi 86,07%. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa peningkatan ukuran kerapatan *draft tube* menghasilkan distribusi pola aliran yang lebih merata dan meningkatkan *gas holdup* simulasi dari 0,0050 menjadi 0,0069. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi *draft tube* 5 mm menghasilkan kondisi hidrodinamika dan aerasi yang paling mendukung penyisihan Fe dan Mn.

Kata Kunci: *reaktor pengangkutan udara, karakteristik hidrodinamika, penahan gas, dinamika fluida komputasi*

1. Pendahuluan

Air tanah sering digunakan sebagai sumber air bersih, tetapi kualitasnya dapat berubah-ubah tergantung pada kondisi hidrogeologi dan jenis mineral yang ada di dalam akuifer. Proses pelarutan mineral secara alami mengakibatkan air tanah mengandung berbagai macam logam terlarut, terutama besi (Fe) dan mangan (Mn) dengan konsentrasi yang melebihi baku mutu [1]. Tingginya kandungan besi (Fe) dan mangan (Mn) tidak hanya menurunkan kualitas fisik air melalui perubahan warna, rasa, dan pembentukan endapan, tetapi juga mengganggu sistem distribusi air minum [2]. Oleh karena itu, diperlukan proses pengolahan yang mampu menurunkan konsentrasi kedua logam tersebut sebelum air digunakan.

Pada kondisi air tanah yang miskin oksigen (anoksik), besi dan mangan umumnya berada dalam bentuk ion Fe^{2+} dan Mn^{2+} yang bersifat larut dan stabil di dalam air dan tidak bisa dipisahkan melalui proses

pengolahan fisik sederhana [3]. Proses aerasi merupakan salah satu metode yang dapat diterapkan untuk menghilangkan besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah [4]. Melalui proses ini, udara diinjeksikan ke dalam air sehingga meningkatkan konsentrasi oksigen terlarut (DO). Peningkatan oksigen terlarut mempercepat reaksi oksidasi ion Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} dan Mn^{2+} menjadi oksida mangan yang tidak larut sehingga lebih mudah dipisahkan melalui proses pengendapan [5]. Pada penelitian sebelumnya, efektivitas proses aerasi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain laju alir udara, waktu kontak, ukuran dan distribusi gelembung udara [6]. Meskipun demikian, faktor-faktor yang mempengaruhi aerasi tersebut pada dasarnya tidak bisa berdiri sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik hidrodinamika yang terjadi di dalam reaktor [7].

Salah satu jenis reaktor aerasi yang banyak dikembangkan adalah *airlift reactor* (ALR) yang memanfaatkan sirkulasi fluida secara alami akibat adanya perbedaan densitas antara daerah *riser* dan *downcomer* tanpa memerlukan komponen mekanis [8]. Karakteristik tersebut menjadikan *airlift reactor* (ALR) memiliki efisiensi perpindahan massa yang baik serta cocok diaplikasikan dalam berbagai proses pengolahan air dan limbah. Pada *airlift reactor* (ALR), karakteristik hidrodinamika seperti pola aliran fluida, distribusi gelembung, dan kecepatan laju aliran menentukan jumlah oksigen yang berhasil ditransfer ke dalam fase cair [9]. Semakin efektif perpindahan massa oksigen yang terjadi, semakin tinggi nilai oksigen terlarut yang tersedia untuk mengoksidasi Fe^{2+} dan Mn^{2+} [10]. Selain melalui pengujian eksperimen, karakteristik hidrodinamika juga dapat dianalisis menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang mampu menggambarkan pola aliran dan distribusi gelembung secara detail.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja *airlift reactor* (ALR) dipengaruhi oleh konfigurasi geometri reaktor. Konfigurasi tersebut meliputi, geometri seperti diameter dan tinggi *draft tube*, rasio diameter *draft tube* terhadap diameter reaktor, posisi *sparger*, yang secara keseluruhan dapat memengaruhi pola sirkulasi fluida, distribusi gelembung, *gas holdup*, dan karakteristik perpindahan massa oksigen di dalam reaktor [11]. Perubahan karakteristik hidrodinamika yang dihasilkan berpengaruh terhadap peningkatan nilai k_La dan oksigen terlarut (DO) yang membantu proses oksidasi Fe^{2+} dan Mn^{2+} [12]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih menggunakan *draft tube* konvensional dengan dinding *solid*, sedangkan kajian mengenai penggunaan *wire mesh draft tube* sebagai modifikasi geometri reaktor masih sangat terbatas [13]. Padahal, perubahan struktur dinding *draft tube* berpotensi mengubah mekanisme sirkulasi fluida antara daerah *riser* dan *downcomer*, yang selanjutnya memengaruhi karakteristik hidrodinamika dan proses perpindahan massa oksigen di dalam reaktor. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengkaji penggunaan *wire mesh draft tube* dengan variasi ukuran bukaan mesh sebagai modifikasi struktur dinding *draft tube* untuk menganalisis pengaruhnya terhadap karakteristik hidrodinamika dan kinerja *airlift reactor* dalam penyisihan besi (Fe) dan mangan (Mn).

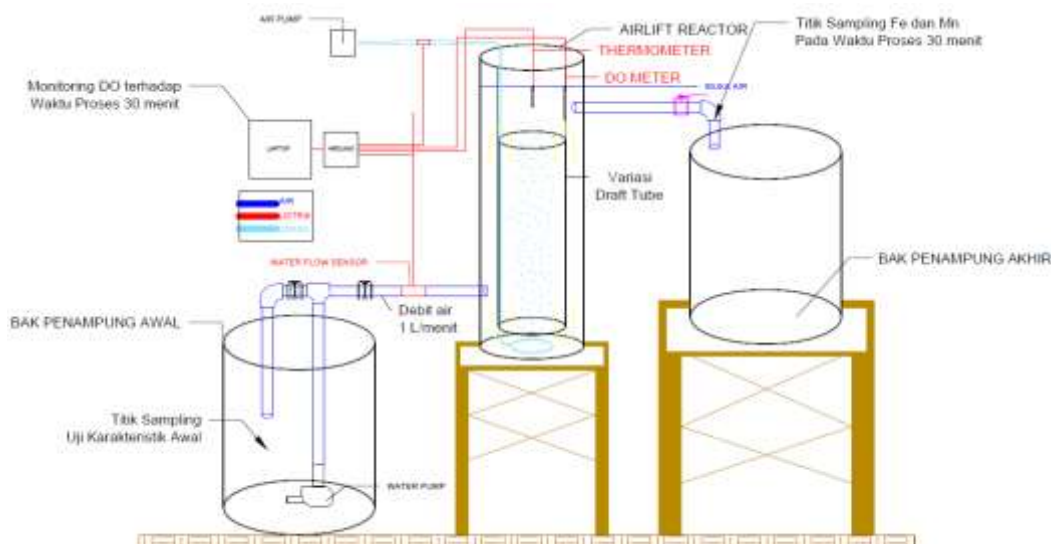
2. Metode Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi kerapatan *draft tube* terhadap karakteristik hidrodinamika di dalam reaktor serta proses penyisihan besi (Fe) dan mangan (Mn) pada air tanah. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *airlift reactor* (ALR) skala laboratorium dengan sistem aliran kontinu melalui pendekatan eksperimen dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Geometri *draft tube* divariasikan menjadi tiga variasi kerapatan *draft tube*, yaitu 0 mm, 3 mm, dan 5 mm. Hasil pengukuran pada eksperimen digunakan sebagai data primer pada simulasi untuk menggambarkan karakteristik aliran di dalam reaktor pada setiap variasi kerapatan *draft tube*. Hasil simulasi kemudian divalidasi menggunakan data pengukuran eksperimen untuk menganalisis hubungan antara karakteristik hidrodinamika dengan kinerja *airlift reactor* (ALR).

Pada eksperimen skala laboratorium, dilakukan sistem kontinu dengan debit air tanah yang dialirkan ke dalam reaktor sebesar 1 liter/menit dan debit udara yang dialirkan melalui diffuser sebesar 7,5 liter/menit. Pengujian dilakukan pada *draft tube* dengan kerapatan 0 mm, 3 mm, dan 5 mm. Setiap variasi *draft tube* dioperasikan pada waktu optimum yang sama, yaitu 30 menit dengan kondisi reaktor telah mencapai *steady state*. Selama proses berlangsung, konsentrasi *dissolved oxygen* (DO) dipantau secara real-time, sedangkan nilai *gas holdup* ditentukan berdasarkan selisih perubahan tinggi permukaan air sebelum dan saat di aerasi. Setelah waktu proses 30 menit, sampel air diambil untuk menganalisis konsentrasi Fe dan Mn. Analisis Fe dan Mn dilakukan menggunakan metode SM APHA 24th, 3030B, 3111 B, 2023. Data konsentrasi Fe dan Mn sebelum dan setelah pengolahan digunakan untuk menentukan efisiensi penyisihan, sedangkan data DO digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa volumetrik (k_La).

Prosedur Penelitian

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk menganalisis karakteristik hidrodinamika pada konfigurasi reaktor yang sama dengan eksperimen. Geometri reaktor dibuat berdasarkan dimensi dan variasi kerapatan *draft tube* yang digunakan pada eksperimen, kemudian dilakukan proses *meshing* dan penentuan kondisi batas sesuai kondisi operasi reaktor. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent untuk memperoleh distribusi pola sirkulasi fluida dan distribusi *gas holdup* pada setiap variasi kerapatan *draft tube*. Hasil simulasi selanjutnya dibandingkan dengan nilai hasil eksperimen untuk mengetahui kesesuaian model dalam merepresentasikan kondisi hidrodinamika reaktor. Validasi dilakukan dengan menghitung persentase error antara hasil simulasi dan eksperimen. Data hasil eksperimen dan simulasi kemudian dianalisis untuk mengetahui perubahan karakteristik hidrodinamika akibat variasi kerapatan *draft tube* serta keterkaitannya dengan transfer oksigen dan penyisihan Fe dan Mn.



Gambar 1. Desain *Airlift Reactor* (ALR) Skala Laboratorium
Sumber : Hasil Analisis (2026)

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Karakteristik Air Tanah

Sebelum proses pengolahan air baku menggunakan *airlift reactor* (ALR), dilakukan pengujian karakteristik awal terhadap sampel air tanah meliputi kadar besi (Fe), mangan (Mn), dan oksigen terlarut (DO). Uji karakteristik awal bertujuan untuk mengetahui kondisi kualitas air tanah sebelum dilakukan proses pengolahan, sehingga perubahan yang terjadi setelah proses pengolahan dapat dianalisis secara kuantitatif.



Gambar 2. Sampel Uji Karakteristik Awal Air Tanah
Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Tabel 1 Hasil Uji Karakteristik Awal Air Tanah

No.	Parameter	Baku Mutu	Hasil Uji Awal Air Baku	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.	<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	>4 mg/L	3,4 mg/L	Belum Memenuhi

Sumber : Hasil Uji Laboratorium (2026)

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 1**, diperoleh konsentrasi besi (Fe) sebesar 0,36 mg/L, mangan sebesar 0,61 mg/L, dan oksigen terlarut sebesar 3,4 mg/L. Mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023, kadar maksimum Fe dan Mn untuk masing-masing parameter sebesar 0,2 mg/L dan 0,1 mg/L. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi Fe dan Mn pada air baku berada diatas nilai baku mutu yang dipersyaratkan, sedangkan nilai oksigen terlarut (DO) sebesar 3,4 mg/L menunjukkan ketersediaan oksigen terlarut yang relatif rendah. Kondisi awal tersebut menjadi dasar penerapan proses aerasi menggunakan *airlift reactor* (ALR) untuk meningkatkan transfer oksigen terlarut ke dalam air dan diharapkan dapat mempercepat proses oksidasi serta menyisihkan konsentrasi Fe dan Mn dalam air tanah.

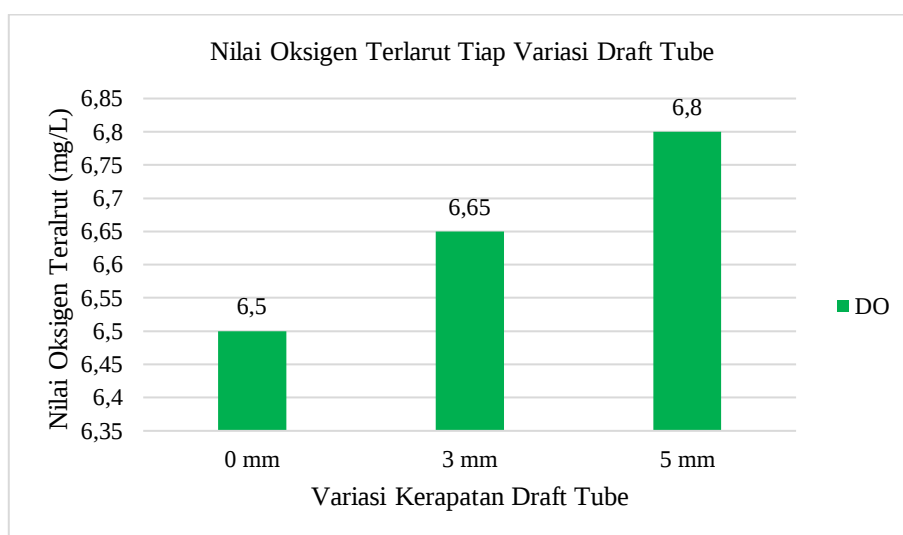
Analisis Konsentrasi Oksigen Terlarut (DO)

Berdasarkan **Tabel 2**, konsentrasi oksigen terlarut (DO) mengalami peningkatan setelah proses aerasi selama 30 menit pada seluruh variasi kerapatan *draft tube*. Konsentrasi DO awal pada seluruh variasi sebesar 3,4 mg/L, kemudian setelah dilakukan proses aerasi DO meningkat menjadi 6,50 mg/L pada variasi *draft tube* 0 mm, 6,65 mg/L pada variasi 3 mm, dan 6,80 mg/L pada variasi 5 mm. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa proses aerasi pada *airlift reactor* mampu meningkatkan ketersediaan oksigen terlarut di dalam fase cair [14]. Perbedaan nilai DO akhir pada setiap variasi juga menunjukkan bahwa perubahan kerapatan *draft tube* menghasilkan kondisi oksigen terlarut yang berbeda, dengan nilai DO tertinggi diperoleh pada variasi 5 mm.

Tabel 2 Hasil Pengukuran Oksigen Terlarut Tiap Variasi Kerapatan *Draft Tube*

Waktu Proses (menit)	Variasi Kerapatan <i>Draft Tube</i> (mm)	Oksigen Terlarut Awal (mg/L)	Oksigen Terlarut Akhir (mg/L)
30	0	3,4	6,5
	3		6,65
	5		6,8

Sumber : Hasil Penelitian (2026)



Gambar 3. Kadar Oksigen Terlarut Pada Tiap Variasi *Diffuser*

Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Berdasarkan **Gambar 3**, terjadi peningkatan konsentrasi oksigen terlarut seiring dengan bertambahnya ukuran kerapatan *draft tube*. Hal tersebut terjadi melalui udara yang diinjeksikan ke dalam reaktor menggunakan *diffuser* berpindah ke dalam air melalui gelembung udara. Semakin luas kontak

antara gelembung udara dan air, semakin banyak oksigen yang dapat masuk ke dalam fase cair [15]. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh pergerakan dan penyebaran gelembung serta sirkulasi air di dalam reaktor. Variasi kerapatan *draft tube* berpotensi mengubah kondisi tersebut karena adanya bukaan pada dinding *draft tube* yang memungkinkan terjadinya perubahan pergerakan air dan gelembung di dalam reaktor. Perbedaan kondisi tersebut menyebabkan jumlah oksigen yang masuk ke dalam air pada setiap variasi menjadi berbeda, sehingga menghasilkan nilai DO akhir yang berbeda.

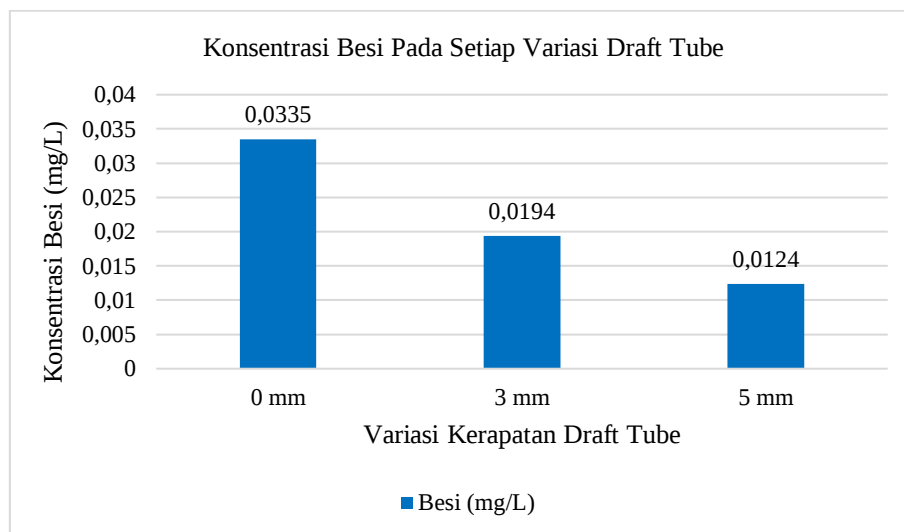
Analisis Penyisihan Konsentrasi Besi

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang disajikan pada **Tabel 3**, konsentrasi besi (Fe) mengalami penurunan setelah proses pengolahan selama 30 menit pada setiap variasi kerapatan *draft tube*. Setelah proses pengolahan, konsentrasi Fe berturut-turut mengalami penurunan menjadi 0,0355 mg/L pada *draft tube* 0 mm, 0,0194 mg/L pada *draft tube* 3 mm, dan 0,0124 mg/L pada *draft tube* 5 mm. Penurunan konsentrasi tersebut menunjukkan bahwa proses aerasi pada *airlift reactor* mampu menyisihkan besi terlarut (Fe) dari air baku. Diperoleh juga persen removal pada setiap variasi kerapatan *draft tube*, yaitu dari 90,14% pada variasi 0 mm menjadi 94,61% pada variasi 3 mm dan penyisihan paling tinggi mencapai 96,56% pada variasi 5 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan ukuran kerapatan *draft tube* berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi penyisihan Fe, dengan variasi 5 mm menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi dibandingkan dengan variasi lainnya.

Tabel 3. Hasil Penyisihan Konsentrasi Besi dan % Removal

Waktu Proses (menit)	Kerapatan Draft Tube (mm)	Besi Awal (mg/L)	Besi Akhir (mg/L)	% Removal
30	0		0,0355	90,14
	3	0,36	0,0194	94,61
	5		0,0124	96,56

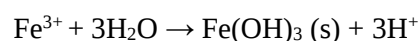
Sumber : Hasil Penelitian (2026)



Gambar 4. Konsentrasi Penyisihan Besi (Fe) Tiap Variasi *Draft Tube*

Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Peningkatan penyisihan besi (Fe) pada setiap variasi kerapatan *draft tube* berkaitan dengan proses oksidasi selama proses aerasi. Pada kondisi awal, Fe dalam air tanah umumnya berada dalam bentuk Fe^{2+} yang terlarut. Selama proses aerasi, oksigen yang diinjeksikan dari fase gas ke dalam air meningkatkan ketersediaan oksigen terlarut yang diperlukan dalam proses oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} [16]. Kemudian, Fe^{3+} mengalami hidrolisis dan membentuk senyawa besi (III) hidroksida yang memiliki kelarutan lebih rendah dan dapat membentuk endapan yang lebih mudah dipisahkan dari fase cair. Secara sederhana, reaksi oksidasi tersebut dapat dituliskan sebagai [17]:



Pembentukan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (s) menyebabkan Fe yang semula berada dalam bentuk ion terlarut berubah menjadi fase padat yang lebih mudah dipisahkan melalui proses pengendapan. Dengan demikian, semakin efektif proses penyediaan oksigen selama aerasi, semakin besar peluang terjadinya oksidasi Fe^{2+} dan pembentukan senyawa besi yang dapat dipisahkan, sehingga konsentrasi Fe dalam air setelah pengolahan menjadi lebih rendah.

Keberadaan variasi kerapatan pada *draft tube* memungkinkan terjadinya perubahan pola sirkulasi fluida serta perilaku gelembung udara di dalam reaktor. Perubahan tersebut dapat memengaruhi distribusi dan ukuran gelembung, luas kontak antara fase gas dan cair, serta waktu kontak udara dengan air. Kondisi kontak gas-cair yang berbeda selanjutnya memengaruhi efektivitas transfer oksigen ke dalam fase cair dan ketersediaan oksigen terlarut untuk mengoksidasi Fe^{2+} .

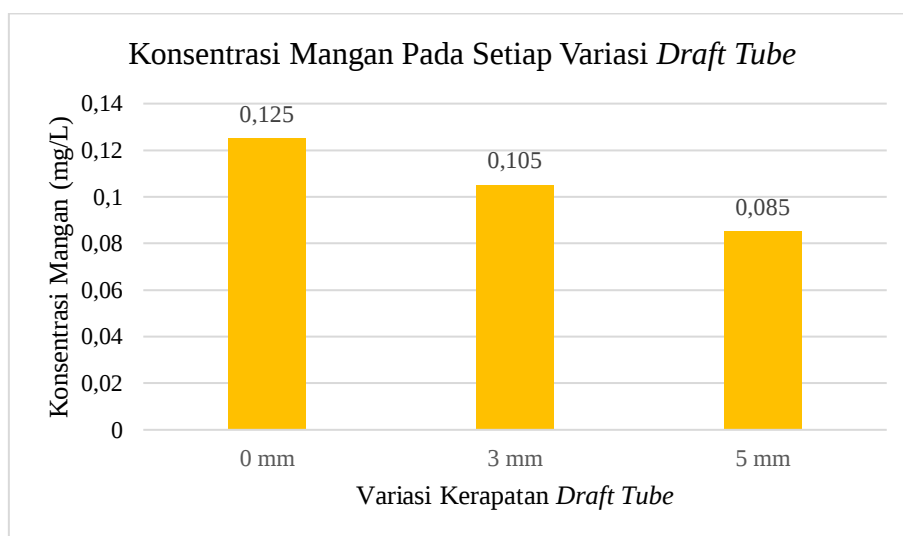
Analisis Penyisihan Konsentrasi Mangan

Berdasarkan Tabel 4, konsentrasi mangan (Mn) mengalami penurunan setelah proses pengolahan selama 30 menit pada seluruh variasi kerapatan *draft tube*. Berdasarkan uji karakteristik awal, didapatkan konsentrasi Mn awal sebesar 0,61 mg/L. Setelah proses aerasi, konsentrasi mangan kemudian turun menjadi 0,125 mg/L pada variasi 0 mm, 0,1050 mg/L pada variasi 3 mm, dan 0,0850 mg/L pada variasi 5 mm. Konsentrasi mangan paling rendah diperoleh pada variasi *draft tube* 5 mm, sedangkan konsentrasi tertinggi diperoleh pada variasi 0 mm. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kerapatan *draft tube* berpengaruh terhadap efektivitas penyisihan konsentrasi mangan selama aerasi.

Tabel 4. Hasil Penyisihan Konsentrasi Mangan dan % Removal

Waktu Proses	Kerapatan Draft Tube	Mangan Awal (mg/L)	Besi Akhir (mg/L)	% Removal
30 menit	0 mm	0,61	0,1250	79,51
	3 mm		0,1050	82,79
	5 mm		0,0850	66,07

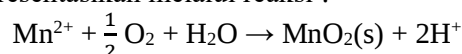
Sumber : Hasil Penelitian (2026)



Gambar 5. Konsentrasi Penyisihan Mangan Pada Setiap Variasi Kerapatan *Draft Tube*

Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Penyisihan Mn terjadi melalui proses oksidasi Mn^{2+} selama aerasi. Oksigen yang ditransfer ke dalam air meningkatkan ketersediaan oksigen terlarut (DO) yang mengakibatkan Mn^{2+} teroksidasi menjadi bentuk mangan dengan bilangan oksidasi lebih tinggi dan kelarutan lebih rendah [18]. Secara keseluruhan, proses oksidasi Mn^{2+} dapat direpresentasikan melalui reaksi :

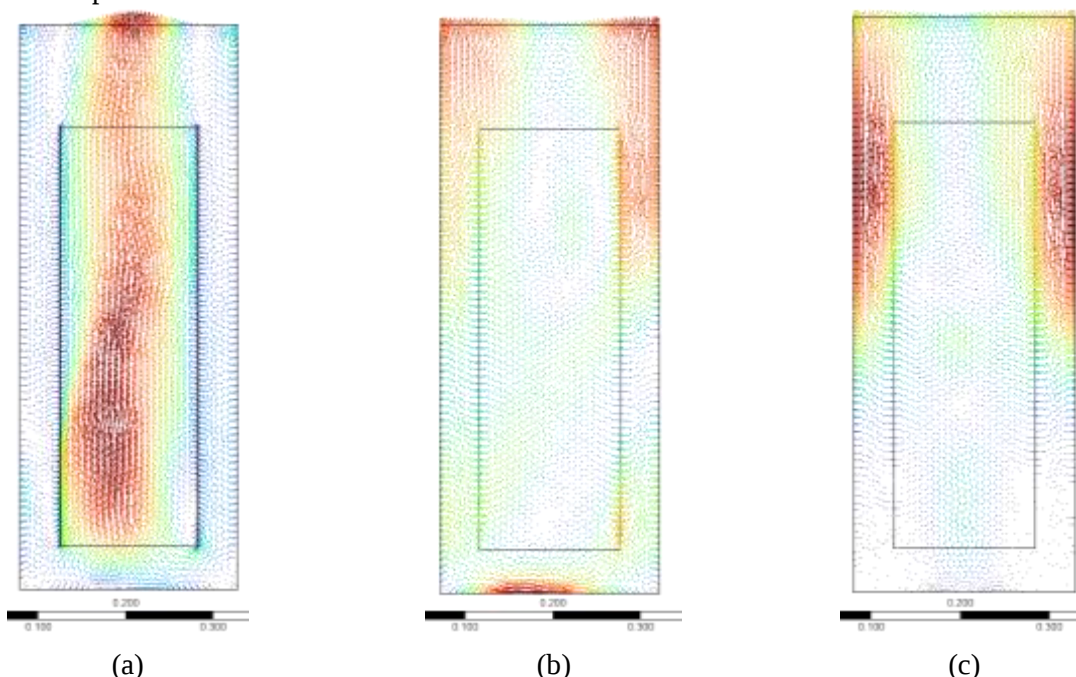


Pembentukan MnO_2 dalam bentuk padat menyebabkan mangan yang sebelumnya berada dalam bentuk terlarut menjadi lebih mudah dipisahkan dari fase cair melalui proses pengendapan. Dengan

demikian, ketersediaan oksigen selama proses aerasi berperan dalam mendukung proses oksidasi Mn^{2+} dan pembentukan bentuk mangan yang lebih mudah dipisahkan [19].

Hasil Pemodelan Berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD)

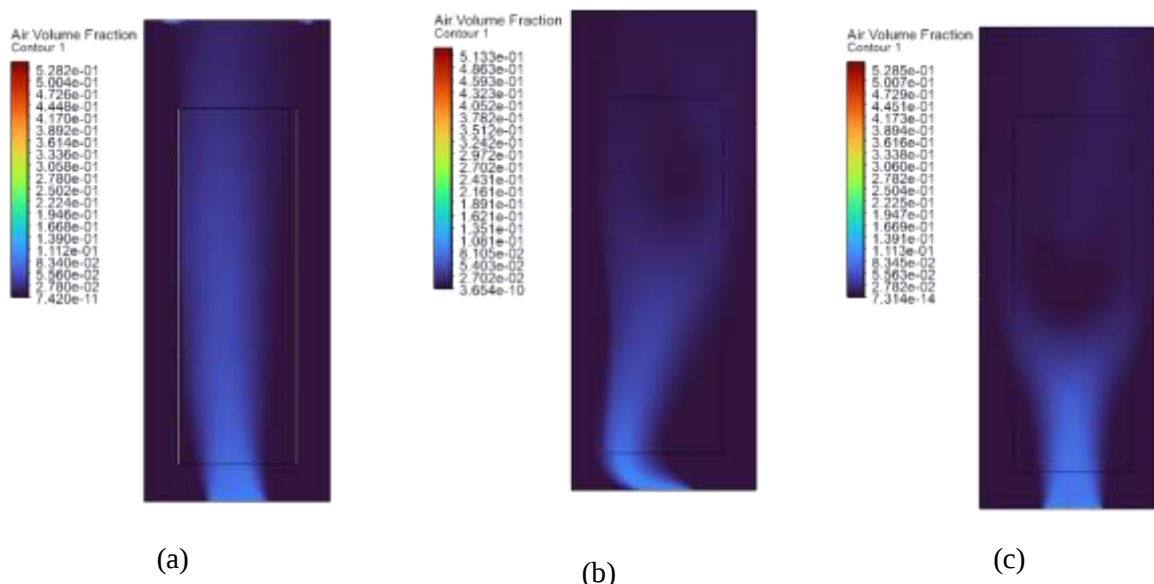
Pemodelan berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan untuk mengetahui perubahan karakteristik hidrodinamika pada *airlift reactor* akibat variasi kerapatan *draft tube*. Simulasi dilakukan menggunakan *ANSYS Fluent* dengan model *mixture* untuk menggambarkan aliran dua fase, yaitu udara dan air serta model turbulensi *k-ε*. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan pola aliran fluida dan distribusi *gas holdup* pada variasi kerapatan *draft tube* 0 mm, 3 mm, dan 5 mm. Hasil pemodelan digunakan untuk menjelaskan perubahan kondisi aliran dan distribusi fase gas yang berkaitan dengan perbedaan kinerja aerasi pada setiap variasi.



Gambar 6. Hasil Simulasi Pola Aliran Fluida Berdasarkan *Velocity Vector* Pada Variasi Kerapatan *Draft Tube* (a) 0 mm, (b) 3 mm, dan (c) 5 mm
Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Hasil simulasi pola aliran berdasarkan *velocity vector* menunjukkan bahwa seluruh variasi membentuk pola *internal loop circulation*, yaitu fluida bergerak naik melalui daerah *riser*, kemudian berbelok menuju daerah *downcomer* dan kembali turun ke bagian bawah reaktor. Pada variasi *draft tube* 0 mm, aliran lebih banyak terkonsentrasi di dalam *draft tube* sehingga penyebaran aliran menuju daerah di luar *draft tube* masih terbatas. Ketika digunakan *draft tube* dengan ukuran kerapatan 3 mm, sebagian aliran mulai melewati celah lubang menuju daerah *downcomer*, sehingga distribusi aliran menjadi lebih luas. Perubahan tersebut semakin terlihat pada variasi 5 mm, ketika ukuran lubang yang lebih besar memberikan jalur perpindahan fluida yang lebih mudah melalui dinding *draft tube*. Akibatnya, sirkulasi fluida berlangsung pada area yang lebih luas dan distribusi aliran menjadi lebih merata dibandingkan variasi 0 mm dan 3 mm.

Perubahan pola aliran tersebut menunjukkan bahwa peningkatan ukuran lubang kerapatan *draft tube* mengurangi hambatan perpindahan fluida melalui dinding *draft tube* [11]. Kondisi ini memungkinkan interaksi aliran antara daerah *riser* dan *downcomer* berlangsung pada area yang lebih luas. Hasil simulasi juga memiliki kecenderungan yang sesuai dengan pengamatan eksperimen menggunakan *water beads*, di mana penyebaran aliran pada variasi 5 mm terlihat lebih merata dibandingkan variasi lainnya. Kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi dapat menggambarkan perubahan pola sirkulasi yang terjadi pada setiap variasi kerapatan *draft tube*.



Gambar 7. Hasil Simulasi Kontur *Gas Holdup* Pada Variasi Kerapatan *Draft Tube* (a) 0 mm, (b) 3 mm dan (c) 5 mm

Sumber : Hasil Penelitian (2026)

Selain pola aliran, hasil simulasi menunjukkan adanya perubahan distribusi *gas holdup* pada setiap variasi kerapatan *draft tube*. Pada variasi 0 mm, fase gas cenderung menyebar di dalam *draft tube* karena dinding *draft tube* bersifat solid sehingga gas tidak dapat berpindah secara langsung menuju daerah *downcomer*. Pada variasi 3 mm, sebagian fase gas mulai melewati celah lubang *draft tube* dan menyebar ke sekitar dinding *draft tube*. Penyebaran fase gas menjadi lebih luas pada variasi 5 mm karena ukuran lubang pada *draft tube* yang lebih besar memungkinkan lebih banyak gas melewati celah lubang. Kondisi tersebut menyebabkan fase gas menempati volume reaktor yang lebih luas dan meningkatkan jumlah gas yang tertahan di dalam reaktor.

Perubahan tersebut tercermin pada nilai *gas holdup* hasil simulasi yang meningkat dari 0,0050 pada variasi 0 mm menjadi 0,0060 pada variasi 3 mm dan 0,0069 pada variasi 5 mm. Hasil eksperimen juga menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu nilai *gas holdup* sebesar 0,0046; 0,0061; dan 0,0075 pada variasi 0, 3, dan 5 mm. Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen menghasilkan persentase error masing-masing sebesar 8,67%, 2,05%, dan 7,92%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kecenderungan yang sesuai dengan hasil eksperimen dalam menggambarkan perubahan *gas holdup* akibat variasi kerapatan *draft tube*.

Secara keseluruhan, hasil CFD menunjukkan bahwa peningkatan ukuran lubang pada *draft tube* mengubah pola sirkulasi fluida dan memperluas distribusi fase gas di dalam reaktor [11]. Variasi 5 mm menghasilkan distribusi aliran yang lebih merata serta nilai *gas holdup* simulasi tertinggi sebesar 0,0069. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil eksperimen berupa peningkatan DO hingga 6,80 mg/L, peningkatan nilai *kLa* hingga 0,0486 menit⁻¹, serta penyisihan Fe dan Mn yang lebih tinggi pada variasi 5 mm. Dengan demikian, perubahan konfigurasi *draft tube* tidak hanya memengaruhi pola aliran dan distribusi fase gas, tetapi juga berkaitan dengan peningkatan kondisi transfer oksigen yang mendukung proses penyisihan Fe dan Mn.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, variasi kerapatan *draft tube* memengaruhi karakteristik hidrodinamika dan kinerja airlift reactor dalam penyisihan Fe dan Mn. Peningkatan ukuran lubang pada *draft tube* dari 0 mm, 3 mm, hingga 5 mm menghasilkan peningkatan konsentrasi DO dari 6,50 menjadi 6,65 dan 6,80 mg/L, serta meningkatkan efisiensi penyisihan Fe dari 90,14% menjadi 94,61% dan 96,56%. Penyisihan Mn juga meningkat berdasarkan penurunan konsentrasi akhir dari 0,1250 mg/L pada variasi 0 mm menjadi 0,1050 mg/L pada 3 mm dan 0,0850 mg/L pada 5 mm, dengan efisiensi penyisihan masing-masing sebesar 79,51%, 82,79%, dan 86,07%. Hasil CFD menunjukkan bahwa peningkatan ukuran bukaan wire mesh menghasilkan distribusi pola aliran yang lebih luas dan merata serta meningkatkan *gas holdup* simulasi dari 0,0050 pada 0 mm menjadi 0,0060 pada 3 mm dan 0,0069 pada 5 mm. Hasil simulasi memiliki kecenderungan yang sesuai dengan eksperimen dengan error *gas holdup* sebesar 8,67%, 2,05%, dan 7,92%. Secara keseluruhan,

variasi draft tube 5 mm memberikan kondisi aerasi dan hidrodinamika yang paling mendukung peningkatan transfer oksigen serta penyisihan Fe dan Mn pada kondisi operasi penelitian.

5. Daftar Pustaka

- [1] D. Propolsky and V. Romanovski, "Iron and manganese removal from groundwater: comprehensive review of filter media performance and pathways to polyfunctional applications," *Environ. Sci. (Camb.)*, vol. 11, no. 11, pp. 2499–2515, Oct. 2025, doi: 10.1039/D5EW00751H.
- [2] A. F. Rusydi *et al.*, "Vulnerability of groundwater to iron and manganese contamination in the coastal alluvial plain of a developing Indonesian city," *SN Applied Sciences* 2021 3:4, vol. 3, no. 4, pp. 399–, Mar. 2021, doi: 10.1007/S42452-021-04385-Y.
- [3] L. Burté *et al.*, "Kinetic Study on Clogging of a Geothermal Pumping Well Triggered by Mixing-Induced Biogeochemical Reactions," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 10, pp. 5848–5857, May 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b00453.
- [4] L. H. Cheng, Z. Z. Xiong, S. Cai, D. W. Li, and X. H. Xu, "Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: Oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, p. 101621, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101621.
- [5] A. Ahmad, A. van der Wal, P. Bhattacharya, and C. M. van Genuchten, "Characteristics of Fe and Mn bearing precipitates generated by Fe(II) and Mn(II) co-oxidation with O₂, MnO₄ and HOCl in the presence of groundwater ions," *Water Res.*, vol. 161, pp. 505–516, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.06.036.
- [6] 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* 2021, Vol. 9, Page 1765, vol. 9, no. 10, p. 1765, Oct. 2021, doi: 10.3390/PR9101765.
- [7] N. Naidoo, W. J. Pauck, and M. Carsky, "Effects of sparger design on the gas holdup and mass transfer in a pilot scale external loop airlift reactor," *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 37, pp. 127–134, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SAJCE.2021.05.009.
- [8] X. Xu and Y. Zhang, "Hydrodynamics and Mass Transfer in an Airlift Loop Reactor: Comparison between Using Two Kinds of Spargers," *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 35, Jan. 2024, doi: 10.3390/PR12010035/S1.
- [9] X. Lu, Y. Ding, J. Yu, B. Long, and X. Zheng, "Experimental study of hydrodynamics and bubble size distribution of an external loop airlift reactor," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 97, no. S1, pp. 1685–1693, May 2019, doi: 10.1002/cjce.23456.
- [10] S. Kouzbou, Y. Stiriba, B. Gourich, and C. Vial, "CFD simulation and analysis of reactive flow for dissolved manganese removal from drinking water by aeration process using an airlift reactor," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 36, p. 101352, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101352.
- [11] R. Salehpour, E. Jalilnejad, M. Nalband, and K. Ghasemzadeh, "Hydrodynamic behavior of an airlift reactor with net draft tube with different configurations: Numerical evaluation using CFD technique," *Particuology*, vol. 51, pp. 91–108, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.partic.2019.09.005.
- [12] N. Naidoo, W. J. Pauck, and M. Carsky, "Effects of sparger design on the gas holdup and mass transfer in a pilot scale external loop airlift reactor," *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 37, pp. 127–134, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SAJCE.2021.05.009.
- [13] M. K. H. AL-Mashhadani, S. J. Wilkinson, and W. B. Zimmerman, "Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 137, pp. 243–253, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ces.2015.06.032.
- [14] F. B. Bertollo, G. C. Lopes, and E. L. Silva, "Phenol Biodegradation by *Pseudomonas putida* in an Airlift Reactor: Assessment of Kinetic, Hydrodynamic, and Mass Transfer Parameters," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 228, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1007/s11270-017-3569-0.
- [15] S. Bun, N. Chawaloeshonsiya, 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, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.JECE.2019.103206.
- [16] M. Annaduzzaman, L. C. Rietveld, B. A. Hoque, M. N. Bari, and D. van Halem, "Arsenic removal from iron-containing groundwater by delayed aeration in dual-media sand filters," *J. Hazard. Mater.*, vol. 411, p. 124823, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.124823.

-
- [17] M. V. van de Griend *et al.*, “Vortex Impeller-Based Aeration of Groundwater,” *Water* 2022, Vol. 14, Page 795, vol. 14, no. 5, p. 795, Mar. 2022, doi: 10.3390/W14050795.
- [18] S. Kouzbour, N. El Azher, B. Gourich, F. Gros, C. Vial, and Y. Stiriba, “Removal of manganese (II) from drinking water by aeration process using an airlift reactor,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 16, pp. 233–239, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.JWPE.2017.01.010.
- [19] Y. Cai, K. Yang, C. Qiu, Y. Bi, B. Tian, and X. Bi, “A Review of Manganese-Oxidizing Bacteria (MnOB): Applications, Future Concerns, and Challenges,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 2, p. 1272, Jan. 2023, doi: 10.3390/IJERPH20021272.