

Kinerja Proses Hibrid Aerasi *Bubble-Filtrasi* pada Penyisihan Mangan dan Kekeruhan dalam Air Sumur

Arlini Dyah Radityaningrum *, Muchammad Ichsan, Maritha Nilam Kusuma

Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,
Jl. Arief Rahman Hakim 100, Surabaya, Indonesia 60117

Abstrak

Tingginya konsentrasi Mangan ($Mn(II)$) dan kekeruhan dalam air sumur yang digunakan untuk air minum berdampak negatif pada kesehatan manusia. Proses hibrid aerasi *bubble-filtrasi* merupakan alternatif pengolahan dalam penyisihan $Mn(II)$ dan kekeruhan. Microbubble dapat digunakan dalam proses aerasi untuk meningkatkan konsentrasi Dissolved Oxygen (DO) dalam air. Diameter microbubble mempengaruhi konsentrasi DO yang digunakan dalam proses oksidasi $Mn(II)$. Penelitian ini bertujuan untuk a) menentukan konsentrasi DO dalam air setelah proses aerasi, b) mengkaji kinerja proses hibrid aerasi *bubble-filtrasi* untuk menyisihkan konsentrasi $Mn(II)$ dan kekeruhan dalam air. Aerasi microbubble dioperasikan menggunakan venturi injektor dengan variasi diameter nozel dan waktu kontak. Media filter yang digunakan adalah pasir silika, manganese greensand, dan zeolit. Sampel uji diambil di inlet aerasi dan outlet filtrasi. Pengambilan sampel uji dilakukan secara semi-intermiten, pada menit ke-20, 35, dan 50, dengan dua kali pengulangan. Konsentrasi DO tertinggi (6,31 mg/L) dihasilkan dari proses hibrid menggunakan diameter nozel 6 mm dengan waktu kontak 50 menit. Konsentrasi $Mn(II)$ terendah (0,12 mg/L) diperoleh pada proses hibrid yang menggunakan nozel berdiameter 7 mm, dengan efisiensi penyisihan 94%. Efisiensi penyisihan kekeruhan tertinggi (60%) adalah pada proses hibrid yang menggunakan diameter nozel 7 mm, dengan nilai kekeruhan yang dicapai sebesar 14,36 NTU.

Kata kunci: DO; efisiensi penyisihan; hibrid aerasi *bubble-filtrasi*; kekeruhan; $Mn(II)$

Abstract

[Title: Performance of the Bubble-Filtration Aeration Hybrid Process on Manganese Removal and Turbidity in Well Water] High Manganese ($Mn(II)$) concentration and turbidity in groundwater used for drinking water had a negative human health impact. The bubble aeration-filtration hybrid process is an alternative treatment for $Mn(II)$ and turbidity removal. Microbubble can be used in the aeration process to increase Dissolved Oxygen (DO) concentration in water. Microbubble diameter affected the DO concentration for $Mn(II)$ oxidation process. This study aimed to a) determine DO concentrations in water after aeration, b) examine the performance of the bubble aeration-filtration hybrid process to remove $Mn(II)$ concentrations and turbidity in water. Venturi injector microbubble aeration with variations in nozzle diameter and contact time was used. Silica sand, manganese greensand, and zeolite were used as filter media. Water samples were collected in an aeration inlet and filtration outlet. Sampling was conducted semi-intermittent at 20th, 35th, and 50th minutes, with two repetitions. The highest DO concentration (6.31 mg/L) was produced from a nozzle diameter of 6 mm with a contact time of 50 minutes. The lowest $Mn(II)$ concentration (0.12 mg/L) was obtained in the process using a nozzle diameter of 7 mm, with a removal efficiency of 94%. The highest turbidity removal efficiency (60%) was in the process using a nozzle diameter of 7 mm with the turbidity of 14.36 NTU.

Keywords: DO; removal efficiency; hybrid bubble aeration-filtration; turbidity; $Mn(II)$

*) Penulis Korespondensi.
E-mail: dyah@itats.ac.id

1. Pendahuluan

Masyarakat di negara berkembang masih memanfaatkan air tanah dari sumur sebagai air minum

(Idrees *et al.*, 2018). Permasalahan yang sering muncul pada air tanah adalah kandungan Mangan (Mn(II)) yang tinggi (Jiang *et al.*, 2023). Hal ini juga terjadi pada air sumur dari suatu daerah di Kabupaten Mojokerto. Sumur tersebut memiliki air dengan karakteristik konsentrasi Fe masih di bawah standar baku mutu (< 1 mg/L) dan Mn(II) melebihi standar baku mutu ($> 0,4$ mg/L). Meskipun Mn(II) merupakan mikronutrien yang diperlukan untuk makhluk hidup, namun, konsentrasi Mn(II) yang tinggi dalam air minum mengakibatkan penyakit bronkitis, parkinson, neurotoksisitas, hiperaktif, dan ketidakstabilan emosi (Bacquart *et al.*, 2015). Di samping itu, tingginya konsentrasi Mn(II) membahayakan manusia, karena menyebabkan mutasi sel, merusak jaringan otak, dan mengurangi fertilitas (Fuchida *et al.*, 2022; Basu *et al.*, 2011). Selain tingginya konsentrasi Mn, kekeruhan juga menjadi permasalahan di beberapa air tanah (Nainggolan, *et al.*, 2017). Keberadaan zat tersuspensi seperti plankton, lumpur, zat organik, lempung, lanau, bahan organik, dan zat halus lainnya, berkontribusi terhadap kekeruhan air (Kurniawati *et al.*, 2017).

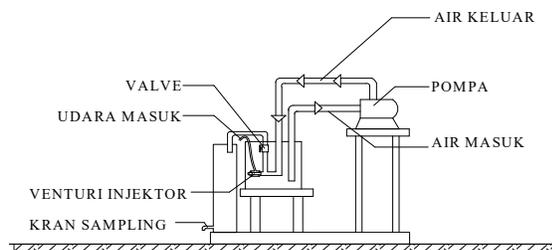
Beberapa alternatif penyisihan polutan Mn(II) dan kekeruhan dalam air tanah adalah melalui aerasi (Aba *et al.*, 2017; Jez-Walkowiak *et al.*, 2017), dan filtrasi (Mashadi *et al.*, 2018). Aerasi merupakan proses memasukkan gas oksigen ke dalam air untuk meningkatkan konsentrasi *Dissolved Oxygen* (DO) (Wiyono *et al.*, 2017). Metode aerasi dapat dilakukan secara hidrolis (*hydraulic aeration*), mekanis (*mechanical aeration*), maupun difusi udara (*bubble aeration*) (Yuniarti *et al.*, 2019). Salah satu alat yang dapat digunakan untuk aerasi *bubble* adalah venturi injektor yang menghasilkan *microbubble* (Rofik, 2020; Pratiwi *et al.*, 2022). Sedangkan filtrasi merupakan proses penyaringan padatan yang tersuspensi dalam air dengan menggunakan beberapa media, seperti arang aktif, pasir silika, dan zeolit (Rahayu *et al.*, 2015).

Proses aerasi dipengaruhi oleh faktor-faktor, diantaranya adalah suhu, pH, waktu kontak, dan konsentrasi DO (Harvianti *et al.*, 2023; Pratiwi *et al.*, 2022; Rivai dan Hermanto, 2021; Rofik, 2020). Penelitian-penelitian terdahulu tentang aerasi *bubble*

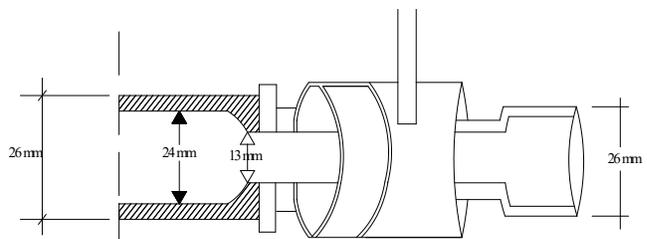
dalam pengolahan air masih dilakukan dengan variasi waktu kontak saja. Variasi konsentrasi DO yang dipengaruhi oleh diameter nozel venturi injektor sebagai penghasil *bubble* belum pernah. Aba *et al.* (2017) melakukan penelitian menggunakan metode aerasi *bubble* dan filtrasi untuk menyisihkan konsentrasi Fe dan Mn dalam air sumur gali. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan metode aerasi *bubble* dan filtrasi (saringan pasir cepat/SPC) dengan media pasir, kerikil, arang, ijuk dan koral. Variasi waktu kontaknya adalah 15, 30, dan 45 menit. Menurut Aba *et al.* (2017), kadar DO dalam air dapat meningkat 60-80% melalui aerasi *bubble*. Selain itu, Yuniarti *et al.*, (2019) melakukan penelitian penyisihan COD dan N total pada limbah cair industri kelapa sawit menggunakan aerasi *bubble* dengan variasi waktu kontak 24, 48, 72, 96, 120, dan 144 jam. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan variasi diameter nozel venturi injektor penghasil *microbubble*. Tujuan penelitian ini adalah untuk (1) menentukan konsentrasi DO dalam air setelah proses aerasi, (2) mengkaji kinerja proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi untuk menyisihkan konsentrasi Mn(II) dan kekeruhan dalam air. Kebaruan penelitian ini adalah penggunaan variasi diameter nozel venturi injektor yang menyebabkan perbedaan *microbubble*, sehingga terdapat konsentrasi DO yang berbeda. Penelitian ini dapat mengisi kesenjangan penelitian tentang aerasi dalam pengolahan air, yang masih hanya mempertimbangkan pengaruh faktor waktu kontak.

2. Metode dan Bahan

Penelitian ini menggunakan sampel air sumur dari daerah tertentu di Kabupaten Mojokerto. Proses aerasi *bubble* menggunakan bak aerasi dengan venturi injektor, yang berdiameter nozel 5 mm, 6 mm, dan 7 mm, kemudian dilanjutkan dengan proses filtrasi. Reaktor filter menggunakan media berupa pasir silika, *manganese greensand*, dan zeolit, dengan ketebalan masing-masing media 5 cm. Sampel uji diambil dari inlet aerasi dan outlet filtrasi. Pengambilan sampel uji dilakukan secara semi-intermiten selama waktu yang sudah ditentukan, yaitu setelah aerasi selama 20 menit, 35 menit, dan 50 menit. Pengujian dilakukan dengan 2



Keterangan: 1 : Bak Aerasi
Gambar 1. Sketsa reaktor aerasi *bubble*



Gambar 2. Sketsa venturi injektor

Tabel 1. Konsentrasi DO, Mn(II), dan Kekeruhan pada Sampel Air

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji	Standar Baku Mutu
DO	mg/L	3,00	6,00 ^{**})
Mn(II)	mg/L	1,85	0,40 [*])
Kekeruhan	NTU	45,12	5,00 [*])

Keterangan: ^{*}) Permenkes RI Nomor 492 Tahun 2010
^{**}) PP RI Nomor 22 Tahun 2021

pengulangan (duplo). Penelitian ini berfokus pada pengukuran parameter uji DO, Mn(II), dan kekeruhan. Hal ini dikarenakan sampel uji memiliki karakteristik yang melebihi standar baku mutu hanya pada parameter Mn(II) dan kekeruhan. Nilai DO digunakan sebagai kajian terhadap proses aerasi dalam reaktor dengan venturi injektor. Sketsa reaktor aerasi dan venturi injektor terdapat dalam Gambar 1 dan 2.

Bak aerasi (Gambar 1) dibuat dari kaca dengan ukuran 40 cm x 20 cm x 30 cm. Venturi injektor yang digunakan menghasilkan *microbubble* berukuran 40-50 µm. Penelitian ini menggunakan pompa Shimizu PN-124 bit (modifikasi), dengan kapasitas 240 L/m.

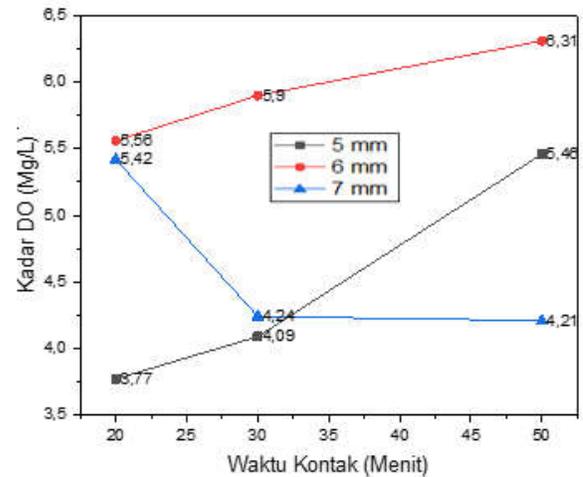
Tingkat signifikansi variasi diameter nozel venturi injektor terhadap konsentrasi D1 Mn, dan kekeruhan diuji secara statistik menggunakan ANOVA *two way*.

3. Hasil dan Pembahasan

Konsentrasi DO, Mn(II), dan kekeruhan awal hasil pengujian pada sampel air ditunjukkan di Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa konsentrasi Mn(II) dan kekeruhan dalam sampel air melebihi standar baku mutu. Selain itu, konsentrasi DO dalam sampel air sumur yang digunakan untuk sumber air baku air minum juga belum memenuhi standar baku mutu. Rendahnya konsentrasi DO dalam air sumur dimungkinkan menyebabkan proses oksidasi Mn(II) dalam air berlangsung tidak optimum. Hal ini berpotensi terhadap masih tingginya konsentrasi Mn(II) dalam air, sehingga melebihi standar baku mutu. Air sumur dengan konsentrasi Mn(II) yang melebihi standar baku mutu dapat dilakukan pengolahan dengan aerasi, salah satunya menggunakan venturi injektor. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan konsentrasi DO dalam air. Variasi diameter nozel pada venturi injektor menghasilkan jumlah dan ukuran *microbubble* yang berbeda dalam air. Perbedaan tersebut diduga menyebabkan konsentrasi DO yang berbeda dalam air.

3.1. Konsentrasi DO dalam Proses Aerasi Bubble

Konsentrasi rata-rata DO dalam air yang dihasilkan dari proses aerasi *bubble*-filtrasi pada variasi diameter nozel venturi injektor dapat dilihat dalam



Gambar 3. Konsentrasi Rata-Rata DO dalam Air pada Aerasi *Bubble* dengan Variasi Diameter Nozel Venturi Injektor

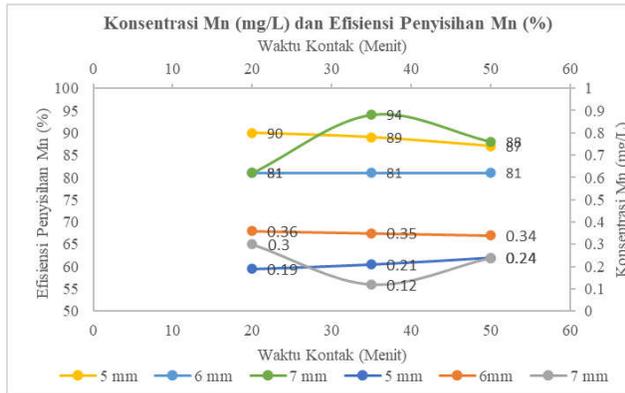
Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa konsentrasi rata-rata DO tertinggi dalam air adalah pada venturi injektor dengan diameter nozel 6 mm (5,56-6,31 mg/L). Kecenderungan peningkatan DO terjadi pada proses aerasi *bubble*-filtrasi dengan diameter venturi injektor 5 dan 6 mm. Namun, pada venturi injektor berdiameter 7 mm, terjadi penurunan konsentrasi rata-rata DO pada menit ke-50 dari 4,24 menjadi 4,21 mg/L. Hal ini diduga terjadi akibat adanya kejenuhan oksigen dalam air. Dalam keadaan jenuh, air pada bak aerasi terdapat gelembung-gelembung kecil. Nilai konsentrasi DO dalam air setelah proses aerasi dengan menggunakan diameter nozel venturi injektor yang bervariasi, mengalami kenaikan terhadap nilai konsentrasi DO awal pada sampel air (3,00 mg/L). Konsentrasi DO dalam air digunakan untuk proses oksidasi Mn(II) dalam air, dimana persamaan reaksinya terdapat dalam Persamaan 1. Selanjutnya, endapan hasil proses oksidasi dihilangkan melalui proses filtrasi pada filter (Yuniarti *et al.*, 2019).



Sumber: Patil *et al.*, (2016)

3.2. Konsentrasi Mangan (Mn) dalam Proses Aerasi Bubble-Filtrasi

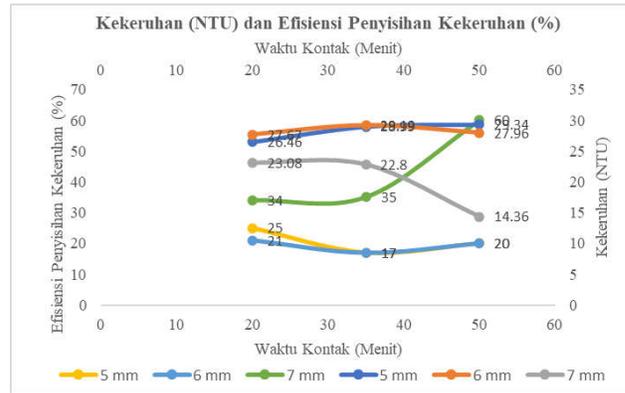
Proses oksidasi Mn(II) dalam bak aerasi dipengaruhi oleh konsentrasi DO dalam air. Perbedaan konsentrasi DO dalam air, menghasilkan konsentrasi Mn(II) yang berbeda dalam efluen sampel air. **Gambar 4** menunjukkan konsentrasi rata-rata Mn(II) dalam air dan efisiensi penyisihannya setelah proses aerasi *bubble*-filtrasi.



Gambar 4. Konsentrasi Rata-Rata dan Efisiensi Penyisihan Mn(II) dalam Air pada Aerasi *Bubble-Filtrasi* dengan Variasi Diameter Nozel Venturi Injektor

Gambar 4 menunjukkan bahwa terdapat kecenderungan penurunan konsentrasi Mn(II) pada menit ke-50 (pada diameter nozel venturi injektor 6 mm). Namun konsentrasi rata-rata Mn(II) pada menit ke-50 di bak aerasi dengan variasi diameter nozel 5 dan 7 mm mengalami kenaikan. Meskipun demikian, konsentrasi Mn(II) pada efluen sampel air saat menit ke-50 tersebut telah sesuai dengan standar baku mutu (< 0,4 mg/L). Konsentrasi rata-rata tertinggi Mn(II) dalam efluen sampel air dihasilkan pada bak aerasi dengan diameter nozel venturi injektor 6 mm (0,34-0,36 mg/L). Di sisi lain, konsentrasi rata-rata tertinggi DO dalam air dihasilkan pada bak aerasi dengan diameter nozel 6 mm. Hal ini menunjukkan bahwa proses oksidasi tidak hanya terjadi terhadap polutan Mn(II), namun dimungkinkan terjadi terhadap polutan lain. Oleh karenanya, proses oksidasi Mn(II) kurang optimum pada bak aerasi dengan diameter nozel venturi injektor 6 mm. Namun demikian, nilai konsentrasi rata-rata Mn(II) yang dihasilkan dalam efluen sampel air pada masing-masing bak aerasi dengan variasi diameter nozel tersebut telah mengalami penurunan dari konsentrasi Mn(II) awal (1,85 mg/L).

Efisiensi penyisihan Mn(II) tertinggi (94%)



Gambar 5. Kekeruhan Rata-Rata dan Efisiensi Penyisihan Kekeruhan pada Aerasi *Bubble-Filtrasi* dengan Variasi Diameter Nozel Venturi Injektor

dicapai pada proses aerasi *bubble-filtrasi* dengan diameter nozel venturi injektor 7 mm. Selain itu, terdapat kecenderungan pada menit pengukuran yang sama, efisiensi penyisihan Mn(II) tertinggi dicapai pada bak aerasi dengan diameter nozel venturi injektor 7 mm. Sedangkan kecenderungan persentase efisiensi penyisihan terendah pada menit pengukuran yang sama, terjadi pada proses aerasi dengan diameter nozel 6 mm.

3.3. Kekeruhan dalam Proses Aerasi *Bubble-Filtrasi*

Proses oksidasi Mn(II) menghasilkan presipitat MnO₂ yang berpotensi menyebabkan kekeruhan dalam air. Oleh karenanya, proses selanjutnya adalah penyisihan kekeruhan melalui filtrasi pada filter. Kinerja proses aerasi *bubble-filtrasi* menghasilkan konsentrasi Mn(II) dan efisiensi penyisihannya, yang ditunjukkan dalam Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan bahwa terjadi kecenderungan penurunan kekeruhan pada menit ke-50, di variasi nozel 5, 6, dan 7 mm, masing-masing dengan kekeruhan 29,34; 27,96; dan 14,36 NTU. Namun, nilai kekeruhan pada efluen sampel air tersebut masih belum memenuhi standar baku mutu yang disyaratkan untuk air minum (5 NTU).

Tabel 2. Uji ANOVA Tingkat Signifikan Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble-Filtrasi* terhadap Konsentrasi DO

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8.408	5	1.682	2.206	.121
Intercept	457.330	1	457.330	599.912	.000
Diameter	7.989	2	3.995	5.240	.023
Pengolahan	.035	1	.035	.045	.835
Diameter * Pengolahan	383	2	.192	252	.782
Error	9.148	12	.762		
Total	474.885	18			
Corrected Total	17.555	17			

a. R Squared=0,479 (Adjusted R Squared=0,262)

Tabel 3. Uji ANOVA Tingkat Signifikan Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble*-Filtrasi terhadap Konsentrasi Mn(II)

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1.510	5	.302	9.374	.001
Intercept	1.586	1	1.586	49.230	.000
Diameter	.082	2	.041	1.266	.317
Pengolahan	1.406	1	1.406	43.642	.000
Diameter * Pengolahan	.022	2	.011	.347	.714
Error	387	12	.032		
Total	3.483	18			
Corrected Total	1.897	17			

a. R Squared=.796 (Adjusted R Squared=.711)

Efisiensi penyisihan kekeruhan tertinggi (60%) adalah pada proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi dengan diameter nozel 7 mm. Selain itu, kecenderungan efisiensi penyisihan Mn(II) tertinggi pada menit pengukuran yang sama, dicapai pada bak aerasi dengan diameter nozel venturi injektor 7 mm. Sebaliknya, kecenderungan persentase efisiensi penyisihan terendah pada menit pengukuran yang sama, dihasilkan dari proses aerasi dengan diameter nozel 6 mm. Fenomena ini sama dengan efisiensi penyisihan Mn(II). Efisiensi penyisihan kekeruhan pada ketiga variasi diameter nozel dalam bak aerasi memiliki kecenderungan terjadi penurunan pada menit ke-35 diikuti dengan kenaikan pada menit ke-50.

3.4. Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble*-Filtrasi terhadap Konsentrasi DO

Kinerja proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi memberikan pengaruh terhadap konsentrasi DO. Tingkat signifikan pengaruh diuji dengan ANOVA dapat dilihat pada Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai Sig pada diameter nozel adalah 0,023 (< 0,050). Hal ini menunjukkan bahwa diameter nozel venturi injektor pada proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi DO dalam air.

3.5. Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble*-Filtrasi terhadap Konsentrasi Mn(II)

Tingkat signifikan pengaruh proses hibrid aerasi

bubble-filtrasi terhadap konsentrasi Mn(II) dapat dilihat pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai Sig pada diameter nozel adalah 0,317 (> 0,050). Tidak ada perbedaan pengaruh yang signifikan terkait konsentrasi Mn(II) di setiap variasi diameter nozel. Namun, terdapat perbedaan yang signifikan pada konsentrasi Mn(II) terhadap proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi.

3.6. Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble*-Filtrasi terhadap Kekeruhan

Uji ANOVA menghasilkan tingkat signifikan pengaruh proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi terhadap kekeruhan dapat dilihat pada Tabel 4. Nilai Sig pada diameter nozel adalah 0,657 (> 0,050). Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan pengaruh yang signifikan terkait kekeruhan di setiap variasi diameter nozel.

4. Kesimpulan

Konsentrasi rata-rata DO tertinggi (6,31 mg/L) dalam air sumur diperoleh pada aerasi menggunakan diameter nozel 6 mm dengan waktu kontak 50 menit. Efisiensi penyisihan rata-rata konsentrasi Mn(II) tertinggi (94%) dihasilkan dari aerasi dengan diameter nozel 7 mm. Efisiensi penyisihan rata-rata kekeruhan tertinggi (60%) juga dicapai pada proses hibrid aerasi *bubble*-filtrasi dengan diameter nozel 7 mm.

Tabel 4. Uji ANOVA Tingkat Signifikan Pengaruh Proses Hibrid Aerasi *Bubble*-Filtrasi terhadap Kekeruhan

Source	Type III Sum Of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	284.5442	5	56.909	.678	.649
Intercept	21550.157	1	21550.157	256.643	.000
Diameter	73.375	2	36.688	.437	.657
Pengolahan	232.755	1	232.755	2.772	.124
Diameter* Pengolahan	10.214	2	5.107	0.61	.941
Error	923.664	11	83.969		
Total	22699.961	17			
Corrected Total	1208.208	16			

a. R Squared=0.236 (Adjusted R Squared=.112)

Daftar Pustaka

- Aba, L., Bahrin, & Armid. (2017). Pengolahan air sumur gali dengan metode aerasi-filtrasi menggunakan aerator gelembung dan saringan pasir cepat untuk menurunkan kadar Besi (Fe) dan Mangan (Mn). *Aplikasi Fisika*, 13(2), 38–47.
- Bacquart, T., Frisbie, S., Mitchell, E., Grigg, L., Cole, C., Small, C., & Sarkar, B. (2015). Multiple inorganic toxic substances contaminating the groundwater of Myingyan Township, Myanmar: Arsenic, Manganese, Fluoride, Iron, and Uranium. *Science of the Total Environment*, 517, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.038>.
- Basu, N., Nam, D. H., Kwansaa-Ansah, E., Rennej, E. P., & Nriagu, O. (2011). Multiple metals exposure in a small-scale artisanal gold mining community. *Environmental Research*, 111, 463–467. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.02.006>.
- Fuchida, S., Tajima, S., Nishimura, T., & Tokoro, C. (2022). Kinetic modeling and mechanisms of manganese removal from alkaline mine water using a pilot scale column reactor. *Minerals*, 12, 99. <https://doi.org/10.3390/min12010099>.
- Harvianti, R. M. D., Badriani, R. E., & Dhokhikah, Y. (2023). Pengaruh jenis aerator dan media filter dalam menurunkan kadar besi (Fe) dalam air sumur, *Al-Ard*, 8(2), 68-73, <http://jurnalsaintek.uinsby.ac.id/index.php/alard/index>.
- Idrees, M., Batool, S., Ullah, H., Hussain, Q., Al-Wabel, M. I., Ahmad, M., Hussain, A., Riaz, M., Ok, Y. S., & Kong, J. (2018). Adsorption and thermodynamic mechanisms of manganese removal from aqueous media by biowaste-derived biochars. *Journal of Molecular Liquids*, 266, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.049>
- Jeez-Walkowiak, J., Dymaczeowski, Z., Szuster-Janiaczyk, A., Nowicka, A. B., & Szybowicz, M. (2017). Efficiency of Mn Removal of Different Filtration Materials for Groundwater Treatment Linking Chemical and Physical Properties. *Water*, 9(498), [doi:10.3390/w9070498](https://doi.org/10.3390/w9070498).
- Jiang, L., Cheng, Y., Huang, T., Qumu, G., Shi, F., & Miao, A. (2023). Removal of manganese from water by modified groundwater plant sludge: Mechanism and application as filter media. *Journal of Water Process Engineering*, 51(103418). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103418>.
- Kurniawati, S. D., Santjoko, H., & Husein, A. (2017). Pasir vulkanik sebagai media filtrasi dalam pengolahan air bersih sederhana untuk menurunkan kandungan Besi (Fe), Mangan (Mn) dan kekeruhan air sumur gali. *Sanitasi: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 9(1), 20. <https://doi.org/10.29238/sanitasi.v9i1.71>.
- Nainggolan, A. H., Tarigan, A. P. M., & Khair, H. (2017). Saringan Pasir, karbon aktif, dan zeolit dalam menyisihkan parameter Fe dan Mn dari air tanah di Pesantren Ar-Raudhatul Hasanah. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 3, 1–12.
- Patil, D. S., Chavan, S. M., & Oubagaranadin, J. U. K. (2016). A review technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 866, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jece.2015.11.028>
- Pratiwi, C. Z., Mawardi, I., & Nugroho, F. A. (2022). Rancang bangun Microbubble Generator (MbG) untuk meningkatkan Oksigen terlarut (DO) Pada budidaya perikanan. *Chanos Chanos*, 20(1), 243. <https://doi.org/10.15578/chanos.v20i1.11160>.
- Rahayu, A., Masturi, M., & Yulianti, I. (2015). Pengaruh perubahan massa zeolit terhadap kadar pH limbah pabrik gula melalui media filtrasi. *Jurnal Fisika Unnes*, 5(2), 79972.
- Rivai, A., & Hermanto, A. (2019). Efektivitas Metode Cascade Aerasi Dan Kombinasi Filtrasi Dalam Menurunkan Kadar Besi (Fe) Pada Air Sumur Gali. *Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika Dan Masyarakat*, 17(1), 89, <https://doi.org/10.32382/sulolipu.v17i1.724>.
- Rofik, D. A. (2020). Perancangan dan Analisis Alat Microbubble Generator (MbG) Untuk aerasi kolam ikan tipe nozzel venturi. *Gorontalo Journal of Infrastructure and Science Engineering*, 3(2), 24. <https://doi.org/10.32662/gojise.v3i2.1206>.
- Wiyono, N., Faturrahman, A., & Syaughiah, I. (2017). Sistem Pengolahan Air Minum Sederhana. *Konversi*, 6(1), 27–35.
- Yuniarti, D. P., Komala, R., & Aziz, S. (2019). Pengaruh proses aerasi terhadap pengolahan limbah cair pabrik kelapa sawit di PTPN VII secara aerobik. *Teknik Lingkungan*, 4(2), 7–16.