

PENYISIHAN Fe-ORGANIK PADA AIR TANAH DENGAN AOP (*ADVANCED OXIDATION PROCESS*)

Siti Ainun^{*)}, Mohamad Rangga Sururi, Kancitra Pharmawati, dan Indra Suryana

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional
Jl. PHH. Mustafa No. 23, Bandung 40124; Telp. (022)7272215

^{*)}Penulis korespondensi : siti_ainun@yahoo.com

Abstract

ORGANIC FERROUS REMOVAL IN GROUNDWATER USING ADVANCE OXIDATION PROCESS (AOP). *Groundwater is usually contained a lot of iron concentration. Iron can bind organic materials which resulted in health and aesthetic problems, so it needs alternative technology to be applied for iron organic removal. The aim of the research is to gain the efficiency of iron organic (Fe^{2+}) removal with ozone and UV light, known as advanced oxidation process (AOP). Groundwater samples were taken from Padasuka area in Bandung. Ozone was supplied continually into a semi-batch reactor with 1.5 liters of sample, then indigo colorimetric method was used to measure ozone residual concentration at contact time : 5, 10, 15, 25 and 30 minutes. Measurement of the concentration of iron and organic matter employed methods of penanthroline, followed by pemanganometri titration, consecutively. The initial concentration of iron (Fe^{2+}) was 3.271 mg/L and the concentration of organic matter was 4.38 mg/L. The results showed that the removal efficiency was 90% for iron and 70% for organic material which gives an indication that the advanced oxidation process (AOP) with ozone and UV can remove the organic iron.*

Keywords: AOP; efficiency; Fe; groundwater; organic matter

Abstrak

Air tanah biasanya mengandung konsentrasi besi yang tinggi. Besi bisa berikatan dengan material organik yang bisa berdampak pada kesehatan dan masalah estetika sehingga perlu alternatif teknologi pengolahan untuk penyisihan besi organik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan tingkat efisiensi terbaik dari penyisihan besi organik (Fe^{2+}) dengan menggunakan ozon dan sinar UV sebagai proses oksidasi lanjutan (AOP). Sampel penelitian in menggunakan air tanah dari daerah Padasuka Kota Bandung. Ozon dialirkan secara kontinyu ke dalam reaktor semi-batch dengan volume 1,5 liter. Pengukuran konsentrasi sisa ozon menggunakan metode indigo colorimetric pada waktu kontak: 5, 10, 15, 25 dan 30 menit. Pengukuran konsentrasi besi dan materi organik berturut-turut menggunakan metoda penanthroline dan titrasi pemanganometri. Konsentrasi awal besi (Fe^{2+}) sebesar 3,271 mg/L dan konsentrasi materi organik sebesar 4,38 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat penyisihan konsentrasi keduanya berturut turut adalah sebesar 90% untuk besi dan 70% untuk materi organik yang memberikan indikasi bahwa proses oksidasi lanjutan (AOP) dengan ozon dan UV dapat menyisihkan kandungan besi organik.

Kata kunci: proses oksidasi lanjutan (AOP); tingkat efisiensi; Fe; air tanah; materi organik

How to Cite This Article: Ainun, S., Sururi, M.R., Pharmawati, K., dan Suryana, I., (2015), Penyisihan Fe-Organik pada Air Tanah dengan AOP (*Advanced Oxidation Process*), Reaktor, 15(4), 218-223, <http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.15.4.218-223>

PENDAHULUAN

Keterbatasan pengelolaan air minum, menyebabkan masyarakat masih dominan menggunakan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari. Besi merupakan salah satu bahan pengotor yang ditemukan pada air tanah. Dampak tingginya kandungan besi menyebabkan warna air berubah

menjadi kuning-coklat, berbau dan bisa menyebabkan korosi. Oleh karena itu berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 492 Tahun 2010 tentang syarat-syarat dan pengawasan kualitas air, pada lampiran I, persyaratan kualitas air minum, kadar maksimum kandungan besi dibatasi sampai 0,3 mg/L.

Pada umumnya besi yang ada di dalam air dapat bersifat terlarut sebagai Fe^{2+} atau tersuspensi dalam bentuk Fe^{3+} . Lebih lanjut, senyawa besi dapat berikatan dengan bahan organik seperti tannin yang merupakan senyawa organik hasil dekomposisi tumbuhan dan memiliki berat molekul yang sangat besar (Keller, 2004). Untuk menyisihkan besi organik tersebut diperlukan mekanisme pengolahan yang dapat menyisihkan senyawa organik sekaligus menyisihkan kandungan besi misalnya dengan *ion exchange* atau dengan teknik oksidasi (Keller, 2004).

Alternatif teknologi yang dapat digunakan untuk menyisihkan kandungan besi yang berikatan dengan bahan organik adalah metode ozonisasi yang memanfaatkan sifat ozon sebagai oksidator (Notodarmojo dkk., 2006). Pada proses ozonisasi, Pharmawati dkk. (2010) menginformasikan bahwa pada proses ozonisasi konvensional dapat menyisihkan kandungan besi (Fe^{2+}) sebesar 92,15% dan menyisihkan bahan organik sebesar 42,85%. Lebih lanjut, pada penelitian tersebut juga diinformasikan bahwa efisiensi penyisihan besi di dapatkan pada kondisi dimana konsentrasi besi sebesar 0,0705 mg/L pada waktu kontak 15 menit sedangkan penyisihan bahan organik maksimum sebesar 42,85% terjadi pada konsentrasi sebesar 0,0623 mg/L pada waktu kontak 20 menit.

Ozon memiliki keunikan yaitu ozon akan terdekomposisi menjadi OH radikal yang merupakan oksidator terkuat dalam air. OH radikal bersifat tidak selektif sehingga jika ada bahan yang tahan terhadap ozon maka akan dioksidasi oleh OH radikal (Von Gunten, 2003). Proses ozonisasi dapat dikembangkan menjadi teknologi oksidasi lanjut atau *advanced oxidation process (AOP)* karena AOP akan mempercepat dekomposisi ozon menjadi OH radikal (Acero dan Von Gunten, 2000). Pengukuran OH radikal sulit untuk dilakukan, tetapi bisa diprediksikan pada pengukuran konsentrasi sisa ozon pada larutan. Dalam aplikasinya AOP dapat dilakukan dengan mengkombinasikan ozon dengan sinar ultraviolet (UV) (Von Gunten, 2003). Pengolahan Fe organik pada air tanah di Indonesia khususnya Bandung dengan teknik ozonisasi masih jarang dipublikasikan, lebih dari itu, sampai saat ini, jurnal penggunaan teknik O_3/UV pada pengolahan Fe-organik dengan menggunakan sampel air tanah di Indonesia belum ditemukan. Proses AOP diperkirakan akan mempercepat proses ozonisasi dan menghasilkan efisiensi yang lebih baik. Oleh karena itu, maka dilakukan penelitian ini dilakukan dengan variabel penelitian adalah penggunaan proses AOP pada sampel air tanah dengan tujuan untuk mengetahui

konsentrasi sisa ozon, efisiensi penyisihan kandungan besi (Fe^{2+}) dan efisiensi penyisihan kandungan bahan organik dalam air tanah.

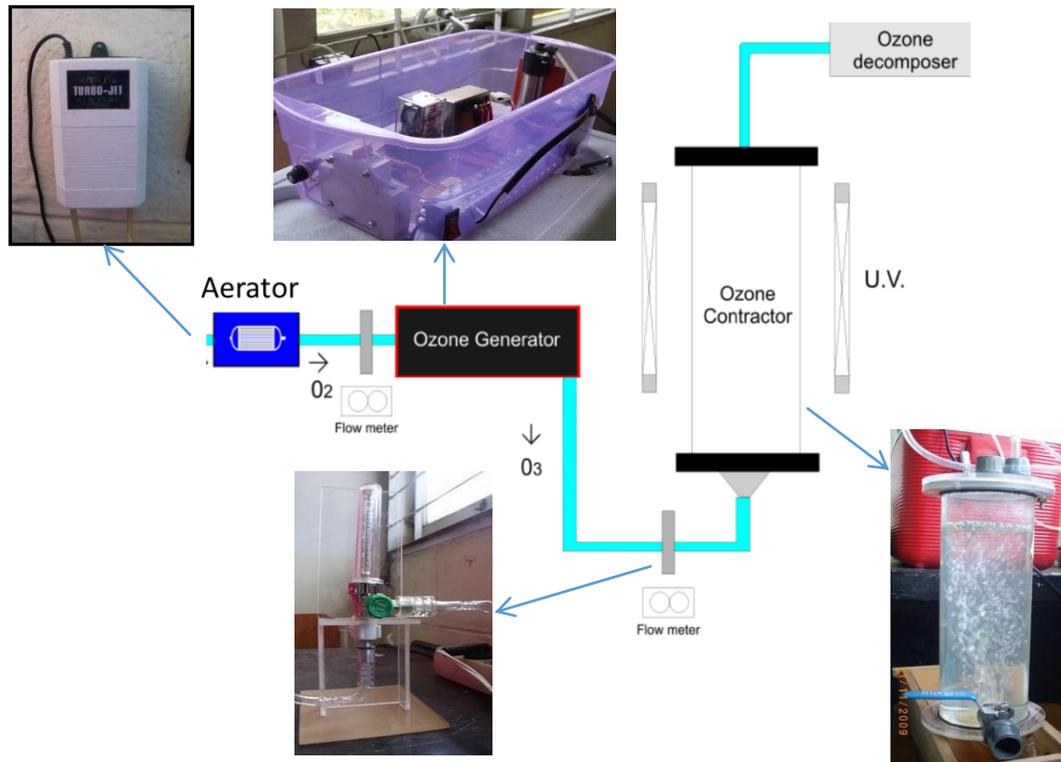
METODE PENELITIAN

Sampel diambil dari air tanah daerah Padasuka di Kota Bandung dengan pertimbangan daerah tersebut memiliki jenis air tanah dalam dengan kedalaman 50-60 meter yang digunakan sebagai bahan baku air minum dan mempunyai kandungan besi (Fe^{2+}) yang melebihi baku mutu yang diijinkan. Sampling dilakukan secara sesaat (*grab sample*) menggunakan jerigen 5 liter.

Penelitian dilakukan dengan sistem semibatch karena menggunakan ozon yang disuplai secara kontinyu. Aerator digunakan untuk mensuplai O_2 dari udara bebas ke ozon generator dengan merk Sanyo dan daya 40.000 Volt. Ozon pada fase gas yang dihasilkan oleh *ozone generator*, dialirkan menuju ozon kontaktor untuk dikontakkan dengan sampel air yang akan diolah sebanyak 1,5 L. Ozon kontaktor dilengkapi dengan *filter disc* yang memiliki ukuran pori 16-40 μm sehingga debit udara diatur pada debit 2,5 L/menit. Pengaturan debit udara dilakukan menggunakan flow meter yang ditempatkan setelah ozon generator agar proses transfer gas berjalan dengan baik.

Pengambilan sampel dilakukan dari ozon kontaktor yang dilengkapi dengan *valve* dengan interval waktu kontak yang di dasarkan atas studi literatur. Kemudian dilakukan percobaan dari beberapa interval waktu kontak yang dapat menyisihkan besi mencapai 0,3 mg/L sesuai baku mutu yang diijinkan dengan interval waktu 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 menit. Rangkaian alat dilengkapi dengan ozon dekomposer untuk memecah kelebihan ozon menjadi oksigen sebelum terlepas ke udara. Lampu UV yang digunakan adalah 2 buah lampu UV berjenis (UV-C) yang masing-masing berdaya 15 watt yang ditempatkan di kedua sisi ozon kontaktor dengan jarak masing-masing sekitar 5 cm. Lampu ini berfungsi untuk mempercepat pembentukan $\text{OH}\cdot$ dalam air. Skema rangkaian alat dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengukuran konsentrasi sisa ozon dilakukan dengan metode *indigo colorimetric* (4500-O3-B) dengan prinsip pengukuran penyerapan cahaya yang sebanding dengan intensitas warna larutan. Pengukuran dilakukan menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 600 nm. Sementara pengukuran parameter lainnya dapat dilihat pada Tabel 1. Kerangka penelitian secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 1. Skema alat AOP

Tabel 1. Metode pengukuran

Parameter Air	Metode Pengukuran
pH	pH meter
Suhu	Thermometer
Kandungan Besi (Fe^{2+})	Phenantroline
Mangan	Colorimetri dengan Persulfat
Alkalinitas	Titrasi asam-basa
Bahan organik	Titrasi Permanganometri

American Public Health Association and American Water Works Association (1995)

Tabel 2. Kerangka penelitian

Parameter Variasi	Kondisi
Waktu Kontak	5, 10, 15, 20, 25, 30 menit Pengambilan sampel dilakukan pada waktu kontak tertentu
Parameter Tetap	Kondisi
AOP O_3/UV	Proses Ozonisasi dengan penambahan pemaparan lampu UV pada dua sisi kontaktor dengan jarak 5 cm
Reaktor	Semi Batch
Volume sampel	1,5 L
Debit Gas	2,5 L/menit, disuplai menerus
Parameter yang diukur	pH, alkalinitas, BOD; COD; dan DHL

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Karakteristik Sampel Air

Hasil pengukuran kualitas air pada masing-masing sampel air tanah dapat dilihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dapat dilihat parameter suhu pada sampel air tanah berada pada kondisi suhu ruang yaitu $24 \pm 3^\circ C$ sementara parameter pH berada pada suasana asam yang disebabkan oleh adanya air hujan yang merupakan input sumber air tanah, bersifat asam lemah dengan tingkat keasaman berkisar pH 5,6.

Kandungan besi terlarut (Fe^{2+}) pada sampel air tanah sebesar 3,271 mg/L. Keberadaan kandungan besi biasanya bersamaan dengan unsur Mangan (Mn). Kandungan Mn pada sampel air tanah sebesar 1,13 mg/L. Hal ini sesuai dengan Said (2008), dimana kandungan besi pada air tanah di Indonesia berkisar antara 1-10 mg/L sementara kandungan mangan biasanya lebih kecil dari konsentrasi besi.

Tabel 3. Karakteristik fisik dan kimia sampel air

Parameter Kualitas Air	Sampel Air Tanah
Suhu (°C)	24,2
pH	5,41
Mangan(mg/L)	1,13
Bahan Organik (mg/L)	4,38
Alkalinitas (mg/L)	218,9
Besi Fe ²⁺ (mg/L)	3,271
Besi terlarut (mg/L)	3,232

Konsentrasi bahan organik pada sampel air tanah dalam angka permanganat yaitu sebesar 4,38 mg/L. Bahan organik alami dalam air, yang selanjutnya disebut NOM merupakan bahan organik yang berasal dari proses geobiokimia (Thurman, 2012). Adanya bahan organik pada sampel air tanah mengindikasikan bahwa air tanah tersebut mengandung besi organik, karena senyawa besi dalam air tanah bisa berikatan dengan bahan organik (Keller, 2004). Hal tersebut dikuatkan dari pengamatan fisik, dimana sampel air berwarna kuning hingga kecoklatan, yang merupakan ciri air yang mengandung tannin (Keller, 2004).

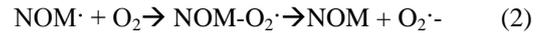
Tingginya konsentrasi alkalinitas pada sampel air tanah yaitu sebesar 218,9 mg/L dipengaruhi oleh kondisi pH dan bahan organik pada air tanah. Dimana pH rendah dan adanya bahan organik menunjukkan alkalinitas yang tinggi (Sari dkk., 2013).

Semua parameter kualitas sampel air di atas sangat penting karena keberadaannya akan mempengaruhi dekomposisi ozon pada proses ozonisasi AOP untuk penyisihan kandungan besi. Seperti suhu yang meningkat akan menurunkan kelarutan ozon dalam air, kemudian pH pada air terdapat ion hidroksida (OH⁻) yang mempercepat dekomposisi ozon (inisiator) dan alkalinitas merupakan inhibitor yang memperlambat reaksi OH radikal. Sedangkan kandungan besi (Fe²⁺), mangan dan bahan organik termasuk inisiator.

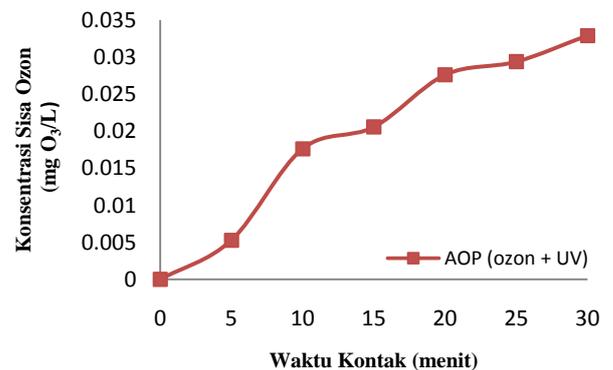
Konsentrasi Sisa Ozon pada Proses AOP

Pengukuran konsentrasi sisa ozon dalam sampel air tanah dilakukan pada setiap interval waktu kontak setelah proses AOP dapat dilihat pada Gambar 2. Pada proses AOP ini konsentrasi sisa ozon meningkat seiring penambahan waktu kontak. Konsentrasi sisa ozon optimum terjadi pada waktu kontak 30 menit yaitu sebesar 0,0329 mg/L.

Peningkatan konsentrasi sisa ozon pada ozonisasi dikarenakan ozon yang di kontakkan ke dalam reaktor dilakukan secara terus-menerus dengan debit udara sebesar 2,5 L/menit sedangkan volume sampel air tanah di dalam reaktor berkurang setiap penambahan waktu kontak. Hingga menit ke-5 peningkatan konsentrasi sisa ozon cenderung lambat, karena pada awal waktu kontak dekomposisi ozon dipercepat oleh adanya inisiator berupa besi Fe²⁺ (reaksi 3-7), lebih dari itu OH[·] yang dihasilkan dapat bereaksi dengan bahan organik pada sampel air seperti terlihat pada reaksi di bawah ini (Von Gunten, 2003):



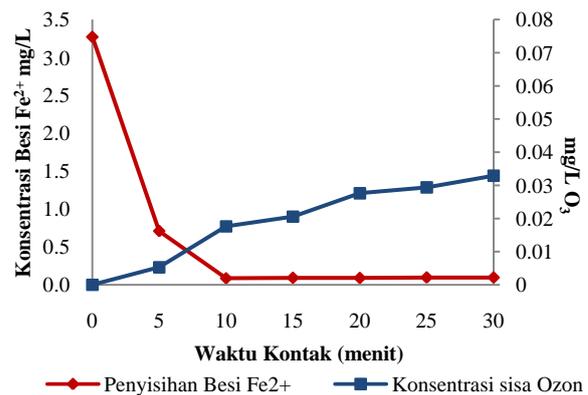
Persamaan 1-2 menjelaskan reaksi NOM dengan OH[·] akan menghasilkan *carbon center radical*, selanjutnya reaksi *carbon center radical* dengan oksigen akan menyebabkan pembentukan *superoxide radical*, yang akan kembali menginisiasi pembentukan OH[·]. Kemudian seiring penambahan waktu kontak kandungan besi(Fe²⁺) teroksidasi oleh ozon dan OH radikal menjadi besi (Fe³⁺) sehingga inisiator besi (Fe²⁺) berkurang, hal yang sama akan terjadi dengan inisiator mangan dan bahan organik yang akan teroksidasi oleh ozon (Lenntech, 2010).



Gambar 2. Konsentrasi sisa ozon terhadap waktu kontak dengan proses AOP

Efisiensi Penyisihan Kandungan Besi pada Sampel Air Tanah

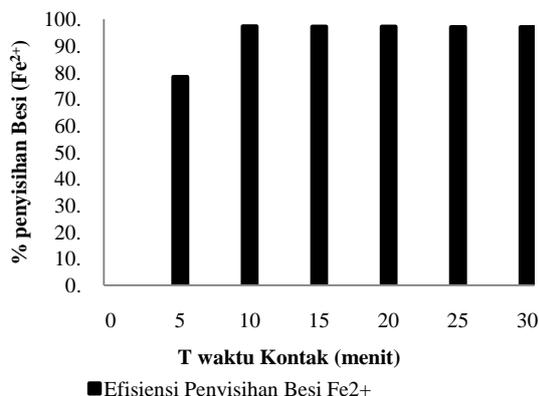
Kandungan besi (Fe²⁺) awal sebelum proses AOP pada sampel air tanah sebesar 3,232 mg/L. Hasil pengukuran setelah dilakukan ozonisasi dapat dilihat pada Gambar 3 dan efisiensi penyisihan besi di setiap waktu kontak dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Hubungan penyisihan besi (Fe²⁺) dengan konsentrasi sisa ozon

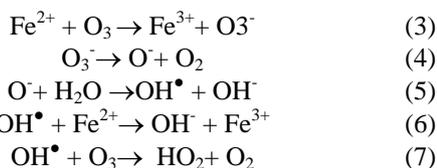
Dari Gambar 3 setelah dilakukan proses AOP selama waktu kontak 10 menit saja, dan konsentrasi sisa ozon sebesar 0,0176 mg/L didapat sisa besi terlarut (Fe²⁺) sebesar 0,087 mg/L. Pada fase pertama, ozon akan meluruh dengan cepat ketika terlarut dalam air sehingga kinetiknya tidak akan terukur, namun pada fase ke-2 ozon akan meluruh menurut orde

pertama, sehingga ozon yang terukur sebenarnya adalah sisa ozon (Fernando,1995).



Gambar 4. Efisiensi penyisihan besi dengan proses AOP

Berdasarkan Gambar 4, pada waktu 10 menit terjadi penyisihan yang mencapai mencapai 97,34%. Penyisihan besi (Fe²⁺) terjadi karena pada proses AOP sebagian ozon yang dikontakkan ke dalam reaktor yang berisi air tanah akan mengoksidasi besi terlarut (Fe²⁺) menjadi besi (Fe³⁺). Selain itu, karena proses dekomposisi ozon akan dipercepat dengan proses AOP, maka OH radikal hasil dekomposisi ozon akan berperan dalam mengoksidasi besi. Pada reaksi oksidasi besi dengan ozon, (Fe²⁺) akan teroksidasi membentuk persipitat besi (Fe³⁺) yang dapat disaring. Menurut Hart (1983) yang dikembangkan oleh Salanko (2006) reaksinya dapat dilihat pada persamaan reaksi berikut):



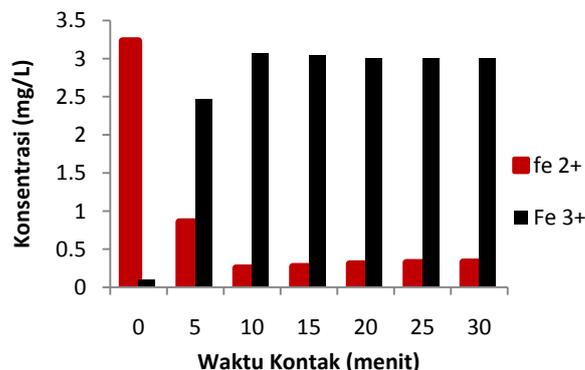
Pada proses AOP dengan menggunakan UV, dekomposisi ozon dipercepat oleh sinar UV. Ketika ozon dan UV digunakan secara bersamaan pada AOP maka akan terbentuk hidrogen peroksida (H₂O₂), yang kemudian akan membentuk OH radikal (Magbanua, 2006), sehingga proses yang terjadi dominan pada reaksi 4 dibandingkan reaksi 1.

Proses pengendapan terjadi, karena sampel air mengandung alkalinitas, sehingga besi Fe³⁺ yang terbentuk akan bereaksi dengan alkalinitas membentuk Fe(OH)₃, sesuai dengan reaksi (Droste, 1997):



Gambar 5 menunjukkan hubungan penyisihan besi (Fe²⁺) dengan konsentrasi sisa ozon adalah adanya peningkatan konsentrasi sisa ozon berbanding lurus dengan efisiensi peningkatan penyisihan kandungan besi (Fe²⁺) menjadi besi (Fe³⁺) secara signifikan hingga pada menit ke -10 sebagai titik kritis. Setelah menit ke-10, gradien penurunan penyisihan kandungan besi sangat landai dan

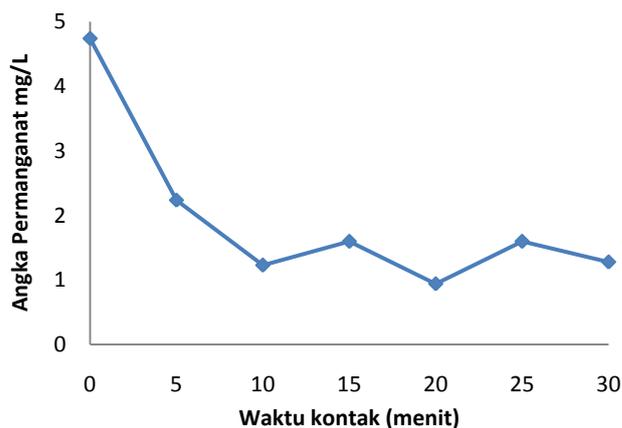
cenderung konstan meskipun konsentrasi sisa ozon terus meningkat.



Gambar 5. Kandungan besi (Fe²⁺) dan besi (Fe³⁺) selama proses AOP

Penyisihan Kandungan Bahan Organik pada Air Tanah

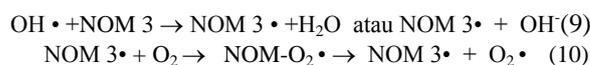
Kandungan bahan organik sebelum proses AOP pada sampel air tanah yaitu 4,38 mg/L. Hasil pengukurannya dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Penyisihan bahan organik dengan proses AOP

Dari Gambar 6 dapat dilihat pada air tanah setelah dilakukan proses AOP terjadi penyisihan angka permanganat yang signifikan terjadi pada waktu 0-10 menit yaitu dari 4,74 mg/L menjadi 1,27 mg/L. Kemudian pada waktu kontak 10-30 menit angka permanganat berfluktuasi.

Reaksi yang terjadi antara OH radikal dan organik dapat dilihat di reaksi (9) dan (10) (Von Gunten, 2003):



Hasil yang berfluktuasi diperkirakan karena adanya gangguan kandungan mangan (Mn) dari sampel air tanah yang akan bereaksi dengan ozon membentuk permanganat. Sehingga permanganat yang terbentuk akan terukur sebagai angka permanganat (Hoigné,1994; Li dkk., 2004).

KESIMPULAN

Proses ozonisasi disertai UV, merupakan proses AOP yang akan mempercepat dekomposisi ozon menjadi OH radikal. Sebagai bahan dengan kemampuan oksidasi terbesar dalam air, OH radikal berperan sebagai oksidator yang efektif dan efisien untuk mengoksidasi besi (Fe^{2+}) menjadi besi (Fe^{3+}), dan bahan organik yang ada dalam air. Proses AOP dapat menyisihkan kandungan besi (Fe^{2+}) sebesar 97,34% dan menyisihkan bahan organik sebesar 74,11%. Waktu yang diperlukan dalam penyisihan terbesar terjadi pada menit ke 10, karena pada menit itulah, proses dekomposisi ozon menjadi OH radikal yang tidak selektif menjadi lebih dominan. Adanya penyisihan kandungan besi dan bahan organik pada penelitian ini mengindikasikan bahwa besi organik yang terdapat pada sampel air tanah dapat disisihkan dengan proses AOP.

DAFTAR PUSTAKA

Acero, J.L. and Von Gunten, Urs, (2000), Influence of carbonate on the ozone/hydrogen peroxide based advanced oxidation process for drinking water treatment, *Journal of Ozone Science and Engineering*, 22, pp. 305-328.

American Public Health Association and American Water Works Association, (1995), *Standard methods for the examination of water and wastewater: selected analytical methods approved and cited by the United States Environmental Protection Agency*, American Public Health Association.

Droste, R., (1997), *Theory and practice of water and wastewater treatment*, John Wiley Sons: New York, USA., pp.385

Fernando, B.J, (1995), *Ozone reaction kinetic for water and wastewater system*, CRC Press company, Washington DC, pp. 11-12.

Hart, E., Sehested, K., and Hokman, J., (1983), Molar absorptivities of ultraviolet and visible bands of ozone in aqueous solution, *Journal Anal. Chem.*, 55(6), pp. 46-52.

Hoigné, J., (1994), Characterization of water quality criteria for ozonation processes, Part I : Minimal set of analytical data, *Ozone Science & Engineering*, Vol. 16. p. 118.

Keller, M., (2004), Iron removal by ion exchange standing on solid ground, *Water Conditioning & Purification Magazine*, Juni, 2014, <http://www.wcponline.com/pdf/0604%20Iron.pdf>, diakses tanggal 20 Januari 2016.

Lenntech, (2010), Ozone reaction mechanisms, *Water Treatment Solution*, Library, 2016,

<http://www.lenntech.com/library/ozone/reaction/ozone-reaction-mechanisms.html>, diakses tanggal 20 januari 2016.

Li, H-Y., Qu, J-H., Zhao, X., and Liu, H-J., (2004), *Removal of Alachlor from Water by Catalyzed Ozonation in the Presence of Fe^{2+} , Mn^{2+} , and Humic Substances*, Beijing : Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, pp. 791-803

Magbanua, B.S.Jr., Savant, G., and Truax, D., (2006), Combine ozone and ultraviolet inactivation of *Escherichia coli*, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, Volume 41, pp. 1043-1055.

Notodarmojo, S., Rohmatun, dan Roosmini, D., (2006), Studi Penurunan Kandungan Besi Organik dalam AirTanah dengan Oksidasi H_2O_2 -UV, *PROC. ITB Sains & Tek.*, Vol. 39 A, No. 1&2, hal 58-69.

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.492/MENKES/PER/IV/2010, tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, (2010), Menteri Kesehatan Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia.

Pharmawati, K., Sururi, M.R., dan Suryana, I. (2010), Penyisihan Fe-organik pada air tanah dengan proses ozonisasi, *Proceedings Seminar Sains dan Teknologi Universitas Lampung*, 18-19 Oktober 2010, hal. 327-335.

Said, N.I., (2008), *Teknologi pengelolaan air minum "Teori dan Pengalaman Praktis"*, Pusat Teknologi Lingkungan, Deputi Bidang Teknologi Pengembangan Sumberdaya Alam, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, pp. 306-308.

Sallanko., L.J. and Ropellnen, (2006), Iron behaviour in the ozonation and filtration of groundwater, *Journal Ozone Science & Eng*, 28, pp 269-273.

Sari, N.N., Sururi, M.R., dan Pharmawati, K., (2013), Efek perlakuan pH pada ozonisasi, *Reka Lingkungan, Jurnal online Institut Teknologi Nasional*, No.1 Vol 1, Februari 2013.

Thurman, E.M., (2012), *Organic geochemistry of natural waters* (Vol. 2): Springer Science & Business Media, United States Geological Survey, Denver, Colorado, p. 2.

Von Gunten, (2003). Ozonation of drinking water: Part I: Oxidation kinetics and product formation, *Journal Water Research*, 37, pp. 1443-1467.