

Pengaruh Karakteristik Lindi terhadap Ozonisasi Konvensional dan *Advanced Oxidation Processes* (Aop)

AMALIA KRISNAWATI¹, M. RANGGA SURURI², SITI AINUN³

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung
Email : amlkrsn@gmail.com

ABSTRAK

Ozon merupakan oksidator kuat dalam air namun proses dekomposisinya dapat menghasilkan oksidator yang lebih kuat yaitu OH radikal. Penggunaan OH radikal sebagai pengolah air disebut Advanced Oxidation Processes (AOP) yang dapat digunakan pada limbah dengan bahan pencemar berat seperti lindi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan inisiator yaitu Hidrogen peroksida (H_2O_2) dan sinar UV-C pada dekomposisi ozon menjadi OH radikal. Proses ozonisasi dilakukan selama 180 menit pada ozon kontaktor berbentuk silinder bervolume 1,5 liter. Ozon dihasilkan dari oksigen murni yang melewati ozon generator. Hasil yang diperoleh yaitu ozonisasi dengan penambahan H_2O_2 mampu mengefektifkan pembentukan OH radikal sebesar 50% sedangkan penambahan sinar UV mengefektifkan 37%. OH radikal tersebut menyebabkan perubahan karakteristik lindi sebesar 5-7% pada parameter pH, 21-33% pada parameter alkalinitas dan 18,7-29% pada parameter Chemical Oxygen Demand (COD). Kombinasi ozon/ H_2O_2 memberikan perubahan yang paling tinggi dibandingkan dengan ozonisasi konvensional dan ozon/UV.

Kata kunci : Lindi, Ozonisasi, AOP, Konsentrasi sisa ozon

ABSTRACT

Ozone is a powerful oxidizing agent in water, but the process of decomposition can produce more powerful oxidizing called OH radical. The use of OH radicals as water treatment called Advanced Oxidation Processes (AOP), which can be used in waste with heavy pollutants such as leachate. The purpose of this study is to determine the effect of initiators, namely Hydrogen peroxide (H_2O_2) and UV C on decomposition of ozone into OH radicals. Ozonation process carried out for 180 minutes in the ozone contactor cylindrical volume of 1.5 liters. Ozone is produced from pure oxygen that passes through the ozone generator. The results obtained by the ozonation with H_2O_2 is 50% effective to produced OH radicals, while the addition of UV C caused 37% effectiveness. OH radicals lead to changes the characteristics of the leachate by 5-7% on the parameters of pH, alkalinity 21-33% on parameters and from 18.7 to 29% at the Chemical Oxygen Demand (COD) parameter. The combination of ozone / H_2O_2 gives the highest change in comparison with the conventional ozonation and ozone /UV.

Keyword : Leachate, Ozonation, AOP, Ozone residual concentration

1. PENDAHULUAN

Ozon termasuk oksidator kuat diantara bahan-bahan kimia yang biasa digunakan dalam pengolahan air. Senyawa ini mampu mengoksidasi banyak bahan organik dan anorganik yang terdapat di dalam air. Penggunaannya sebagai bahan pengolah air dimulai sejak tahun 1893 di Belanda (EPA, 1999a). Sejak saat itu penggunaan ozon semakin meluas di banyak negara.

Ozon mampu mengoksidasi berbagai senyawa dalam air dengan dua cara yaitu reaksi langsung dan reaksi tidak langsung. Secara langsung dilakukan oleh ozon itu sendiri yang terlarut dalam air. Sedangkan cara tidak langsung yaitu dengan memproduksi OH radikal sebagai hasil dari proses dekomposisi. Pembentukan OH radikal tersebut berasal dari serangkaian rantai reaksi yang terdiri dari reaksi inisiasi, reaksi propagasi, dan reaksi terminasi. Inisiasi radikal bebas dapat disebabkan oleh cahaya dan peroksida (yang mengandung ikatan –O-O- yang mudah putus) (Fessenden & Fessenden, 1990).

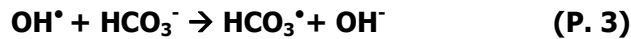
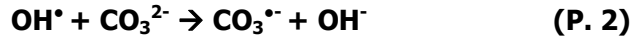
Ozon merupakan molekul yang tidak stabil, jadi pembentukannya dilakukan sesaat sebelum digunakan. Pembentukan ozon dapat dilakukan dengan memecah molekul oksigen menjadi atom oksigen yang akan berikatan satu sama lain menjadi molekul ozon. Metode yang banyak dilakukan dalam memproduksi ozon diantaranya dengan *Plasma Corona Discharge* dan *Electrical Discharge*. Reaksi pembentukan ozon berasal dari molekul oksigen yang bereaksi secara endotermal dan membutuhkan masukan energi (EPA, 1999a). Berikut ini reaksi pembentukan ozon.



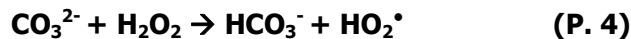
Stabilitas ozon dalam pembentukan OH radikal dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah pH, suhu dan alkalinitas. pH digunakan sebagai petunjuk adanya aktivitas ion hidrogen (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2003). pH yang tinggi akan memudahkan dalam pembentukan OH radikal karena kehadiran ion OH⁻ dapat menginisiasi dekomposisi ozon sebagai langkah awal dalam memproduksi OH radikal. Serupa dengan pH, parameter suhu memberikan pengaruh terhadap proses dekomposisi ozon dimana semakin tinggi temperatur, ozon akan semakin mudah terdekomposisi. Studi terdahulu menemukan bahwa peningkatan suhu dari 0-30°C menyebabkan berkurangnya kemampuan ozon larut dalam air dan meningkatkan laju dekomposisi ozon (Munter, 2001). Pada suhu 20-25°C waktu paruh ozon dalam air yaitu selama 20-15 menit sedangkan pada suhu 30-35°C waktu paruh yang dimilikinya menjadi 12-8 menit (Lenntech, 2014).

Alkalinitas air dalam proses ozonisasi memegang peran penting saat memproduksi OH radikal. Penyebab utama alkalinitas yaitu hidroksida, karbonat dan bikarbonat (Sawyer et al., 2003). Karbonat dan bikarbonat dalam proses dekomposisi ozon berperan sebagai *scavenger*. *Scavenger* merupakan istilah yang ditujukan bagi berbagai senyawa yang mengkonsumsi OH radikal baik berperan sebagai inhibitor maupun sebagai promotor (Acero & Gunten, 2000). Dalam hal ini karbonat dan bikarbonat akan mencari OH radikal untuk membentuk karbonat radikal yang akan bereaksi dengan senyawa organik dan anorganik yang hadir walaupun pada laju yang lamban (Kommineni et al., 2007). Karbonat radikal juga tidak akan bereaksi dengan ozon (Acero & Gunten, 2000). Reaksi OH radikal dan penyebab alkalinitas ini tidak akan menghasilkan superoksida radikal yang menyebabkan

reaksi propagasi tidak akan terbentuk. Sehingga dalam proses ozonisasi keduanya berperan sebagai inhibitor. Berikut ini adalah reaksi yang terjadi jika OH radikal bertemu dengan ion karbonat atau bikarbonat (Acero & Gunten, 2000).



Berbeda jika karbonat bereaksi dengan H_2O_2 akan berperan sebagai promotor karena akan menghasilkan superoksida seperti reaksi berikut (Acero & Gunten, 2000).



Ozonisasi sendiri sebenarnya cukup kuat untuk bereaksi langsung dengan senyawa organik karena ozon termasuk oksidan kuat dalam air. Namun memiliki sifat yang selektif sehingga tidak semua polutan dapat bereaksi dengan ozon. Berbeda dengan senyawa hasil dekomposisi ozon yaitu OH radikal bersifat tidak selektif sehingga penelitian proses oksidasi kini mengarah pada penggunaan metode *Advanced Oxidation Processes* atau AOP (Renou, Givaudan, Poulain, Dirrasouyan, & Moulin, 2007). AOP melibatkan dua tahap oksidasi diantaranya pembentukan oksidan yang kuat (hidroksil radikal) dan reaksi oksidator tersebut dengan kontaminan organik dalam air.

Keuntungan dalam menggunakan metode AOP diantaranya tidak terbentuk *byproduct* yang berbahaya bagi lingkungan, prosesnya cepat, dan efisien dalam meningkatkan kemampuan terdegradasi (Yasar, Ahmad, Chaundry, Rehman, & Khan, 2006). Keuntungan lain dapat timbul dari metode AOP berbasis ozonisasi yakni diantaranya berpotensi menurunkan tingkat toksisitas dan kemungkinan mengalami mineralisasi lengkap terhadap zat organik yang terolah, tidak timbul lumpur, tidak memerlukan pemekatan untuk proses pengolahan seperti pada pengolahan dengan membran, mudah dikontrol dan membutuhkan sedikit lahan serta semua ozon yang tidak digunakan dalam proses maka akan lepas atau terdekomposisi menjadi oksigen (Sharma, Rupaelia, & Patel, 2011). Karena kelebihan tersebut AOP dapat dipilih untuk mengolah limbah yang mengandung senyawa-senyawa berbahaya seperti lindi.

Lindi adalah cairan yang muncul akibat kontakannya tumpukan sampah (sel sampah) dengan air hujan atau produk dekomposisi lainnya. Karakteristik lindi dipengaruhi oleh komposisi sampah dan umur sel sampah. Lindi yang berasal dari TPA dengan umur diatas 10 tahun biasanya mengandung amonium yang tinggi, kemampuan terdegradasinya rendah atau dapat dilihat pada perbandingan nilai *Biochemical Oxygen Demand* dan *Chemical Oxygen Demand* (BOD_5/COD) rendah dan mengandung molekul organik persisten yang tinggi seperti humat dan asam fulfat (Morais & Zamora, 2005).

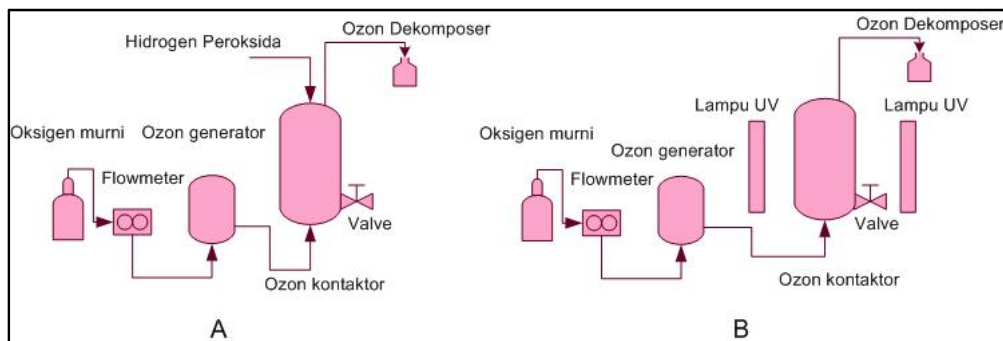
Kebanyakan pengolahan lindi di Indonesia menggunakan sistem biologi baik secara aerob maupun anaerob. Sedangkan karakteristik lindi, misalnya pada Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sarimukti yang diambil pada bulan Desember 2013, memiliki nilai COD yang tinggi yaitu sebesar 2003 mg/L dan nilai BOD sebesar 259 mg/L sehingga rasio BOD_5/COD menjadi 0,13. Pemilihan pengolahan air dilakukan berdasarkan rasio parameter BOD_5 dan COD, ketika rasio

BOD₅/COD besar (lebih besar dari 0,5) maka pengolahan yang tepat yaitu dengan cara biologi karena memiliki sifat *biodegradability* yang baik (Kindsigo & Kallas, 2006). Hal ini berarti jika rasio BOD₅/COD kecil (kurang dari 0,5) maka pengolahan sebaiknya dengan cara kimia. Pengolahan lindi yang kurang tepat akan menyebabkan pencemaran air diantaranya air tanah.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan H₂O₂ dan sinar UV selama proses ozonisasi yang diharapkan mampu mempercepat laju reaksi pendegradasian ozon dalam air menjadi OH radikal. Sehingga maksud dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh karakter lindi terhadap metode ozonisasi konvensional dan ozonisasi dengan penambahan H₂O₂ dan sinar UV atau secara *Advanced Oxidation Processes*.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Laboratorium Lingkungan Jurusan Teknik Lingkungan ITENAS Bandung. Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan uji karakteristik terhadap sampel. Sampel air lindi diambil dengan metode *Grab Sampling* atau pengambilan sesaat, dari inlet Tempat Pengolahan Lindi TPA Sarimukti di Desa Sarimukti, Citatah, Padalarang. Uji karakteristik lindi meliputi pH, suhu, COD, alkalinitas dan konduktivitas.



Gambar 1. Skema alat yang digunakan : (A) proses ozon dan ozon/H₂O₂, (B) proses ozon/UV

Langkah berikutnya yaitu dengan melakukan *treatment* terhadap lindi. Sampel yang digunakan terlebih dahulu diencerkan 10 kali untuk memudahkan dalam pengujian yang menggunakan metode visual seperti pengujian dengan menggunakan spektrofotometer. Sampel sebanyak satu liter dimasukkan ke dalam ozon kontaktor berbentuk silinder bervolume 1,5 liter yang dilengkapi dengan *filter disc* berukuran pori 40-100 μm pada bagian dasar tabung. Ozon dialirkan melalui selang plastik yang berasal dari oksigen murni kemudian melewati ozon generator seperti dalam rangkaian Gambar 1. Oksigen diubah menjadi ozon dengan prinsip *Plasma Corona Discharge*, yaitu dengan mengalirkan gas oksigen melewati dua elektroda yang terpisah oleh listrik dan *discharge gap* kemudian listrik akan menyebabkan elektron terpisah yang menghasilkan energi yang digunakan untuk memecah molekul oksigen agar dapat membentuk ozon (EPA, 1999a). Proses AOP pada penelitian ini juga melibatkan 2 buah lampu UV yang masing-masing memiliki daya sebesar 15 watt.

Sampel yang telah diencerkan kemudian diberi tiga perlakuan yang berbeda. Sampel pertama mengalami kontak hanya dengan ozon atau disebut ozonisasi konvensional. Sampel kedua dikontakkan dengan ozon dan sinar UV yang berasal dari dua lampu UV yang dipasang di samping kontaktor. Perlakuan sampel ketiga yaitu sampel dikontakkan dengan ozon dan H₂O₂ 50% sebanyak 0,5 mL. Banyaknya H₂O₂ yang ditambahkan pada sampel berdasarkan pada percobaan pendahuluan dimana sampel yang diberi 0,5 mL H₂O₂ mampu menurunkan konsentrasi COD paling tinggi.

Seluruh sistem akan dijalankan pada suhu ruang (25±3°C) secara *batch* sedangkan ozonisasi dilakukan secara *continue* dengan debit aliran oksigen yang masuk ke ozon generator sebesar 1 L/menit. Waktu kontak sampel dengan ketiga perlakuan tersebut yaitu selama 90 menit. Pemilihan waktu ini berdasarkan pada penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa perubahan parameter warna terjadi dari menit awal hingga menit ke 45 (Nugroho & Ikbal, 2005). Perubahan warna tersebut mengindikasikan adanya reaksi kimia yang terjadi dalam sampel. Sampel yang digunakan pada penelitian tersebut memiliki karakteristik sampel yang hampir sama dengan sampel lindi yang akan digunakan pada penelitian ini. Penambahan waktu hingga 180 menit diharapkan dapat meningkatkan reaksi OH radikal.

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Lindi

Karakteristik sampel lindi yang diukur yaitu pH, suhu, alkalinitas dan COD. Sampling dilakukan pada siang hari dimana sehari sebelum sampling terjadi hujan sehingga lindi menjadi lebih encer. Sampel lindi sebelum dimasukkan dalam ozon kontaktor, terlebih dahulu di encerkan sebanyak 10 kali untuk memudahkan pengujian. Berikut ini karakteristik sampel lindi yang digunakan untuk penelitian.

Tabel 1. Karakteristik sampel

Parameter	Satuan	Nilai
Suhu	°C	23
pH	-	8,6-8,7
Alkalinitas	mg/L	1300-1420
COD	mg/L	321,4-345,4

(Hasil Pengukuran, 2014)

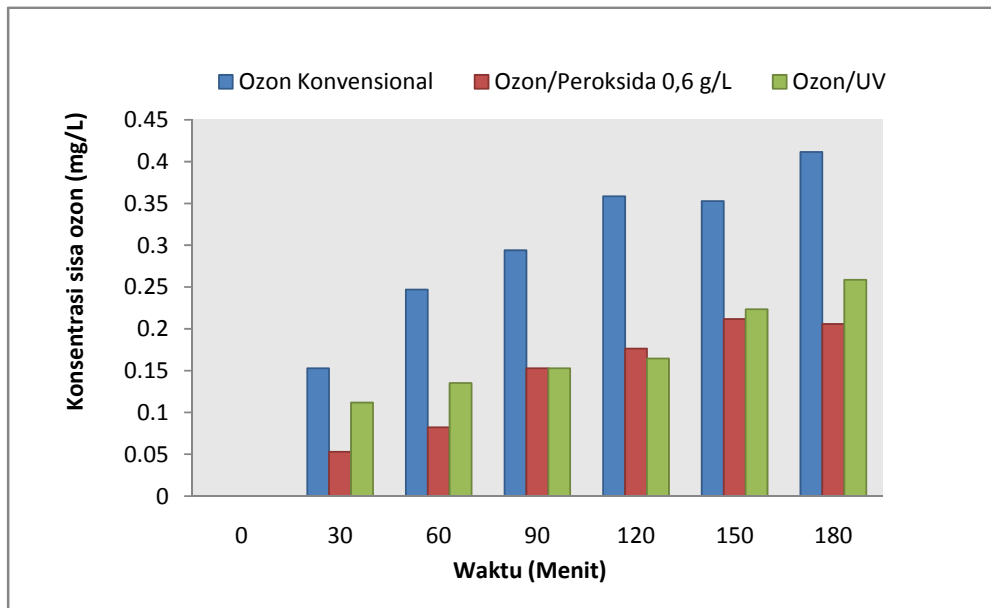
3.2 Konsentrasi Sisa Ozon (KSO)

Ozon merupakan gas yang tidak stabil karena dapat terurai dengan cepat. Pemantauan terhadap kelarutan ozon ini dilakukan dengan mengetahui konsentrasi sisa ozon atau KSO dalam sampel selama masa kontak. Hal ini bertujuan untuk memantau kemampuan inisiator dalam mempercepat proses dekomposisi ozon. Sebagaimana yang telah dibahas pada pendahuluan bahwa penambahan inisiator H₂O₂ diharapkan mampu mempercepat proses dekomposisi dan menghasilkan jumlah OH radikal yang lebih besar. Sayangnya pengukuran OH radikal sulit dilakukan karena laju reaksi oksidasinya mencapai 10¹²-10¹⁴ M⁻¹ sec⁻¹ (EPA, 1999b).

Metode yang digunakan dalam pengukuran konsentrasi sisa ozon yaitu dengan *Indigo Colorimetric Method* (4500-O₃-B) berdasarkan pada *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. ICM atau Indigo Colorimetric Method adalah metode kuantitatif, selektif dan sederhana dalam menentukan sisa ozon yang dapat digunakan pada sampel yang berasal dari air danau, sungai infiltrasi, air tanah yang mengandung mangan, bahkan efluen pengolahan biologi limbah domestik (Eaton, Clesceri, Rice, & Greenberg, 2005).

Sampel air terlebih dahulu diberi larutan indigo yang berwarna biru. Pada suasana asam, ozon akan mendegradasi warna biru tersebut. Pendegradasian warna akan sejalan dengan peningkatan sisa ozon dalam suatu larutan yang diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 600 ± 10 nm. Metode ini memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode lain seperti metode Amperometric dan metode *UV absorption* untuk pengukuran konsentrasi ozon terlarut (Majewski, 2012).

Secara keseluruhan dari ketiga metode dalam penelitian ini, KSO mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi sisa ozon karena suplai ozon terjadi secara *continue*.



Gambar 2. Konsentrasi sisa ozon pada ketiga perlakuan sampel

Perbedaan KSO antar perlakuan menunjukkan adanya perbedaan reaksi dengan ozon. Perlakuan sampel yang dikontakkan dengan ozon saja memiliki nilai akhir KSO yang paling tinggi yaitu sebesar 0,41 mg/L dan KSO yang terjadi pada sampel dengan perlakuan ozon/H₂O₂ dan ozon/UV memiliki nilai akhir yang hampir sama yaitu 0,206 mg/L dan 0,259 mg/L. Namun demikian, KSO pada sampel yang diberi penambahan H₂O₂ mengalami konsentrasi yang paling rendah di beberapa titik termasuk di titik akhir. Hal ini terjadi akibat dari penambahan H₂O₂ yang bersifat sebagai inisiator dalam proses dekomposisi. Inisiator tersebut mempercepat proses dekomposisi ozon sehingga sisa ozon terlarut yang berhasil terukur lebih sedikit dibanding ozon terlarut yang tidak diberi penambahan apapun. Perbedaan konsentrasi sisa ozon rata-rata mencapai 53%. Dalam

jurnalnya Tizaoui (2007) menyatakan bahwa 1,5 mol ozon dapat menghasilkan 1 mol OH radikal sedangkan dengan 1 mol ozon dalam ozon/H₂O₂ dapat menghasilkan 1 mol OH radikal. Sehingga penambahan inisiator dapat mengefektifkan produksi OH radikal hingga 50%. Sehingga dapat diartikan bahwa 53% perbedaan konsentrasi sisa ozon antara ozonisasi konvensional dan ozon/H₂O₂ disebabkan oleh penambahan inisiator.

Hampir serupa dengan ozon/H₂O₂, ozon/UV juga memiliki konsentrasi akhir sekitar 0,259 mg/L. Perbedaan dengan konsentrasi sisa ozon antara ozonisasi konvensional dan ozon/UV rata-rata sekitar 41%. Sinar UV juga dapat membantu mempercepat dekomposisi ozon karena menghasilkan H₂O₂. Sinar UV memberikan energi yang digunakan ozon untuk terdisosiasi dan menghasilkan singlet oksigen yang reaktif dalam air sehingga dapat terbentuk H₂O₂. Meskipun sama-sama memanfaatkan H₂O₂ sebagai inisiator namun proses yang dialami oleh ozon/UV lebih panjang sehingga konsentrasi akhir sisa ozon lebih tinggi dari pada ozon/H₂O₂.

3.3 Perubahan Karakteristik Sampel

Tabel 2 berikut ini menunjukkan perubahan karakteristik sampel lindi yang terjadi akibat hadirnya OH radikal sebagai hasil dari dekomposisi ozon yang diberi inisiator H₂O₂ dan UV .

Tabel 2. Perubahan karakteristik sampel

Parameter	Satuan	Ozonisasi konvensional		Ozon/H ₂ O ₂		Ozon/UV	
		Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Suhu	°C	23±3	23±3	23±3	23±3	23±3	23±3
pH	-	8,7	9,16	8,67	9,21	8,72	9,09
Alkalinitas	mg/L	1300	1020	1340	940	1420	1100
COD	mg/L	345,4	280,6	321,4	228,6	325,4	249,4

(Hasil Pengukuran, 2014)

Pengukuran suhu dilakukan karena merupakan salah satu parameter yang penting untuk diketahui. Suhu termasuk parameter yang mempengaruhi pelarutan ozon dalam air. Parameter suhu tidak mengalami banyak perubahan yaitu sekitar 23°C. Suhu mempengaruhi dekomposisi ozon yaitu semakin tinggi suhu maka waktu paruhnya menjadi semakin tinggi. Pada suhu lebih dari 40°C waktu paruh ozon menjadi sangat singkat sehingga sulit untuk bereaksi dengan senyawa-senyawa dalam air. Berdasarkan rentang pH yang sesuai dengan pH sampel berarti waktu paruh ozon menjadi 15-20 menit. Hal tersebut menunjukkan waktu yang tersedia untuk melakukan pengukuran ozon tidak lebih dari 20 menit. Jika dilakukan lebih dari waktu tersebut maka konsentrasi sisa ozon menjadi kurang mewakili.

Parameter pH diukur karena berperan dalam proses dekomposisi ozon menjadi OH radikal. Kehadiran OH⁻ pada pH yang tinggi dalam larutan dapat menginisiasi reaksi dekomposisi ozon. Proses ozonisasi diperkirakan dapat menurunkan nilai pH karena pada proses ini dihasilkan asam karboksilat. Penambahan hidrogen peroksida juga dapat menyumbang penurunan nilai pH sebanyak 0,2 unit pH jika di bandingkan dengan ozonisasi konvensional (Tizaoui, Bouselmi, Mansouri, & Ghrabi, 2007). Hal ini terjadi karena hidrogen peroksida termasuk senyawa

yang bersifat asam lemah. Namun kehadiran karbonat dan bikarbonat memberikan efek *buffering* terhadap kehadiran asam dalam sampel sehingga pH tidak turun melainkan meningkat karena adanya reaksi OH radikal dengan senyawa yang terdapat pada lindi yang menghasilkan ion hidroksida. Peningkatan pH yang terjadi selama proses ozonisasi berkisar antara 5%-7%.

Alkalinitas dalam air terdiri dari bikarbonat (HCO_3^-) dan karbonat (CO_3^{2-}) yang berperan sebagai *scavenger* bagi OH radikal. Karbonat dan bikarbonat akan mencari OH radikal untuk membentuk karbonat radikal yang akan bereaksi dengan senyawa organik dan anorganik yang hadir pada laju yang lambat (Kommineni et al., 2007). Reaksi OH radikal dan penyebab alkalinitas ini tidak akan menghasilkan superoksida radikal sehingga reaksi propagasi tidak akan terbentuk dan nilai alkalinitas menjadi menurun. Penurunan yang dilakukan akibat proses ozonisasi ini terjadi antara 22%-30%. Penambahan peroksida pada ozonisasi menghasilkan penurunan nilai alkalinitas tertinggi yaitu 30% sedangkan ozon/UV menurunkan 23% dan ozonisasi konvensional menurunkan nilai alkalinitas sedikit lebih kecil yaitu 22%.

Parameter COD mengalami penurunan sebagai efek dari kehadiran OH radikal. COD yang terdiri dari zat-zat organik teroksidasi oleh OH radikal yang memiliki sifat tidak selektif dan merubahnya menjadi zat anorganik seperti misalnya CO_2 . Hal ini merupakan proses oksidasi yang menyebabkan degradasi utama atau mineralisasi (Tchobanoglous & Burton, 2003). OH radikal dalam proses ini mampu menurunkan COD antara 18,7% hingga 29%. Sama seperti parameter alkalinitas, penambahan peroksida menghasilkan penurunan tertinggi pada konsentrasi COD yaitu sebesar 29%, ozon/UV menurunkan 23% dan ozonisasi konvensional menurunkan nilai COD sebanyak 18,7%.

4. KESIMPULAN

Penambahan inisiator, H_2O_2 dan UV, pada proses ozonisasi memberikan dampak yang berbeda terhadap konsentrasi sisa ozon. Perbedaan rata-rata konsentrasi sisa ozon antara ozonisasi konvensional dan ozon/ H_2O_2 yaitu sebesar 53% sedangkan dengan ozon/UV sebanyak 41%. Hal ini menunjukkan bahwa inisiator membantu mengaktifkan pembentukan OH radikal. OH radikal tersebut menyebabkan perubahan sebesar 4-6% pada parameter pH, 22-30% pada parameter alkalinitas dan 18,7-29% pada parameter COD. Kombinasi ozon/ H_2O_2 memberikan perubahan yang paling tinggi dibandingkan dengan ozonisasi konvensional dan ozon/UV.

DAFTAR PUSTAKA

- Acero, J. L., & Gunten, U. v. (2000). Influence of Carbonate on the Ozon/Hydrogen Peroxide Based Advanced Oxidation Process for Drinking Water Treatment. *Ozone Science & Engineering*, P. 22.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater* (21 ed.). Washington DC: American Public Health Association.

- EPA. (1999a). Ozone. *EPA Guidance Manual*.
- EPA. (1999b). Peroxone (Ozone/Hydrogen Peroxide). *EPA Guidance Manual*.
- Fessenden, R. J., & Fessenden, J. S. (1990). *Kimia Organik* (Aloysius, Trans. 1 ed.). Jakarta: Erlangga.
- Kindsigo, M., & Kallas, J. (2006). Degradation of lignin by wet oxidation: model water solution. *Proc. Estonia Acad. Sci. Chem.*
- Kommineni, S., Zoeckler, J., Stocking, A., Liang, S., Flores, A., & Kavanaugh, M. (2007). Advanced Oxidation Processes. *nwri-usa*.
- Lenntech. (2014). Water Treatment Solution. Diunduh pada 2 Februari 2014. <http://www.lenntech.com/library/ozone/decomposition/ozone-decomposition.htm>
- Majewski, J. (2012). Methods for measuring ozone concentration in ozone-treated water. *PRZEGLAD ELEKTROTECHNIZNY, P.3*.
- Morais, J. L. d., & Zamora, P. P. (2005). Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Hazardous Material*.
- Munter, R. (2001). Advanced Oxidation Processes - Current Status and Prospects. *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem, P.21*.
- Nugroho, R., & Ikbali. (2005). Pengolahan Air Limbah Berwarna Industri Tekstil dengan Proses AOPs. *JAI, BPPT, 1, P.10*.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirrasouyan, F., & Moulin, P. (2007). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *ScienceDirect*.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for Environmental Engineering and Science* (5 ed.): McGraw-Hill.
- Sharma, S., Rupaelia, J. P., & Patel, M. L. (2011). A general review on Advanced Oxidation Processes for waste water treatment. *International Conference on Current Trends in Technology, 08, P.7*.
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Disposal* (4th ed.). New York: Mc Graw-Hill.
- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., & Ghrabi, A. (2007). Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide system. *Journal of Hazardous Materials*.
- Yasar, A., Ahmad, N., Chaundry, M. N., Rehman, M. S. U., & Khan, A. A. A. (2006). Ozone for Color and COD Removal of Raw and Anaerobically Biotreated Combined Industrial Wastewater. *Polish J. of Environment, P.16*.