

Kelarutan Ozon pada Proses Ozonisasi Konvensional dan *Advanced Oxidation Process* (O_3/H_2O_2) pada Lindi *Effluent* Pengolahan

SANDI GELARDIANSYAH¹, M.RANGGA SURURI²,SITI AINUN³

Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITENAS Bandung
Email : sandigelardiansyah@gmail.com

ABSTRAK

Lindi merupakan limbah cair yang dihasilkan dari proses pengurugan. Proses dengan ozon maupun AOP (O_3/H_2O_2) dapat diterapkan sebagai pengolahan lanjutan mengingat efisiensi IPAL (Instalasi Pengolahan Air Lindi) eksisting hanya menyisihkan COD sebesar 13,94%. Transfer gas dipengaruhi oleh variasi perlakuan, dalam hal ini pengukuran $K_{La}O_3$ bertujuan untuk mengetahui kelarutan ozon yang ada di setiap variasi. Variasi perlakuan diantaranya dengan ozonisasi konvensional dan AOP (ozon/ H_2O_2 dengan dosis 1,197 g/L dan 1,795 g/L). Ozon dihasilkan dari generator yang dialiri oksigen murni dengan debit 3 L/menit dan dikontakkan dengan lindi pada kondisi suhu ruang ($25 \pm 3^\circ C$) dengan sistem semi batch. Proses dengan AOP melalui penambahan H_2O_2 dapat meningkatkan pembentukan OH^\bullet , hal ini ditandai dengan kecilnya nilai $K_{La} O_3$ pada variasi ozon/ H_2O_2 1,795 g/L yaitu sebesar 0,0023 dibandingkan variasi lainnya seperti ozon konvensional dan ozon/ H_2O_2 1,197 g/L (0,0047 dan 0,0026). Proses dengan AOP (ozon/ H_2O_2 1,795 g/L) menunjukkan hasil yang terbaik, kecilnya kelarutan ozon pada proses AOP mengindikasikan banyaknya ozon yang terdekomposisi menjadi OH^\bullet dan proses didominasi oleh reaksi tidak langsung melalui OH^\bullet .

Kata kunci: Lindi, $K_{La} O_3$, Ozon dan H_2O_2 , OH^\bullet

ABSTRACT

Leachate is the waste water generated from the landfilling process. Process using ozone also AOP (O_3/H_2O_2) could be applied as advanced treatment process considering the efficiency of leachate treatment plant only has the efficiency of COD removal 13,94%. Transference of gas was influenced by the variations of treatment, in this case measuring $K_{La}O_3$ aims to know solubility of ozone in the variations. Variations of treatment such as using conventional ozonation and AOP (ozon/ H_2O_2 1,197 g/L and 1,795 g/L). Ozone is produced by generator with pure oxygen 3 L/min and contacted with leachate at room temperature ($25 \pm 3^\circ C$) with semi batch system. The AOP process through addition H_2O_2 can increase the formation of OH^\bullet , this is characterized by the small value of $K_{La} O_3$ in ozon/ H_2O_2 1,795 g/L is 0,0023 compared by the others such as conventional ozonation and ozon/ H_2O_2 1,197 g/L (0,0047 and 0,0026). The AOP process (ozon/ H_2O_2 1,795 g/L) shows the best result, the low solubility of ozone indicate more decomposed ozone into OH^\bullet and the process was dominated by indirect reactions with OH^\bullet .

Keywords: Leachate, $K_{La} O_3$, ozone and H_2O_2 , OH^\bullet

1. PENDAHULUAN

Lindi adalah limbah cair yang dihasilkan dari proses pengurangan di TPA. Lindi berasal dari sampah dan dapat mencemari lingkungan perairan baik permukaan maupun air tanah serta dapat mempengaruhi kesehatan manusia. Lindi dari TPA merupakan bahan pencemar karena dalam lindi tersebut terdapat berbagai senyawa kimia organik maupun anorganik serta sejumlah bakteri patogen.

Tizaoui *et al* (2007) berpendapat bahwa lindi memiliki kandungan polutan yang beragam seperti COD yang tinggi, biodegradabilitas yang rendah, mengandung logam berat, dan bersifat patogen. Pernyataan tersebut didukung dengan data BPSR (Balai Pengelolaan Sampah Regional) Jabar 2014 dimana efisiensi penyisihan COD setelah pengolahan biologi eksisting hanya sebesar 13,94 % dan rasio BOD/COD sebesar 0,13. Adanya hasil tersebut mengindikasikan bahwa pengolahan biologi saja tidak efektif sehingga perlu pengolahan lanjutan dengan fisik kimia pada instalasi pengolahan lindi.

Proses ozonisasi merupakan alternatif dalam pengolahan lindi karena memiliki kekuatan oksidasi yang tinggi (Tizaoui *et al*, 2007). Reaksi oksidasi dapat bersifat langsung maupun tidak langsung. Reaksi langsung berupa reaksi molekul ozon dengan berbagai bahan kimia. Sedangkan reaksi tidak langsung terjadi melalui reaksi-reaksi radikal bebas yang terbentuk dari dekomposisi ozon (Beltrán,J.F,2004). Keunikan ozon diantaranya dapat terdekomposisi menjadi OH radikal (OH^{\bullet}) yang merupakan oksidan terkuat dalam air. OH^{\bullet} bersifat tidak selektif sehingga jika ada bahan yang tahan terhadap ozon maka akan dioksidasi oleh OH^{\bullet} (von Gunten, 2003). Ozon sangat efektif dalam menghilangkan warna dan desinfeksi air, kemampuan ozon akan bertambah jika ozon tersebut dipertemukan dengan inisiator pembentuk OH^{\bullet} misalnya H_2O_2 , proses tersebut dikenal sebagai AOP (*Advanced Oxidation Processes*).

Ozon adalah oksidator yang sangat kuat dan bersifat tidak stabil pada konsentrasi tinggi yang kemudian meluruh menjadi oksigen. Reaksi ozon dengan zat organik bersifat selektif, ozon dapat mengoksidasi zat organik berikatan tak jenuh menghasilkan aldehid (formaldehid, asetaldehid, gloksal, metiglioksal) dan asam karboksilat (formik, asetat, glioksilat, piruvat dan asam ketomelanik) (Camel & Bermond, 1998 dalam Krisma, 2008).Sifatnya yang tidak stabil menjadikan pengukuran ozon harus dilakukan ditempat. Pengukuran ozon perlu dilakukan dalam proses ozonisasi maupun AOP guna mengetahui perkiraan ozon yang bereaksi didalam air. Nilai konsentrasi ozon dalam fase cair dipengaruhi oleh proses transfer gas yang terjadi.Transfer gas didefinisikan sebagai proses dimana gas dipindahkan dari suatu fase ke fase lainnya, biasanya dari fase gas ke fase cair (Tchobanoglous *et al*, 2003). Pengukuran transfer gas diperlukan dalam mengetahui seberapa besar ozon yang terlarut dalam cairan.

Pada penelitian Sari (2011) proses pengukuran transfer gas dilakukan dengan memvariasikan diameter pori *filter disc* pada kontaktor dan variasi debit aliran udara yang digunakan, hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai K_{La} sangat dipengaruhi oleh tingginya debit aliran udara dan kecilnya diameter pori. Respon dari transfer gas juga dipengaruhi oleh variasi perlakuan, dalam hal ini proses dilakukan dengan membandingkan nilai $K_{La}\text{O}_3$ ozonisasi konvensional dan AOP (ozon dan H_2O_2 dengan dosis 1,197 g/L dan 1,795 g/L). Pengukuran transfer gas melalui nilai $K_{La}\text{O}_3$ pada setiap variasi diperlukan karena dapat menggambarkan kelarutan ozon yang terjadi selama proses ozonisasi konvensional maupun selama proses dengan AOP, dan juga memperkirakan seberapa besar ozon yang terdekomposisi menjadi OH radikal.

2. METODOLOGI

Tahapan penelitian ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu studi pustaka, persiapan penelitian, pengukuran karakteristik awal, penelitian, analisa pembahasan dan kesimpulan.

2.1 Studi Pustaka

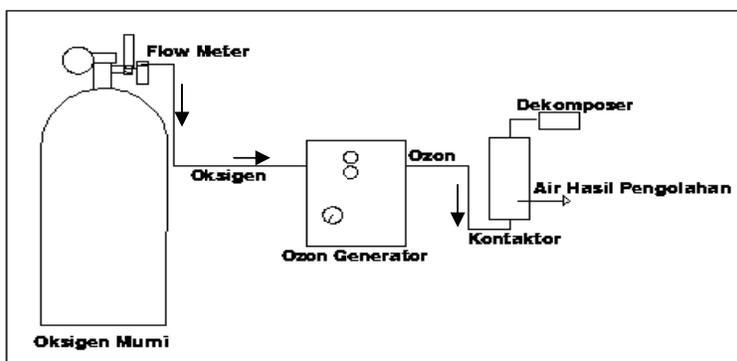
Studi pustaka dilakukan terhadap literatur yang berhubungan dan menunjang terhadap proses penelitian. Bahan kajian (pustaka) yang dikaji diantaranya jurnal-jurnal, buku, penelitian sebelumnya, metode penelitian parameter kualitas air, dll. Hal tersebut penting dan sangat menunjang dalam kelancaran penelitian.

2.2 Persiapan Penelitian

Tahap persiapan penelitian diantaranya meliputi persiapan alat dan bahan yang dibutuhkan serta sampel yang digunakan dalam penelitian ini.

2.2.1 Persiapan Alat

Alat yang dipersiapkan diantaranya berupa alat yang mendukung rangkaian proses ozonisasi, diantaranya tabung oksigen, kontaktor, dan ozon generator. Berikut merupakan skema rangkain proses ozonisasi



Gambar 1. Skema Alat Ozonisasi

Sistem ini merupakan sistem *semi batch* dimana oksigen murni yang terdapat dalam tabung oksigen berukuran 6 m^3 dialirkan sebesar 3 l/menit dengan menggunakan selang berjenis *silicon* kedalam ozon generator. Ozon yang dihasilkan dari generator kemudian dialirkan menuju kontaktor bervolume 1,5 liter melalui dasar kontaktor. Didalam kontaktor yang dilengkapi dengan *filter disc*, sampel lindi sebanyak 1 liter direaksikan dengan ozon yang disuplai secara terus menerus, katup yang terdapat pada kontaktor berfungsi sebagai tempat pengambilan sampel untuk pengukuran parameter yang diteliti selama proses.

2.2.1 Persiapan Bahan

Bahan yang digunakan dalam proses penelitian disesuaikan dengan parameter yang akan diukur. Parameter yang membutuhkan bahan dalam proses pengukurannya diantaranya parameter Alkalinitas (Karbonat dan Bikarbonat).

2.2.2 Persiapan Sampel

Sampel yang digunakan merupakan lindi hasil pengolahan biologi eksisting di TPA Sarimukti, Desa Sarimukti, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan metode *Grab Sampling* atau pengambilan sesaat.

2.3 Uji Karakteristik Lindi

Karakteristik sampel diukur bertujuan untuk mengetahui seberapa besar beban pencemaran yang ada dalam lindi tersebut. Parameter yang diukur dalam mengetahui karakteristik awal lindi diantaranya suhu, pH, DO, Alkalinitas total, Karbonat, Bikarbonat, Kekeruhan, DHL, COD, BOD, dan UV₂₅₄. Metode pengujian dalam penelitian bertujuan untuk mengukur parameter kualitas lindi. Tabel dibawah ini menunjukkan beberapa metode yang digunakan dalam proses penelitian guna mengetahui kualitas lindi yang diteliti.

Tabel 1. Metode Pemeriksaan Karakteristik Sampel Air

No	Parameter Air	Metode Pengukuran/Alat Pengukuran	Sumber
1	Karbonat-Bikarbonat	Titration Asam-Basa	SNI 06-2422-1991
2	BOD	BOD ₅ Test	SNI 6989.72:2009
3	COD	Refluks Tertutup, Metode Titration	<i>Standard Methode 21th Edition</i>
4	pH	Elektrometri/pH meter	SNI 06-6989.11-2004
5	DO	DO meter	SNI 06-6989.14-2004
6	Organik Aromatik	UV Visible 254 nm	<i>Standard Methode 21th Edition</i>
7	DHL	Konduktivimetri	SNI 06-6989.1-2004
8	Suhu	Termometer	SNI 06-6989.23-2005
9	Kekeruhan	Nephelometric/Turbidimetri	SNI 06-6989.25-2005

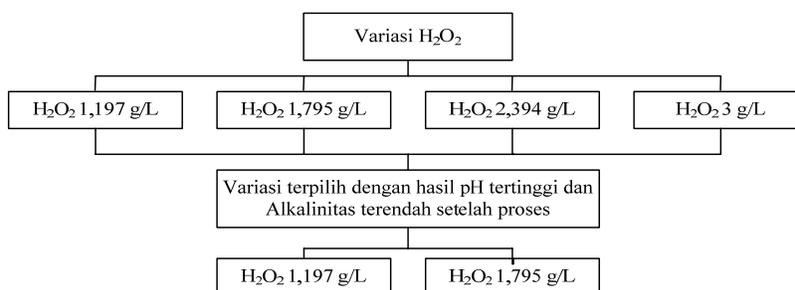
2.4 Pelaksanaan Penelitian Ozonisasi Konvensional dan AOP (O₃/H₂O₂)

Pelaksanaan penelitian diantaranya dengan menentukan dosis optimum H₂O₂ dan juga mengetahui kelarutan ozon pada setiap variasi.

2.4.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk menentukan dosis optimum H₂O₂. Penentuan dosis optimum H₂O₂ digunakan untuk ditambahkan pada proses AOP (O₃/H₂O₂). Dosis optimum ini penting diketahui karena peningkatan hidrogen peroksida tidak akan selalu meningkatkan tingkat penyisihan COD, akibatnya peningkatan konsentrasi hidrogen peroksida akan mengubah perannya dari inisiator menjadi inhibitor (Tizaoui *et al*, 2007).

Pada penelitian ini terdiri dari empat variasi dalam menentukan dosis H₂O₂ yaitu 1,197 g/L, 1,795 g/L, 2,394 g/L, dan 3 g/L. Keempat dosis tersebut didasari oleh penelitian Tizaoui, *et al* (2007) dengan sampel lindi yang memperoleh dosis H₂O₂ optimum sebesar 2 g/L dimana hal tersebut dapat menyisihkan penurunan COD sebesar 48%. Waktu kontak pada penelitian pendahuluan adalah 90 menit.



Gambar 2. Penentuan Variasi H₂O₂

Penentuan dosis optimum ke empat variasi pada penelitian dilakukan dengan melihat respon parameter terhadap proses ozonisasi yaitu melalui parameter pH dan alkalinitas total dimana kedua parameter tersebut merupakan parameter yang berpengaruh terhadap stabilisasi ozon. pH melalui ion OH⁻ merupakan inisiator dalam mendukung proses degradasi ozon

menjadi OH radikal, sedangkan alkalinitas merupakan inhibitor dalam proses ozonisasi. Penentuan dosis tersebut didasarkan atas nilai pH yang tinggi dan nilai alkalinitas yang lebih rendah setelah proses.

2.4.2 Penelitian Utama

Penelitian dengan lindi dilakukan dengan proses ozonisasi konvensional dan AOP yaitu kombinasi antara O₃/H₂O₂ 1,197 g/L dan O₃/H₂O₂ 1,795 g/L. Waktu kontak pada penelitian ini adalah selama 180 menit, hal ini berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dimana parameter pH ketika dilakukan ozonisasi dan AOP masih bisa naik hingga waktu 180 menit, artinya OH⁻ yang merupakan inisiator dari proses ozonisasi masih bisa terbentuk.

Pada interval waktu 30 menit selama 180 menit, sampel diambil dari kontaktor dan diukur kelaurutan gas ozon. Pengukuran ozon dilakukan secara tidak langsung yaitu dengan mengukur kelaurutan oksigen disetiap waktu kontak. Nilai K_{La}O₂ dapat ditentukan dalam skala percobaan dengan melakukan integrasi terhadap persamaan dibawah ini dan diperoleh persamaan garis lurus (Reynolds, 1996 dalam Sari, 2011).

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_o) - K_{La} \cdot t \quad (\text{Pers. 1})$$

K_{La}O₂ merupakan nilai transfer total, C_s merupakan konsentrasi jenuh oksigen, C_t merupakan konsentrasi oksigen disetiap waktu kontak, dan C_o merupakan nilai oksigen awal sebelum proses. Kemudian diperoleh persamaan garis lurus. Dari data percobaan didapatkan grafik hubungan waktu kontak dengan ln(C_s-C_t)/(C_s-C_o) pada setiap variasi penelitian.

K_{La} O₂ kemudian dikonversi menjadi K_{La} O₃. K_{La} O₃ merupakan besaran yang menyatakan seberapa besar massa ozon yang berpindah atau terlarut ke dalam fasa cair (air) per satuan waktu (Karamah *et al*, 2009 dalam Rezagama, 2012). Pengukuran langsung dilakukan dengan menghitung K_{La}O₂ yang dikonversi menjadi K_{La}O₃ dan dicari dengan rumus berikut.

$$K_{La} O_3 = 0,622 \cdot K_{La} O_2 \quad (\text{Pers. 2})$$

Persamaan diatas valid pada kondisi T=20°C. Pada temperatur yang berbeda, dapat digunakan faktor empiris/faktor theta (θ) yang sering digunakan, K_{La} t merupakan K_{La} pada temperatur tertentu (°C), K_{La}20 merupakan K_{La} pada 20 °C, dan θ merupakan faktor koreksi temperatur yang bernilai 1,024 (Gottschalk, 2000 dalam Rezagama, 2012).

$$K_{La} t = \frac{K_{La} 20}{\theta^{20-t}} \quad (\text{Pers.3})$$

2.5 Analisis dan Kesimpulan

Pada akhir pelaporan, dilakukan analisa terhadap karakteristik sampel serta pengaruh dosis H₂O₂ terhadap respon. Selain itu juga membahas mengenai keefektivan kelaurutan ozon disetiap variasi proses ozonisasi dan AOP terhadap sampel air.

3. HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS

3.1 Karakteristik Sampel Lindi

Sebelum proses penelitian dengan ozonisasi konvensional dan AOP menggunakan ozon/H₂O₂, lindi yang menjadi sampel diperiksa karakteristiknya. Sampel yang digunakan untuk pengolahan berasal dari *effluent* pengolahan eksisting dan tanpa diencerkan. Kondisi eksisting pengolahan lindi masih belum sepenuhnya optimum dimana lindi pada outlet masih berwarna hitam dan berbau sama dengan kualitas lindi pada inlet. Berikut tabel karakteristik sampel lindi *effluent* TPA Sarimukti hasil penelitian.

Tabel 2. Karakteristik Sampel Lindi TPA Sarimukti

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	DO	mg/L	1,9
2	Suhu	°C	30,7
2	pH	-	9,17-8,60
3	Alkalinitas Total	mg/L CaCO ₃	6500
4	Karbonat (CO ₃ ²⁻)	mg/L	2400
5	Bikarbonat (HCO ₃ ⁻)	mg/L	183
6	Kekeruhan	NTU	37,6
7	DHL	μs/cm	404-409
8	Organik Aromatik dengan alat UV ₂₅₄	Abs	18,7150
9	COD	mg/L	3998,72-4000
10	BOD	mg/L	288,10

Sumber : Hasil Pengukuran, 2014

Kandungan oksigen terlarut berada pada nilai 1,9 mg/L, nilai DO merupakan konsentrasi gas oksigen yang terlarut dalam air. Faktor yang mempengaruhi nilai DO diantaranya kehadiran bahan organik, semakin kecil nilai DO maka air tersebut semakin tercemar. Nilai tersebut juga didukung dengan suhu perairan yang mencapai 30,7 °C, tingginya suhu dapat mengakibatkan peningkatan viskositas, reaksi kimia, evaporasi dan volatilisasi, juga menurunkan kelarutan gas dalam air (Ali, 2011).

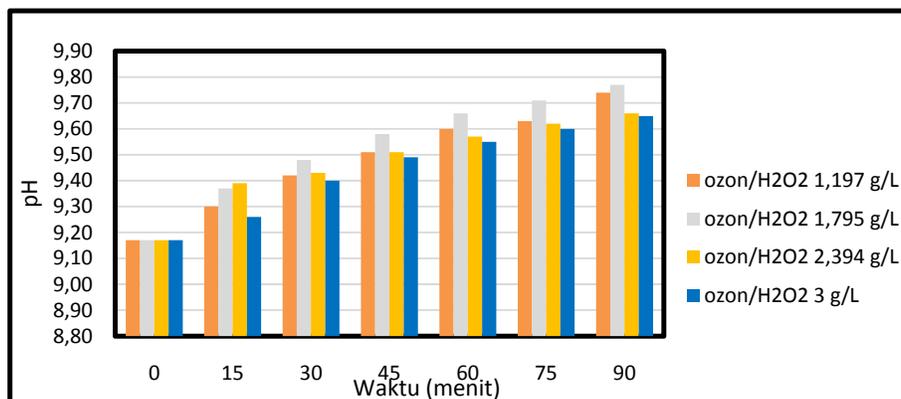
Nilai pH sampel cenderung basa yaitu pada nilai >8,60 hal tersebut sesuai dengan pendapat Damanhuri (2008) yang menyebutkan kekhasan lindi sampah Indonesia berkarakter tidak asam. Nilai pH>8 mendukung dalam proses pembentukan OH radikal dan ion hidrosida yang merupakan insiator dalam proses ozonisasi. Lain halnya dengan parameter penyebab alkalinitas seperti karbonat dan bikarbonat yang masing-masing memiliki nilai 2400 mg/L dan 183 mg/L. Nilai alkalinitas merupakan inhibitor dalam proses ozonisasi, tingginya nilai tersebut dapat mengganggu proses dekomposisi ozon sehingga proses propagasi pembentukan OH radikal terhambat.

Kekeruhan pada sampel lindi yang digunakan memiliki nilai sebesar 37,6 NTU. Pengukuran kekeruhan dilakukan untuk melihat proses pemecahan senyawa tidak larut dalam air dengan menggunakan proses ozon. DHL yang juga tinggi yaitu sebesar 404-409 μs/cm menandakan banyak sekali konsentrasi ion dalam sampel. Nilai DHL dapat dijadikan indikator kehadiran senyawa anorganik yang ada dalam lindi.

Nilai BOD sebesar 288,10 mg/L dan COD sebesar 3998,72 mg/L menyebabkan rasio BOD/COD pada sampel sangat rendah. Nilai BOD yang cenderung lebih kecil dari COD dapat diprediksikan sampel bersifat *nonbiodegradable*. Rasio BOD/COD sebesar 0,07 mengindikasikan bahwa pengolahan biologi saja tidak efektif dalam proses pengolahan. Hal lain juga ditandai dengan tingginya nilai UV₂₅₄ yang merupakan ciri adanya kandungan organik aromatik dan senyawa tak jenuh dalam air, dan juga dapat memperkirakan senyawa humus yang merupakan konstituen utama dari bahan organik alami (Beltran, J.F, 2004).

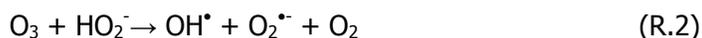
3.2 Penentuan Dosis Optimum Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H₂O₂)

Penentuan dosis optimum ke empat variasi tersebut dilakukan dengan melihat parameter yang mempengaruhi stabilisasi ozon dalam air yaitu diantaranya melalui parameter pH yang merupakan insiator dan alkalinitas total yang merupakan inhibitor. Parameter pH meningkat seiring dengan lamanya waktu kontak, semakin tinggi peningkatan pH pada proses diindikasikan ion hidrosida meningkat. Banyaknya ion hidrosida mendukung dalam meningkatkan dekomposisi ozon untuk menghasilkan OH radikal. pH awal berada pada nilai 9,17. Grafik perubahan pH pada variasi O₃/H₂O₂ 1,197 g/L, O₃/H₂O₂ 1,795 g/L, O₃/H₂O₂ 2,394 g/L dan O₃/H₂O₂ 3 g/L dapat dilihat pada Gambar 3 dibawah ini.



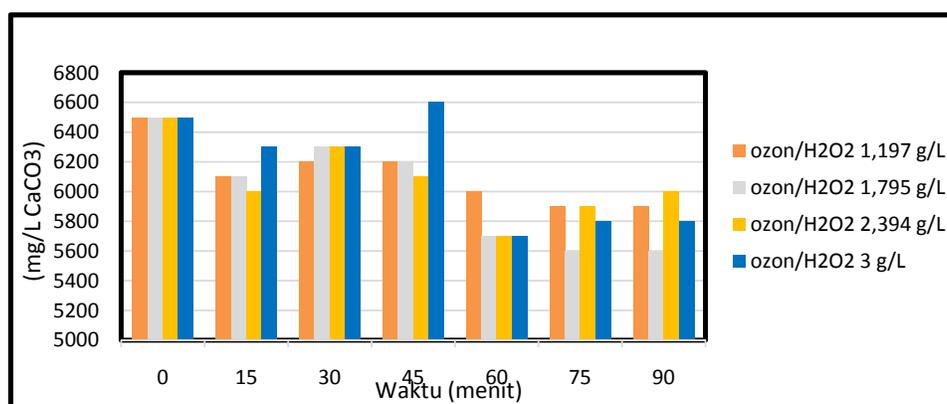
Gambar 3. Nilai pH Pada Variasi H₂O₂

Pada Gambar 3, pH tertinggi berada pada konsentrasi H₂O₂ 1,795 g/L (9,77), kemudian disusul dengan konsentrasi H₂O₂ 1,197 g/L (9,74). Adanya peningkatan pH lebih besar menandakan proses ozonisasi berjalan dengan baik, hal tersebut ditandai dengan hadirnya ion hidroksida selama proses ozonisasi. Ion OH⁻ merupakan inisiator dalam proses ozonisasi, proses akibat ion OH⁻ akan menghasilkan pembentukan radikal superoksida yang merupakan faktor pembentuk reaksi berantai yang akan menghasilkan OH^{*}, hal ini sesuai dengan reaksi berikut.



Dengan melihat nilai pH tertinggi dapat disimpulkan dosis H₂O₂ yang terpilih berdasarkan parameter pH adalah H₂O₂ 1,197 g/L dan H₂O₂ 1,795 g/L.

Nilai alkalinitas merupakan inhibitor yang memperlambat reaksi OH radikal dalam proses dekomposisi ozon. Nilai alkalinitas berfluktuasi dari semua variasi namun memiliki kecenderungan adanya penurunan hingga menit ke 90. Pada waktu kontak 90 menit, dosis H₂O₂ 1,795 g/L menyisihkan lebih banyak alkalinitas, sedangkan dosis H₂O₂ 1,197 g/L dan H₂O₂ 3 g/L penurunan alkalinitas memiliki perbedaan nilai yang tidak terlalu signifikan, walaupun konsentrasi H₂O₂ 3 g/L lebih baik, konsentrasi pH yang dihasilkan dosis H₂O₂ 1,197 g/L lebih tinggi dibandingkan dosis H₂O₂ 3 g/L, sehingga dimungkinkan proses ozon tidak akan maksimal apabila menggunakan konsentrasi H₂O₂ 3 g/L



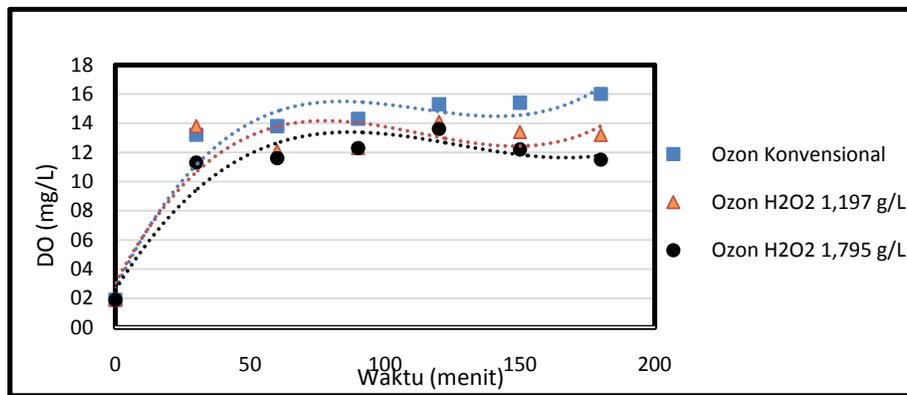
Gambar 4. Konsentrasi Alkalinitas Pada Variasi H₂O₂

Pada Gambar 4, penurunan alkalinitas pada variasi ozon/H₂O₂ menandakan proses tersebut optimum dalam menyisihkan senyawa penyebab alkalinitas yang merupakan inhibitor dalam

proses ozonisasi, hal tersebut juga mendukung dalam penyisihan senyawa organik yang lebih baik. Penurunan dialami dari nilai 6500 mg/L menjadi 5900 mg/L pada dosis H₂O₂ 1,197 g/L dan 5600 mg/L pada dosis H₂O₂ 1,795 g/L. Berdasarkan hasil variasi tersebut maka disimpulkan konsentrasi H₂O₂ yang digunakan pada proses AOP adalah 1,197 g/L dan 1,795 g/L.

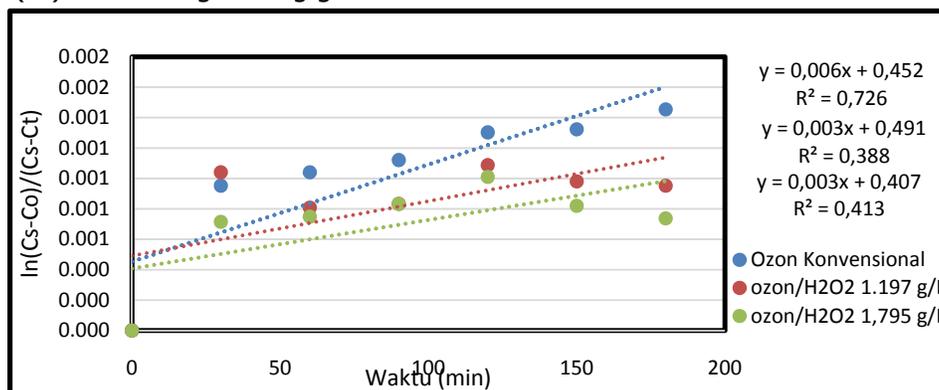
3.3 Kelarutan Ozon Dalam Lindi

Teknik yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan pengukuran tidak langsung yang dievaluasi dengan besar koefisien perpindahan massa. Menurut Zhou (2000) dalam Rezagama (2012), teori perhitungan koefisien perpindahan massa ozon dihubungkan dengan koefisien perpindahan massa oksigen. Proses dilakukan dengan mengukur konsentrasi oksigen terlarut disetiap waktu kontak pada variasi yang sudah ditentukan. Gambar 5 dibawah ini menunjukkan kelarutan oksigen dalam sampel selama proses ozonisasi dan AOP selama 180 menit.



Gambar 5. Konsentrasi DO terhadap Proses Ozonisasi dan AOP (O₃/H₂O₂)

Besarnya konsentrasi DO menunjukkan semakin besar kelarutan gas dalam air. Pada grafik diatas, semua variasi mengalami kenaikan pada konsentrasi DO, hal ini dapat mengindikasikan oksigen terlarut dengan baik hingga waktu kontak 180 menit. Koefisien perpindahan massa keseluruhan ($K_{La} O_2$) dicari dengan menggunakan rumus pada Pers.1. Data percobaan diketahui diantaranya konsentrasi awal oksigen (C_o), konsentrasi oksigen pada waktu kontak setiap variasi (C_t) dan konsentrasi jenuh oksigen (C_s). Data percobaan yang sudah didapatkan, kemudian ditentukan grafik linier hubungan $\ln(C_s - C_t)/(C_s - C_o)$ terhadap waktu kontak. Dengan menggunakan excel, ditampilkan grafik hasil regresi linier dari konsentrasi DO setiap variasi, kemudian didapatkan persamaan dan nilai koefisien korelasi (R^2) dari masing-masing grafik.



Gambar 6. Regresi Linier Nilai $K_{La} O_2$

Dari grafik pada Gambar 6 diatas, didapatkan persamaan dari regresi linier yang merupakan nilai $K_{La}O_2$ yang akan digunakan. Rentang angka korelasi (R^2) yang diperoleh antara 0,38-0,7 mengindikasikan hubungan kedua peubah cenderung sedang. Nilai R^2 yang mendekati satu menjelaskan semakin tinggi korelasi antar semua titik yang ada pada suatu garis linier (Sholeh, 2009 dalam Sari, 2011).

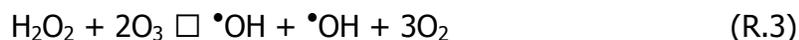
Kemudian $K_{La} O_2$ tersebut dikonversi menjadi $K_{La}O_3$. Konversi dari $K_{La} O_2$ menjadi $K_{La} O_3$ ditentukan dengan Pers.2, namun persamaan tersebut valid pada suhu 20°C sehingga dibutuhkan persamaan yang bisa mengubah temperatur yang diinginkan. Pers.3 digunakan sebagai persamaan yang mengubah temperatur yang berbeda dengan menggunakan faktor empiris/faktor theta yang merupakan faktor koreksi dari temperatur. Berikut merupakan tabel hasil dari penentuan transfer gas oksigen-ozon.

Tabel 3. Konstanta Laju Kelaurutan Ozon Dalam Lindi

Variasi	Persamaan	$K_{La} O_2$ (1/min)	$K_{La}O_3$ 20°C	$K_{La}O_3$ 27°C
Ozon Konvensional	$y = 0,0064x + 0,4527$	0,0064	0,0040	0,0047
Ozon/H ₂ O ₂ 1,197 g/L	$y = 0,0036x + 0,4914$	0,0036	0,0022	0,0026
Ozon/H ₂ O ₂ 1,795 g/L	$y = 0,0032x + 0,4074$	0,0032	0,0020	0,0023

Nilai $K_{La} O_3$ pada Tabel 3 cenderung kecil disetiap variasi yang ada. Variasi dalam proses ozonisasi berpengaruh terhadap konstanta kelaurutan ozon, hal ini dibuktikan dengan adanya perbedaan nilai $K_{La} O_3$ yang ditunjukkan pada Tabel 3. Kelaurutan ozon pada variasi konvensional memiliki nilai tertinggi yaitu sebesar 0,0047, hal ini memperkuat informasi yang ada pada Gambar 5 yang mana variasi ozon konvensional memiliki kelaurutan oksigen paling tinggi dibandingkan variasi yang lain dengan ditunjukkannya nilai DO yang terbesar pada waktu kontak 180 menit. Dengan hubungan tersebut diprediksikan semakin besar kelaurutan oksigen dalam sampel, maka semakin besar pula kelaurutan ozon dalam sampel.

Berbeda halnya dengan proses AOP melalui kombinasi ozon serta penambahan H₂O₂ 1,197 g/L dan H₂O₂ 1,795 g/L, kelaurutan ozon berada dibawah variasi ozonisasi konvensional, yaitu pada nilai 0,0026 dan 0,0023, hal ini juga didukung dengan kelaurutan oksigen yang juga rendah pada kedua variasi ini. Meskipun debit pemompaan oksigen memiliki laju yang tetap (3 l/menit) dan waktu kontak yang sama (180 menit) pada semua variasi, adanya perlakuan yang berbeda pada proses ozonisasi akan menunjukkan hasil yang berbeda pada kelaurutan ozon. Kecilnya kelaurutan ozon pada variasi AOP (ozon/H₂O₂) dapat mengindikasikan lebih banyak reaksi tidak langsung yang melibatkan OH radikal dibandingkan ozon sendiri. Reaksi untuk memproduksi OH radikal dengan H₂O₂ dan ozon dapat ditunjukkan pada reaksi berikut.



H₂O₂ merupakan inisiator yang dalam prosesnya mendekomposisi ozon menjadi OH radikal dan superoksida yang kemudian akan bereaksi secara beruntun dengan ozon. Penambahan H₂O₂ ini memungkinkan proses dekomposisi ozon berjalan dengan baik dan cepat dengan ditunjukkannya nilai $K_{La} O_3$ yang kecil pada variasi AOP dibandingkan variasi dengan ozon saja. Pada Tabel 3 memperkuat dugaan bahwa konsentrasi H₂O₂ 1,795 g/L yang ditambahkan pada proses ozonisasi lebih banyak menghasilkan OH radikal dibandingkan konsentrasi H₂O₂ 1,197 g/L, ini ditunjukkan dengan lebih sedikitnya kelaurutan ozon dan rendahnya konsentrasi DO dibandingkan variasi yang lain.

4. KESIMPULAN

Didalam perhitungan harga $K_{La}O_3$, koefisien perpindahan massa ozon dihubungkan dengan koefisien perpindahan massa oksigen. Kelaurutan ozon mengalami perbedaan pada setiap variasi perlakuan. $K_{La} O_3$ paling rendah dialami pada variasi AOP dengan kombinasi ozon dan

H₂O₂ 1,795 g/L yaitu sebesar 0,0023. Kecilnya nilai K_{La} dapat mengindikasikan ozon lebih banyak terdekomposisi menjadi OH radikal. Lebih rendahnya nilai K_{La} pada proses AOP disebabkan hadirnya inisiator lain yang dapat mendukung pembentukan OH radikal yaitu H₂O₂. Proses oksidasi yang dilakukan OH radikal terbukti efektif karena OH radikal merupakan oksidator terkuat dan tidak selektif dalam menyisihkan senyawa organik pada sampel. Adanya hal tersebut proses AOP berbasis ozon dapat menjadi rekomendasi dalam pengolahan lanjutan guna menyempurnakan pengolahan lindi eksisting yang telah dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada DIKTI yang telah memberikan dukungan terhadap penelitian ini melalui Program Hibah Bersaing.

DAFTAR RUJUKAN

- Abuzar, S.S., Putra, Y.D., Emargi, R.E. 2012. "Koefisien Transfer Gas (K_{La}) Pada Proses Aerasi Menggunakan Tray Aerator Bertingkat 5 (Lima). *Jurnal Teknik Lingkungan UNAND* 9 (2) : 155-163 (Juli 2012). ISSN 1829-6084
- Ali, Munawar. 2011. *Rembesan Air Lindi (Leachate) Dampak Pada Tanaman Pangan dan Kesehatan*. Surabaya : UPN "Veteran" Jawa Timur.
- Beltran, J.F. 2004. *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems*. Lewis Publishers : Boca Raton.
- Damanhuri, Enri. 2008. *Diklat Landfilling Limbah-Versi 2008*. FTSL ITB
- Krisma, Anita. 2008. *Penyisihan Besi dan Zat Organik Dari Air Tanah Menggunakan Ozon (AOP)*. Intitut Teknologi Bandung. No.401/S2-TL/TPAL/2008
- L.S Clesceri, A.E. Greenberg, A.D. Eaton, APHA, AWWA and WEF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition*, Washington DC, Methods 5220 C (Closed Reflux, Titrimetric Method).
- L.S Clesceri, A.E. Greenberg, A.D. Eaton, APHA, AWWA and WEF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition*, Washington DC, Methods 5910 B (Ultraviolet Absorption Method).
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirrasouyan, F., & Moulin, P. (2007). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *ScienceDirect*.
- Rezagama, Arya., Notodarmojo, S. 2012. *Studi Ozonisasi Senyawa Organik Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sarimukti*. ITB. Teknik-Vol.34 No.2 Tahun 2013, ISSN 0852-1697
- Sari, Nurida. 2011. *Efektivitas Ozon Dalam Penyisihan Besi Terlarut (Fe²⁺) dan Proses Transfer Gas Ozon Dengan Perlakuan Variasi Diameter Pori dan Debit Aliran Udara*. Itenas, Bandung.
- SNI 6989.59:2008 Tentang Metode Pengambilan Contoh Air Limbah
- SNI 6989.72:2009 Tentang Cara Uji Kebutuhan Oksigen Biokimia (BOD)
- SNI 06-6989.11-2004 Tentang Cara Uji Derajat Keasaman (pH) dengan Alat pH Meter
- SNI 06-2422-1991 Tentang Pengujian Keasaman Dalam Air Dengan Titrimetri
- SNI 06-6989.1-2004 Tentang Cara Uji Daya Hantar Listrik (DHL)
- SNI 06-6989.14-2004 Tentang Cara Uji Oksigen Terlarut Secara Yodometri (Modifikasi Azida)
- SNI 06-6989.23-2005 Tentang Cara Uji Suhu Dengan Termometer
- SNI 06-6989.25-2005 Tentang Cara Uji Kekeruhan Dengan Nefelometer
- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., & Ghrabi, A. (2007). Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide system. *Journal of Hazardous Materials*.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H.D. 2003. *Wastewater engineering Treatment and Reuse (4 ed.)*. Metcalf and Eddy, inc. Hongkong : McGraw-Hill Company, Inc.
- Von, G. U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37 (7), 1443-1467.