

TEKNOLOGI DISINFEKSI LIMBAH CAIR DENGAN MENGGUNAKAN OZON WASTEWATER DISINFECTION TECHNOLOGY BY OZONE

Aditia Ginantaka

Jurusan Teknologi Industri Pertanian Fakultas Ilmu Pangan Halal Universitas Djuanda
Bogor, Jl. Tol Ciawi No. 1, Kotak Pos 35 Ciawi, Bogor 16720.

Korespondensi: Aditia Ginantaka, E-mail: aditiaginantaka@gmail.com

(Diterima Dewan Redaksi: 21-09-2015)

(Dipublikasi Dewan Redaksi: 02-10-2015)

ABSTRACT

Several countries say that they are very concerned about waste handling issue. They showed by the adoption of several regulations regarding environmentally friendly products through use of eco labeling on an industrial product. Several conventional waste management techniques either "end of pipe" approach or cleaner production concept have been widely applied. This paper explained a review literature about wastewater handling on tertiary stages which purpose to treat the wastewater and get a better quality of water. The objective of this paper is to compare several wastewater disinfection techniques by ozone that have applied and the output of water configuration. Besides that this paper aims to show about several things that should be done in order to face future trends based on the researchers viewpoint. Based on review result, disinfection technique using ozon could as recommendation technique for waste water treatment process. This unit operation development could matched based on regulation requirement for waste water treatment.

Keywords: disinfection, ozone, wastewater

ABSTRAK

Penanganan limbah merupakan salah satu aspek yang menjadi perhatian berbagai negara di dunia. Hal ini ditunjukkan dengan penerapan beberapa regulasi mengenai produk ramah lingkungan melalui penggunaan ecolabeling pada sebuah produk industri. Beberapa teknik penanganan limbah konvensional telah banyak diterapkan, mulai dari pendekatan *end of pipe* maupun pendekatan preventif melalui konsep *cleaner production*. Paper ini menjelaskan hasil *review* dari beberapa literatur tentang penanganan limbah cair secara lanjutan dalam penanganan tersirer yang bertujuan untuk membersihkan air hingga mencapai parameter kualitas yang lebih baik. Tujuan dari paper ini yaitu, untuk membandingkan beberapa penerapan teknik disinfeksi limbah cair dengan penambahan ozon serta konfigurasi output yang dihasilkan. Selain itu paper ini bertujuan untuk menunjukkan tentang hal-hal yang perlu dilakukan selanjutnya dalam rangka menghadapi trend di masa mendatang berdasarkan sudut pandang para peneliti. Hasil telaah menunjukkan bahwa teknologi disinfeksi dengan ozon direkomendasikan sebagai satu unit operasi yang dapat memenuhi kebutuhan penanganan limbah industri dan pengembangannya mampu menyesuaikan dengan tuntutan regulasi yang ada.

Kata kunci: disinfeksi, ozon, limbah cair

PENDAHULUAN

Perkembangan kebutuhan hidup manusia membuka peluang berbagai usaha pengadaan barang yang diproduksi secara massal melalui industrialisasi. Sebuah produk atau barang dapat dihasilkan dari proses transformasi bahan baku baik secara fisik maupun kimiawi. Salah satu dampak dari proses pengolahan di industri adalah dihasilkannya limbah yang dapat berbentuk cair, padat maupun gas. Pelepasan limbah secara langsung ke lingkungan dapat mengganggu keseimbangan lingkungan apabila tidak dilakukan penanganan limbah terlebih dahulu. Beberapa teknik penanganan limbah konvensional telah diterapkan yang meliputi koagulasi/flokulasi/proses sedimentasi, tahap penanganan biologis dan proses penyaringan.

Dewasa ini telah muncul berbagai teknik penanganan limbah lanjutan, sebagai hasil perbaikan dari berbagai teknik penanganan yang ada serta dalam rangka memenuhi regulasi yang ditetapkan oleh pemerintah. Diantaranya yaitu, penyaringan dengan membrane, disinfeksi dengan UV (ultra violet), oksidasi dengan ozon dan adsorpsi (Ried *et al.* 2009). Metode disinfeksi dengan klorin merupakan teknik penanganan limbah yang masih banyak digunakan. Namun, hasil evaluasi dari alternatif teknik disinfeksi telah dilakukan dengan mempertimbangkan produk samping yang dihasilkan setelah klorinasi serta efisiensi dalam hal kemampuan mengeliminasi mikroorganisme epidemic pada dosis klorin yang rendah (Xu *et al.* 2002).

Salah satu metode penanganan limbah cair secara lanjutan adalah dengan teknik disinfeksi menggunakan ozon. Penanganan ini bertujuan untuk melakukan penurunan cemaran biologis dalam limbah cair sehingga tidak menyebabkan kontaminasi ke badan air. Cemaran biologi dapat berupa kandungan

mikroorganisme patogen yang dapat mengkontaminasi sumber air yang digunakan untuk masyarakat umum. Teknik disinfeksi menggunakan ozon telah diusulkan sejak tahun 1970 di Amerika dan telah menjadi salah satu disinfektan yang paling efektif dan banyak digunakan di Eropa untuk melakukan inaktivasi bakteri patogen pada air minum (Xu *et al.* 2002).

Tujuan dari kajian ini adalah untuk membandingkan beberapa teknik disinfeksi limbah cair yang telah dilakukan dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Kemudian kajian ini juga bertujuan untuk menelaah hal-hal apa saja yang perlu dilakukan dalam rangka menghadapi trend di masa mendatang dalam aspek penanganan limbah cair dengan teknik disinfeksi.

TUJUAN PENERAPAN

Disinfeksi merupakan metode untuk memusnahkan mikroorganisme yang dapat menimbulkan penyakit melalui penambahan bahan disinfektan. Efisiensi *disinfectant* tergantung dari jenis bahan kimia yang digunakan. Ozon merupakan senyawa yang dapat membunuh bakteri dan mempunyai daya oksidasi yang kuat dan pada awalnya digunakan untuk menghilangkan rasa, bau dan warna. Ozon yang dikenal memiliki sifat radikal (mudah bereaksi dengan senyawa disekitarnya) serta memiliki oksidasi potential 2.07 V. Selain itu, ozon telah dapat dengan mudah dibuat dengan menggunakan plasma seperti *corona discharge* (Said. 2014). Pencemaran mikroorganisme dalam badan air dapat menyebabkan bahaya apabila badan air digunakan untuk sumber air minum dan keperluan industri pangan. Industri yang memiliki potensi cemaran biologis pada limbahnya perlu menerapkan teknik penanganan limbah dengan disinfeksi. Telaah literatur dilakukan dengan membandingkan metode penelitian dan konstruksi proses

yang digunakan, dosis ozon yang diaplikasikan serta hasil yang diperoleh dari pengukuran karakteristik limbah cair yang telah mendapatkan penanganan dengan ozon. Beberapa hasil telaah diantaranya sebagai berikut:

1. Xu *et al.*, (2002)

Metode :

- Percobaan dengan skala pilot plan yang dilakukan pada air limbah yang berasal dari 2 unit penanganan limbah sekunder (dari Envry, Perancis dan Washington, Inggris) dan 1 unit penanganan limbah tersier (dari Indianapolis, USA).
- Indikator keberhasilan proses disinfeksi dengan mengukur kandungan Fecal coliform dan *E. coli*
- Konstruksi pilot plan menggunakan reaktor *Continous-Flow Ozone*, yang dioperasikan dalam mode *continuous counter-current*.
- Dosis ozon yang di aplikasikan yaitu 3–16 mg/L (Envry), 4–50 mg/L (Washington) dengan waktu tunggu (*retention time*) sebesar 2-10 menit dan 1–35 mg/L (Indianapolis) dengan waktu tunggu 3-15 menit.
- Parameter TOD (*transferred ozone dose*) sebesar 2–13 mg/L (Envry), 4–30 mg/L (Washington) dan 0.5–12 mg/L (Indianapolis).

Hasil:

- Efisiensi transfer massa diperoleh sebesar 30% hingga 55%.
- Nilai TOD pada sampel limbah dari unit penanganan sekunder sebesar 3.1–4.2 mg/L, hampir tidak berbeda dengan nilai TOD pada sampel limbah dari unit tersier yaitu 2.5–5.3 mg/L. Nilai ini sesuai dengan hasil riset sebelumnya dengan jenis limbah yang berbeda oleh Janex *et al.* (2000).
- Bakteri *E.coli* dapat diinaktivasi sebesar 2 log₁₀.
- Efisiensi disinfeksi yang lebih tinggi diperoleh pada penambahan dosis

sebanyak 4,8 mg/L dengan waktu kontak selama 4 menit, yang mampu melakukan inaktivasi enteroviruses sebesar > 2,9 log *inactivation*.

- Total inaktivasi bakteri F+ *coliphages* mencapai > 2,2 log *inactivation* pada penambahan dosis 8,6 mg/L, sementara pada dosis ozon yang lebih tinggi hasil tidak jauh berbeda.

2. Shin *et al.*, (2003)

Metode :

- Percobaan dengan menggunakan reaktor yang berisi 0.01 M ODF (ozone demand free) dengan buffer fosfat pH 7 sebanyak 30 to 35 ml), menggunakan pengaduk *magnetic stirrer* dan dijaga pada suhu 5°C dengan mensirkulasikan air dingin melewati *reactor jacket* selama 20 sampai 30 menit.
- Dosis ozon ditambahkan sebanyak 0.37 mg/L.
- Proses disinfeksi virus dilakukan setelah air dalam reaktor dikondisikan dengan ozon selama 60 menit.
- Suspensi virus kemudian diinjeksikan sebanyak 3.3 ml hingga 3.7 ml.

Hasil:

- Kandungan Virus dihitung dalam satuan PFU per millimeter.
- Jumlah virus berkurang secara cepat pada waktu kontak dengan ozon selama 10 detik dengan penurunan sebesar 2 hingga 4log₁₀, setelah itu penurunan jumlah virus relatif lambat sekitar 0 hingga 1log₁₀.
- Penurunan jumlah Norwalk virus (NV) dideteksi menggunakan LT PCR sebesar 3log₁₀ setelah waktu kontak selama 10 detik dan 4log₁₀ dengan waktu kontak menit berdasarkan pengukuran ST PCR.

3. Silva *et al.*, (2010)

Metode:

- Eksperimen dilakukan pada *bench-scale* unit yang terdiri dari ozon generator dan kolom ozonasi yang menggunakan material inert.
- Percobaan dilakukan dengan aplikasi dosis ozon sebanyak 5.0, 8.0 and 10.0 mg/L, dengan aliran konstan.
- Waktu kontak selama 5, 10 dan 15 menit.

Hasil :

- Besaran nilai inaktivasi coliform sebesar $2.00-4.06 \log_{10}$, dan inaktivasi untuk *Escherichia coli* sebesar $2.41-4.65 \log_{10}$.
- Rata-rata efisiensi transfer massa pada kolom reaktor sebesar 78% untuk dosis ozon 5.0 mg/L, 68% untuk dosis 8.0 mg/L dan 73% untuk 10.0 mg/L pada ketiga variasi waktu kontak.
- Xu *et al.*, 2002 menghasilkan efisiensi transfer massa sebesar 30% hingga 55 % pada aplikasi dosis sebesar 1.0 dan 50.0 mg/ L, dan lebih rendah dibandingkan Shilva *et al.* (2010)
- Nilai transfer masa yang tinggi diperoleh karena kondisi proses yang berbeda yang dipengaruhi oleh suhu. Suhu operasi yang tinggi dapat berdampak negatif pada kelarutan ozon.

4. Ried *et al.*, (2009)

Metode :

- Eksperimen dilakukan dengan dosis dosis ozon 10 mg/L.
- Contoh kasus kajian dilakukan unit penanganan limbah di Rianica, Itali.
- Proses *treatmen* dengan ozon dilakukan pada *reaction chamber* dengan kapasitas 2000 m³ dan kebutuhan spesifik ozon sebesar 6,6 mg/L.
- Dosis ozon yang diaplikasikan sebesar 10 mg/L.

Hasil:

- Melalui penambahan ozon dengan dosis 10 mg/L, diperoleh hasil bahwa terdapat penurunan *E.Coli* mencapai 10^3 CFU/100ml.
- *Hydraulic retention time* selama kontak pada reaktor tidak berpengaruh secara signifikan karena waktu retensi pada 10 menit hingga 30 menit menunjukkan hasil yang sama.
- Proses *treatmen* menunjukkan penurunan jumlah bakteri lainnya mencapai 3-4log setelah *E.Coli* dieliminasi.

5. Jyoti dan Pandit (2004)

Metode:

- Eksperimen dilakukan pada 11 sampel air dengan kandungan berbagai macam bakteri coliform.
- Ozon diperoleh dari generator dengan udara kering sebagai umpannya, dan laju produksi 0,2 g/jam.
- Larutan ozon dibuat dengan konsentrasi 50 mg/l dalam air distilasi.
- Dosis larutan ozon yang digunakan bervariasi diantaranya 10, 20, 40, 60 dan 80 ml dari ozon stock untuk mencapai konsentrasi sebesar 0.5, 1, 2, 3 dan 4 mg/L.
- Proses reaksi dilakukan selama 15 menit dan 60 menit dengan pengaduk *magnetic stirrer*.
- Pengukuran sampel dilakukan setiap 5 menit.

Hasil:

- Hasil eksperimen menunjukkan pada kasus bakteri HPC (*heterotropic plate count*), pada 0.5 mg/l dosis ozon, diperoleh proses disinfeksi mencapai 46% pada 15 menit pertama proses reaksi, kemudian meningkat hingga 82% pada proses reaksi selama 60 menit. Fenomena yang sama juga terjadi pada dosis ozon lainnya 1-5 mg/L.

- Efek disinfeksi berlangsung dengan baik karena pengaruh waktu reaksi Antara ozon dengan mikro organisme. Hasil yang signifikan diperoleh pada waktu pengukuran sampel 15 menit dan 60 menit setelah reaksi berlangsung.

6. Macauley *et al.*, (2006)

Metode:

- Sampel limbah yang digunakan diperoleh dari proses lagoon yang berasal dari dua unit penanganan limbah berbeda dengan operasi penanganan yang berbeda.
- Proses eksperimen dilakukan dengan ozon melalui proses kompresi oksigen.
- Dosis ozon yang digunakan diantaranya 10, 20, 40, 100, 150, 200 mg/L.
- Air limbah dari lagoon banyak mengandung material organik sehingga proses reaksi ditetapkan selama 2,5 jam.

Hasil :

- Proses inaktivasi tidak berjalan efektif pada dosis ozon 10 dan 20 mg/L, hal ini dikarenakan pada dosis ozon rendah, ozon akan lebih cenderung dikonsumsi untuk mendegradasi material organik.
- Pada dosis ozon 100 mg/L efisiensi inaktivasi bakteri mencapai 3,3 hingga 3,9 log.
- Penambahan dosis ozon yang lebih tinggi juga tidak mencapai inaktivasi bakteri lebih signifikan karena ozon akan mengalami *self-decomposition* pada dosis tinggi.
- Proses disinfeksi dengan ozon memperoleh nilai inaktivasi bakteri lebih besar dibanding klorinasi yang

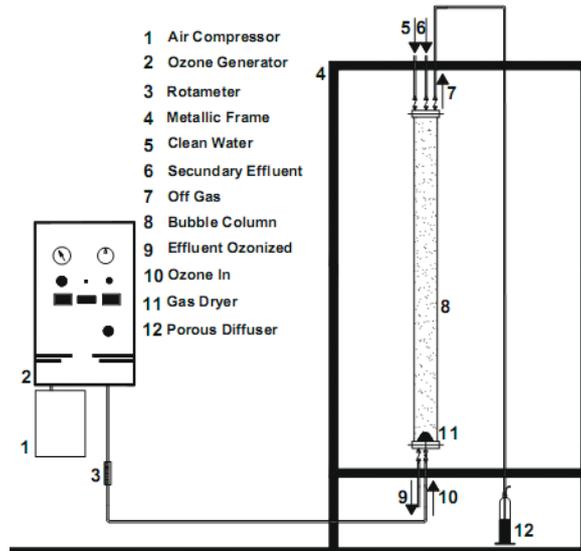
hanya mencapai 2,2 dan 3,4 log pada dua sampel berbeda, namun masih meninggalkan mikro organisme yang resisten seperti *Bacillus subtilis* dan *Bacillusli cheniformis*. Disinfeksi dengan UV dapat mencapai inaktivasi seluruh mikroorganisme, namun membutuhkan energi yang tinggi (Macauley *et al.* 2006).

PRINSIP KERJA

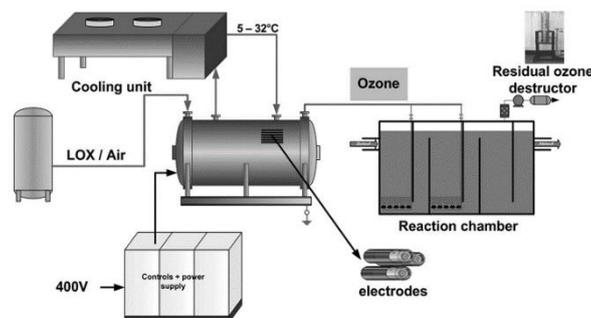
Proses disinfeksi dengan ozon, pada prinsipnya dilakukan melalui penambahan ozon pada konsentrasi tertentu kedalam suspensi air limbah. Proses reaksi dapat dilakukan pada reaktor berpengaduk (Silva *et al.* 2010; Jyoti dan Pandit 2004) atau dengan pada kolom reaksi dengan prinsip *counter-current* (Xu *et al.* 2002; Silva *et al.* 2010). Keberhasilan proses disinfeksi dipengaruhi oleh dosis ozon dan waktu kontak dengan mikroorganisme dengan ozon pada air limbah. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam proses integrasi unit penanganan limbah dengan proses treatment menggunakan ozon adalah (Ried *et al.* 2009):

- Kisaran jumlah kebutuhan dosis ozon yang diperlukan (bergantung pada water matriks dan bahan kontaminan)
- Hitungan mengenai *ozon demand* dengan rumus : [dosis ozon] x [flow rate]
- Komponen dari sistem ozon (generator ozon, gas supply, sistem reaksi, penanganan keluaran gas)
- Pengendalian proses dan pengukuran parameter reaksi secara online.

Beberapa ilustrasi unit penanganan limbah dengan ozon dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. ilustrasi unit disinfeksi limbah cair dengan ozon secara *Counter Current* (Silva *et al.* 2010).



Gambar 2. ilustrasi unit disinfeksi limbah cair dengan ozon dengan *Reactor Chamber* (Ried *et al.* 2009).

KOMPONEN PENYUSUN

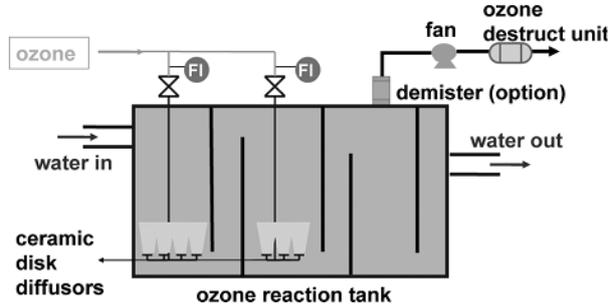
Mekanisme kerja unit penanganan limbah dengan teknik disinfeksi ozon didukung oleh beberapa komponen penyusun unit penanganan limbah. Unit pertama yaitu ozon generator, unit ini dapat dipasangkan pada kontainer pengolahan limbah atau diintegrasikan pada unit bangunan yang telah ada (Ried *et al.*, 2009). Fungsi dari ozon generator adalah untuk memproduksi gas ozon. Alternatif proses produksi ozon melalui ozon generator diantaranya menggunakan:

- oksigen cair
- udara kering
- pressurized-swing adsorption (PSA) yang mampu menghasilkan ozon

dengan kapasitas produksi ozon 5-10 kg/jam

Pemilihan alternatif dipengaruhi oleh ketersediaan bahan baku, seperti oksigen cair dan biaya produksi. Ozon yang dihasilkan dari generator dialirkan menggunakan pipa stainless steel menuju reaktor chamber. Unit kedua adalah desain unit transfer gas dan unit reaktor. Beberapa desain reaktor dapat berupa tanki seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dengan sistem transfer gas menggunakan diffuser atau injector. Pemilihan teknik transfer gas bergantung pada laju alir cairan limbah, dosis ozon yang diperlukan dan kinetika reaksi (Ried *et al.* 2009). Unit ketiga adalah unit pengukuran secara online yang bertujuan untuk mengendalikan dan memantau

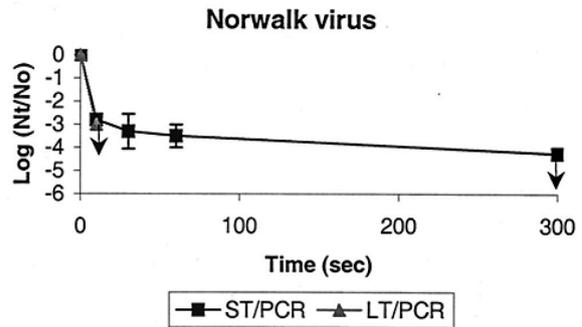
proses produksi ozon, pengukuran konsentrasi ozon yang dikeluarkan setelah reaksi.



Gambar 1. Reaktor ozonisasi (Ried *et al.*, 2009)

Berdasarkan hasil studi pustaka, diketahui bahwa keberhasilan proses disinfeksi menggunakan ozon dipengaruhi oleh dosis dan waktu kontak atau retention time antara ozon dengan kontaminan. Beberapa riset yang ditelaah umumnya menggunakan dosis ozon mulai dari 0,37 mg/L, hingga 200 mg/L, dengan waktu kontak antara 10 detik hingga 2,5 jam. Hal ini tentu bergantung pada karakteristik air limbah yang di treatmen. Sebagai contoh pada percobaan yang dilakukan oleh Macauley *et al.* (2006), inaktivasi mikroorganisme baru efektif pada penambahan dosis ozon 100 mg/L dengan waktu retensi 2,5 jam. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik air limbah yang banyak mengandung material organik serta self-decomposition dari ozon. Sementara inaktivasi virus pada penambahan dosis 3,7 mg/L dicapai secara signifikan pada waktu kontak selama 10 detik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Hal ini dikarenakan eksperimen yang dilakukan pada air dan bukan pada air limbah. Penelitian

dilakukan untuk mengetahui seberapa efektif dosis ozon pada penurunan konsentrasi virus pada air.



Gambar 4. Ilustrasi pengaruh ozonisasi terhadap inaktivasi mikroorganisme menggunakan ozon (dosis 0.37mg/liter ;pH 7; T=5°C) (Shin dan Sobsey, 2003).

Secara umum dosis efektif untuk disinfeksi limbah cair berkisar diantara 4,8 mg/L sampai 10 mg/L dengan waktu kontak 5 hingga 60 menit. Ilustrasi mengenai proses inaktivasi mikroorganisme diujikan pada Gambar 5 dan 6 serta Tabel 2. Besaran inaktivasi mikroorganisme dinyatakan dalam log₁₀ dengan rumus (Silva *et al.* 2010):

$$Inaktivasi = \log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

Dimana:

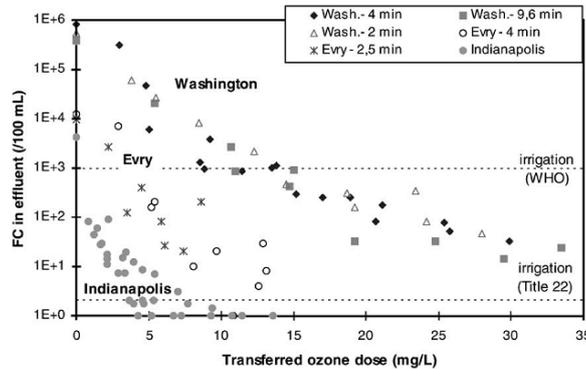
N = jumlah mikroorganisme pada waktu t;

N₀ = jumlah mikroorganisme pada waktu t=0

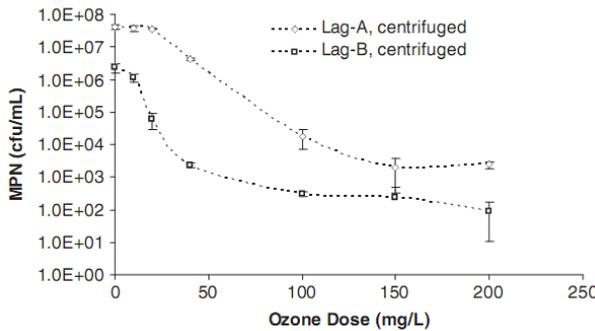
Tabel 2. Total inaktivasi *Coliform* dan *E. Coli* (Silva *et al.* 2010)

Dosis ozon (mg/L)	Waktu kontak (menit)	Ozon yang dikonsumsi (mg/L)	Inaktivasi log ₁₀	
			Total Coliform	E. Coli
5.0	5.0	3.77	2.2±0.3	2.6±0.2
5.0	10.0	3.97	2.2±0.3	2.7±0.3
5.0	15.0	3.95	2.4±0.3	2.9±0.4
8.0	5.0	5.33	3.0±0.4	3.2±0.3

8.0	10.0	5.20	3.0±0.5	3.2±0.3
8.0	15.0	5.64	3.0±0.5	3.5±0.4
10.0	5.0	7.06	3.2±0.1	4.0±0.2
10.0	10.0	7.13	3.6±0.6	4.2±0.1
10.0	15.0	7.64	3.7±0.2	4.3±0.3



Gambar 5. Performa ozon pada inaktivasi *fecal coliform* (FC) pada 3 jenis sumber air limbah berbeda dibandingkan dengan standar untuk reuse (Xu *et al.* 2002).



Gambar 6. Efek dosis ozon pada inaktivasi bakteri pada dua jenis sumber air limbah (lag A; lag B) (Macauley *et al.* 2006).

KESIMPULAN

Penggunaan ozon untuk penanganan limbah cair sangat feasible secara ekonomis (Ried *et al.* 2009), sehingga dapat direkomendasikan sebagai salah satu unit operasi yang dapat memenuhi kebutuhan penanganan limbah industri. Penanganan limbah yang tepat akan menghasilkan limbah yang baik, sehingga memenuhi baku mutu limbah dan aman untuk dibuang ke lingkungan. Perkembangan regulasi dari pemerintah menuntut adanya penyesuaian teknik penanganan limbah di beberapa daerah spesifik dengan kondisi lingkungan yang berbeda. Sehingga dimungkinkan

munculnya tren penggunaan teknologi ozonisasi untuk menyesuaikan dengan tuntutan regulasi yang ada. Ozonisasi tidak hanya dapat digunakan untuk proses disinfeksi, tetapi juga meningkatkan performa kinerja penanganan limbah pada tahap primer dan sekunder. Ozon dapat diproduksi dari udara kering maupun oksigen cair. Kemudahan memproduksi ozon menjadi salah satu peluang bagi pengembang unit operasi ozon generator. Meningkatnya perhatian masyarakat akan kesehatan dan sumber air yang aman akan memunculkan peluang desain alat disinfeksi air minum skala rumah tangga

yang dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari. Disamping itu efisiensi energi menjadi isu yang penting untuk diintroduksi pada teknik disinfeksi dengan ozon sehingga kebutuhan riset menjadi sangat perlu.

DAFTAR PUSTAKA

- Ried A, Mielcke J, Wieland A. 2009. The potential use of ozone in municipal wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, 31:415–421.
- Xu P, Janex ML, Savoye P, Cockx A. 2002. Waste water disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36:1043-1055.
- Said NI. 2014. Disinfeksi untuk pengolahan air minum[Internet]. [waktu dan tempat pertemuan tidak diketahui].11.59[diunduh November 30]. Tersedia pada: <http://www.kelair.bppt.go.id/Publika> si/BukuAirMinum/BAB12DISINFEKSI .pdf
- Shin GA dan Sobsey MD. 2003. Reduction of norwalk virus, poliovirus 1 and bacteriophage MS2 by ozone disinfection of water. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7) : 3975–3978.
- Silva GHR, Daniel LA, Bruning H, Rulkens WH. 2010. Anaerobic effluent disinfection using ozone: by products formation. *Bioresource Technology*, 101: 6981-6986.
- Jyoti KK dan Pandit AB. 2004. Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, 18: 9-19
- Macauley JJ, Qiang Z, Adams CD, Surampalli R, Mormile MR. 2006. Disinfection of swine waste water using chlorine, ultraviolet light and ozone. *Water Research*, 40: 2017-2026