

# INTENSIFIKASI PROSES OZONASI FENOL MENGGUNAKAN KAVITASI HIDRODINAMIKA DAN KAVITASI ULTRASONIK

## INTENSIFICATION OF PHENOL OZONATION BY HYDRODYNAMIC AND ULTRASONIC CAVITATIONS

Eva Fathul Karamah\*, Setijo Bismo, dan Widodo W. Purwanto  
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia  
\*e-mail: eva@che.ui.ac.id

### Abstract

Phenolic compounds are one of the main and hazardous contaminants in the waste water due to its toxicity, even at low concentration. Several wastewater treatment processes have been tested for reducing phenol concentration. One of the treatment processes is ozonation. However, this process has several problems, namely the small solubility of ozone in water and the low reactivity between ozone and phenol. This problem can be solved by cavitation, a phenomenon of formation, growth, and collapse of microbubbles within a liquid. This research studied the performance of ozonation and cavitation (hydrodynamic and/or ultrasound) for phenol degradation. The combined ozonation/hydrodynamic cavitation/ultrasound cavitation process showed the highest efficiency in phenol degradation, and the lowest residual and off gas ozone concentrations. The phenol removal efficiencies in ozonation/hydrodynamic cavitation/sonication, ozonation/sonication, ozonation/hydrodynamic cavitation and ozonation processes were 56.27%, 46.46%, 26.28%, and 18.63% respectively.

Keywords: phenol, ozonation, cavitation, hydrodynamic, ultrasound.

### 1. PENDAHULUAN

Kegiatan industri di negara maju maupun negara berkembang akan selalu dihadapkan dengan masalah pencemaran lingkungan yang salah satunya berupa pencemaran air. Senyawa fenolik merupakan salah satu kontaminan utama dan berbahaya dalam limbah cair industri karena sifatnya yang beracun bahkan pada konsentrasi yang rendah. Fenol dapat dihasilkan sebagai limbah cair dari industri batubara, produksi gas, petrokimia, farmasi dan pengilangan minyak dengan rentang konsentrasi 50-2000 mg/L (Priya, Premalata, dan Anantharaman, 2009). Dalam KEP-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri, ditetapkan konsentrasi senyawa fenolik yang diperbolehkan dalam air limbah kegiatan industri sebelum dibuang ke lingkungan tidak boleh melebihi 0,5 mg/L untuk industri golongan I dan 1 mg/L untuk industri golongan II.

Salah satu metoda yang potensial dan berkembang luas untuk mengurangi polutan seperti fenol pada limbah cair adalah dengan Proses Oksidasi Lanjut (POL). POL secara umum didefinisikan sebagai metoda oksidasi fasa larutan yang terutama didasari oleh pembentukan dan penggunaan radikal OH sebagai hasil sampingan di dalam proses yang mengakibatkan kehancuran dari senyawa target (pencemar) dan bisa digunakan secara terpisah atau dalam berbagai kombinasi. Pada proses oksidasi lanjut, radikal OH dapat dihasilkan melalui proses berbasis  $H_2O_2$  ( $H_2O_2/UV$ ,  $H_2O_2/O_3$ ), fotolisis ( $UV/O_3$ ,  $UV/H_2O_2/O_3$ ), *fenton*, fotokatalisis dan ozon (Esplugas *et al.*, 2002). Menurut Esplugas *et al.* (2002), skema yang menunjukkan penurunan fenol paling cepat adalah dengan *fenton reagent*. Namun berdasarkan estimasi biaya, proses ozonasi memerlukan biaya paling kecil dibanding proses yang lain. Oleh sebab itu, ozonasi dianggap menjadi proses yang paling sesuai untuk penyisihan fenol.

Ozon dapat bereaksi dengan dua cara di dalam air, yaitu oksidasi langsung oleh ozon sendiri dan oksidasi tidak langsung dengan bantuan radikal hidroksil (OH). Reaksi oksidasi langsung merupakan reaksi yang spesifik dan melibatkan serangan langsung dari O<sub>3</sub> dalam ikatan rangkap. Pada umumnya reaksi ini dimanfaatkan untuk penggunaan ozon sebagai desinfektan. Pada reaksi tidak langsung, spesi yang reaktif adalah radikal OH yang dibentuk dari ozon. Radikal OH merupakan oksidator yang non-diskriminatif (mampu mengoksidasi hampir semua senyawa).

Kekurangan ozon, yaitu kelarutannya yang rendah dalam air dan sifatnya yang selektif. Hal tersebut mengakibatkan laju reaksi oksidasi baik langsung (oleh ozon) maupun tidak langsung (melalui mekanisme pembentukan radikal OH) akan berkurang. Untuk mengimbangi kelarutan ozon yang rendah, cenderung dilakukan penggunaan dosis ozon yang berlebih. Hal ini menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya ozonasi (Von Gunten, 2003). Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air adalah dengan menggunakan kavitasasi (fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan). Kavitasasi menghasilkan gelembung mikro. Pembentukan gelembung berukuran mikro memperbesar luas permukaan kontak antara gas dengan cairan sehingga dapat memperbesar laju perpindahan massa. Selain itu, fenomena kavitasasi memberikan efek kimiawi dan efek mekanis yang dapat dimanfaatkan untuk mengintensifikasi proses ozonasi. Efek kimiawi berupa pembentukan senyawa-senyawa radikal hasil fragmentasi uap yang terperangkap di dalam gelembung karena kondisi ekstrim yang dihasilkan. Kondisi ekstrim ini juga memungkinkan adanya jalur lain reaksi selain oksidasi, yaitu reaksi pirolitik yang berperan dalam meningkatkan degradasi polutan. Efek mekanis berupa turbulensi lokal dan sirkulasi cairan mikro di

dalam reaktor dapat meningkatkan laju perpindahan massa (Gogate dan Kabadi, 2009; Gogate dan Pandit, 2004).

Penelitian yang menggabungkan ozonasi dengan kavitasasi sudah banyak dilakukan, di antaranya penelitian yang dilakukan oleh Gogate *et al.* Penelitian yang mengkaji efek sinergi antara ozonasi dan kavitasasi ultrasonik juga sudah banyak dilakukan, di antaranya penelitian yang dilakukan oleh Weaver *et al.* Namun, penelitian yang menggabungkan ozonasi dengan kedua jenis kavitasasi masih sangat jarang dilakukan. Dengan proses gabungan ozonasi/kavitasasi hidrodinamika/sonikasi, kavitasasi hidrodinamika yang terjadi memberikan efek fisis berupa peningkatan laju perpindahan massa gas ke dalam *liquid*. Rongga-rongga (gelembung) yang dihasilkan dari kavitasasi hidrodinamika menjadi inti pada peristiwa kavitasasi ultrasonik (sonikasi) dan dapat meningkatkan aktivitas kavitasasi di dalam reaktor. Penyemprotan (*sparging*) gas secara kontinyu melalui injektor menjamin kelangsungan terjadinya kavitasasi ultrasonik dan meningkatkan turbulensi.

Dalam penelitian ini akan dilakukan uji kinerja penyisihan fenol melalui proses ozonasi yang dikombinasikan dengan kavitasasi hidrodinamik dan/atau kavitasasi ultrasonik (sonikasi) dalam kondisi asam. Hal ini dilakukan untuk membedakan keberadaan radikal OH yang terbentuk karena efek kavitasasi dengan yang terbentuk karena dekomposisi normal ozon yang diinisiasi oleh ion hidroksida. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan evaluasi terhadap signifikansi penggunaan kavitasasi terhadap kinerja penyisihan fenol.

## 2. METODA

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu perancangan konfigurasi proses, persiapan larutan fenol, uji kebocoran, dan kalibrasi alat ukur, uji penyisihan fenol pada berbagai konfigurasi, pengolahan data serta analisis hasil.



Konfigurasi proses divariasikan berdasarkan keberadaan kavitas pada proses ozonasi, yaitu ozonasi/kavitas HD/sonikasi (O/K/S), ozonasi/kavitas HD (O/K), ozonasi/sonikasi (O/S) dan ozonasi (O). Variasi ini dilakukan dengan mengubah susunan peralatan yang digunakan yaitu seperti terlihat pada Gambar 1 untuk O/K/S. Proses O/K berlangsung tanpa sonikator. Proses O/S dilakukan dengan mengganti injektor *Mazzei* dengan pipa penghubung. Proses ozonasi (O) dilakukan tanpa sonikator dan injektor *Mazzei*.

Penelitian penyisihan fenol dengan menggunakan karbonat sebagai pemangsa radikal (*radical scavenger*) dilakukan juga guna memperjelas peranan radikal OH pada proses penyisihan fenol. Ion karbonat akan bereaksi dengan radikal OH yang terbentuk sehingga fenol yang tersisih diharapkan adalah akibat reaksi dengan ozon. Skema penelitian dengan menggunakan ion karbonat yaitu O/S, O/K dan O/K/S dengan prosedur yang sama dengan penelitian tanpa karbonat. Konsentrasi karbonat (dalam bentuk  $\text{CaCO}_3$ ) di dalam larutan adalah 16  $\mu\text{M}$ .

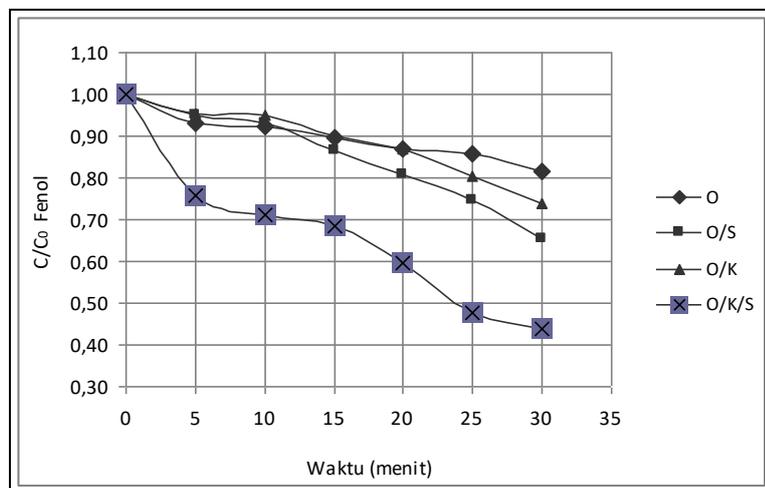
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Persentase Penyisihan Fenol**

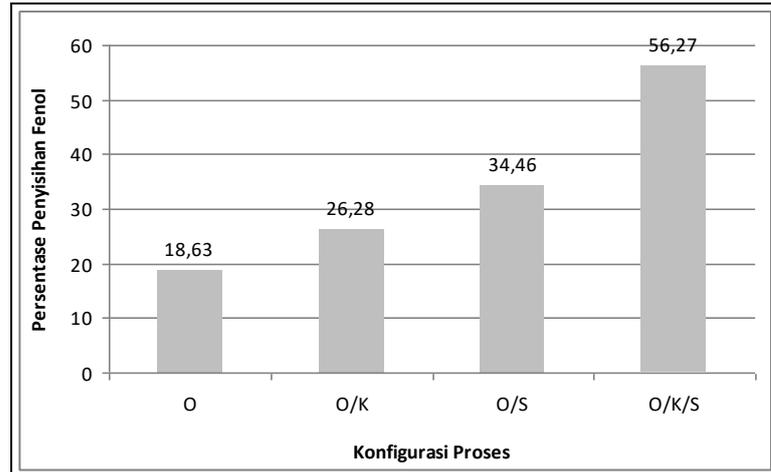
Nilai persentase penyisihan fenol dibandingkan untuk masing-masing konfigurasi proses (O, O/K, O/S serta O/K/S). Penyisihan fenol

pada proses gabungan ozonasi, kavitas hidrodinamika dan sonikasi dapat terjadi karena reaksi langsung dengan ozon secara selektif dengan  $k_{O_3} = 1,3 \times 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  dan reaksi non-selektif dengan radikal OH dengan  $k_{OH} = 6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Lesko, Colussi, dan Hoffmann, 2006). Penyisihan fenol pada proses gabungan ozonasi juga dapat terjadi karena dekomposisi termal fenol (pirolisis) yang terjadi pada daerah antar fasa gas-cair pada permukaan gelembung

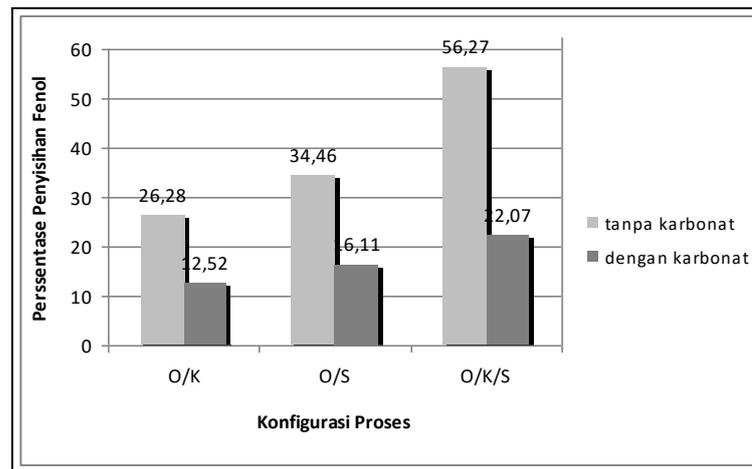
Gambar 2 memperlihatkan profil fraksi fenol yang tersisa pada larutan dalam bentuk perbandingan konsentrasi fenol terhadap konsentrasi awal fenol ( $C/C_0$ ). Konsentrasi fenol pada masing-masing konfigurasi cenderung menurun seiring dengan lamanya proses (Gambar 2). Penurunan yang paling drastis diperoleh pada penggabungan proses O/K/S dan yang paling kecil didapat pada proses ozonasi saja. Persentase penyisihan fenol paling rendah adalah sebesar 18,63%, sementara yang paling tinggi adalah sebesar 56,27% (Gambar 3). Ketika ozonasi dilakukan pada kondisi asam (pH 2-3), dekomposisi ozon yang diinisiasi oleh ion  $\text{OH}^-$  dapat ditekan sehingga pembentukan radikal OH menjadi terbatas. Berdasarkan situasi ini maka reaksi utama antara ozon dan fenol adalah reaksi langsung. Pada reaksi langsung, ozon secara selektif akan menyerang ikatan ganda pada senyawa organik (fenol).



**Gambar 2.** C/C<sub>0</sub> Fenol Pada Berbagai Konfigurasi Proses



**Gambar 3.** Persentase Penyisihan Fenol Pada Berbagai Konfigurasi Proses



**Gambar 4.** Perbandingan Persentase Penyisihan Fenol Tanpa dan Dengan Karbonat

Tetapan laju reaksi fenol dengan ozon adalah  $1,3 \times 10^3 \text{ M}^{-1}\text{detik}^{-1}$ , sementara tetapan laju reaksi fenol dengan radikal OH adalah  $6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{detik}^{-1}$ . Fenol lebih reaktif terhadap radikal OH dibandingkan dengan ozon. Oleh karena itu, proses ozonasi menghasilkan penyisihan fenol yang paling kecil. Pada proses ozonasi yang telah dikombinasikan dengan kavitasi, walaupun kondisi larutan asam, terjadi pembentukan radikal OH sehingga proses penyisihan fenol menjadi lebih baik dibandingkan dengan proses ozonasi saja.

Radikal OH pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi terbentuk dari empat sumber, yaitu:

1. Dekomposisi normal dari ozon (diinisiasi oleh ion hidoksida)

2. Dekomposisi termal uap air dari dalam gelembung mikro karena kavitasi
3. Dekomposisi termal ozon dalam gelembung mikro karena kavitasi
4. Dekomposisi termal oksigen dalam gelembung mikro karena kavitasi

Peningkatan jumlah radikal OH dari proses penggabungan ozon dengan kavitasi (hidrodinamika dan/atau ultrasonik) merupakan efek kimia dari kavitasi. Selain itu kavitasi juga memberi efek mekanis pada proses ozonasi, yaitu peningkatan laju transfer massa gas-cair ozon karena proses pencampuran yang lebih besar dan pemecahan gelembung-gelembung ozon ketika dilewati transduser atau injektor (Mason dan Tiehm, 2001).

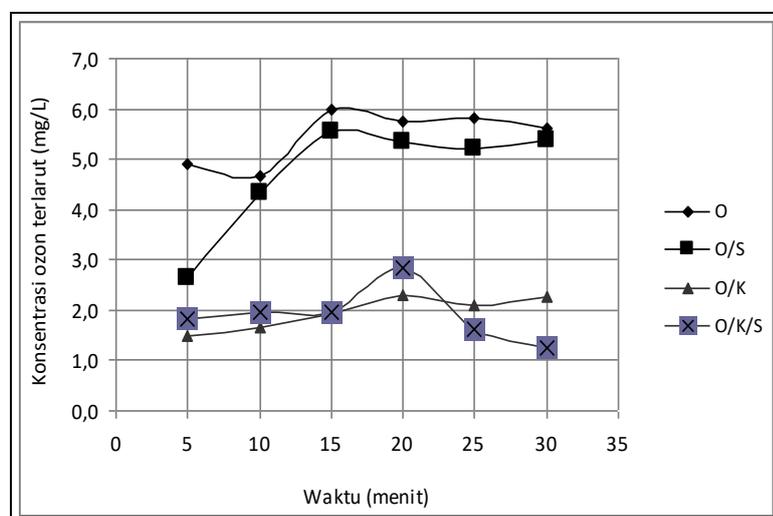
Gambar 4 menunjukkan perbandingan persentase penyisihan fenol pada percobaan tanpa dan dengan karbonat. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa persentase penyisihan fenol dengan karbonat lebih kecil dibandingkan tanpa karbonat, dimana persentase penyisihan fenol dengan karbonat memiliki nilai sebesar 50-60% dari penyisihan fenol tanpa karbonat. Berdasarkan hasil ini, terlihat bahwa pada percobaan tanpa karbonat, hampir 50-60% selisih persentase penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH sementara 40-50% sisanya adalah akibat reaksi fenol dengan ozon. Dengan demikian, dapat terlihat efek kimiawi kavitas yang menghasilkan radikal OH sangat signifikan dalam proses penyisihan fenol berbasis ozonasi. Proses yang menghasilkan persentase penyisihan fenol yang paling maksimum adalah proses gabungan O/K/S.

#### Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual)

Konsentrasi ozon terlarut merupakan jumlah ozon di dalam larutan yang tidak atau belum bereaksi (dengan fenol atau akibat terdekomposisi). Pada semua konfigurasi, konsentrasi ozon terlarut di awal proses meningkat; hingga pada suatu titik tertentu konsentrasinya turun (Gambar 5). Ozon yang berpindah dari fasa gas ke fasa cair akan bereaksi dengan fenol dan atau

terdekomposisi menjadi radikal OH atau radikal lainnya. Pemasukan gas ozon dalam bentuk gelembung (*bubbling*) ke dalam larutan akan meningkatkan konsentrasi ozon ke dalam larutan. Ozon terlarut sebagian besar bereaksi dengan fenol pada awal proses. Namun sejalan dengan makin lamanya proses, sebagian ozon juga terdekomposisi menjadi radikal OH. Radikal OH hasil dekomposisi ini menjadi promotor bagi reaksi dekomposisinya sendiri dan juga akan bereaksi dengan fenol, bahkan lebih reaktif daripada ozon. Reaksi radikal OH dengan fenol juga dapat menjadi daya pendorong bagi dekomposisi ozon. Dengan demikian, semakin banyak radikal OH yang terbentuk, reaksi dekomposisi ozon semakin besar sehingga pada suatu saat, konsentrasi ozon di dalam larutan berkurang.

Pada proses ozonasi, pH rendah, ozon sulit terdekomposisi menjadi radikal OH karena minimnya jumlah ion  $\text{OH}^-$  yang menjadi pemicu dekomposisi. Penambahan kavitas meningkatkan dekomposisi ozon di dalam air (Weavers dan Hoffmann, 1998). Gambar 5 juga menunjukkan bahwa proses ozonasi mengandung ozon terlarut paling banyak jika dibandingkan dengan proses O/K karena sedikit ozon yang terdekomposisi menjadi radikal OH. Proses O/K/S memiliki efek kavitas yang lebih besar dibandingkan dengan O/S dan O/K.



Gambar 5. Konsentrasi Ozon Terlarut Pada Berbagai Konfigurasi Proses

Penambahan kavitasasi memberi efek kimia (memperbesar dekomposisi ozon menjadi radikal OH) dan juga memberi efek mekanis/fisika, yaitu memperbesar laju perpindahan massa gas-cair. Efek mekanis ini jauh lebih signifikan terjadi pada sonikasi. Hal ini menjelaskan fenomena besarnya kandungan ozon residual pada proses O/S dibandingkan O/K dan O/K/S. Pada proses O/S, walaupun kandungan residual ozon masih tinggi, persentase penyisihan fenol yang dicapai (34,46%) lebih besar daripada proses O/K (26,27%).

### Konsentrasi Ozon pada Gas Keluaran (Off Gas)

Pada dasarnya, baik kandungan ozon residual maupun konsentrasi ozon pada gas keluaran menunjukkan seberapa efisien proses ozonasi. Jika kandungan ozon residual merupakan jumlah ozon di dalam larutan yang tidak atau belum bereaksi, konsentrasi ozon pada gas keluaran menunjukkan seberapa banyak ozon yang tidak terlarut. Dengan demikian, semakin sedikit kandungan ozon residual dan kandungan ozon pada gas keluaran maka proses ozonasi semakin efisien.

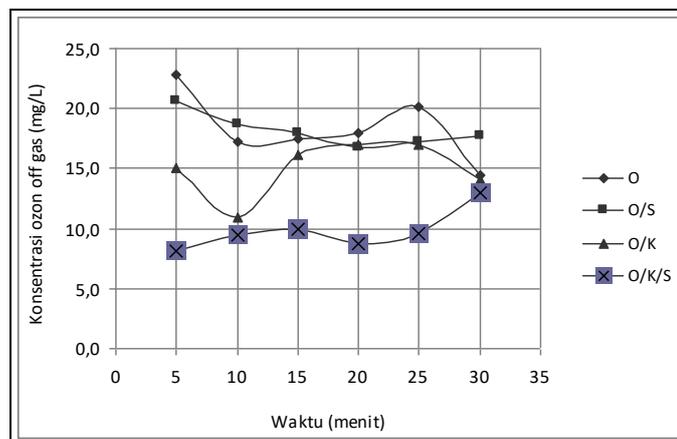
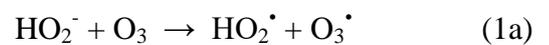
Gambar 6 memperlihatkan konsentrasi ozon pada gas keluaran paling sedikit nilainya pada proses O/K/S dan paling besar pada proses ozonasi (O). Hal ini terjadi karena efek mekanis kavitasasi yang dapat meningkatkan kelarutan ozon di dalam air. Makin besar

ozon pada fasa gas yang berpindah ke dalam cairan, konsentrasinya dalam fasa gas keluaran (*off gas*) makin sedikit.

Konsentrasi ozon di dalam larutan menjadi lebih kecil daripada proses lain yang mengalami efek kavitasasi yang lebih sedikit. Hal ini dikarenakan efek kimia kavitasasi berupa pembentukan radikal OH dari dekomposisi ozon. Reaksi dekomposisi ozon menjadi radikal OH dan reaksi ozon dengan fenol secara langsung menjadi gaya pendorong bagi ozon dalam fasa gas untuk berpindah ke dalam fasa cair. Oleh karena itu, proses O/K/S memiliki efisiensi paling tinggi dibanding proses lainnya karena dengan laju alir dan produktivitas ozon yang sama. Proses ini menunjukkan konsentrasi ozon residual dan konsentrasi ozon pada off gas yang paling kecil.

### Konsentrasi Hidrogen Peroksida

Konsentrasi  $H_2O_2$  merupakan faktor penting yang mempengaruhi kinerja degradasi polutan. Hal ini dapat terjadi karena  $H_2O_2$  (atau konjugasi dasarnya,  $HO_2^-$ ) berperan sebagai inisiator bagi reaksi rantai radikal yang mendorong pembentukan ion radikal superoksida ( $O_2^{\cdot-}$ ) dari molekul ozon (Beltran, 2004), menurut reaksi berikut:



**Gambar 6.** Konsentrasi Ozon Pada Gas Keluaran Pada Berbagai Konfigurasi Proses

Pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi, di mana produktivitas pembentukan radikal OH sangat tinggi,  $H_2O_2$  merupakan hasil dari reaksi penggabungan radikal OH (Sivasankar dan Moholkar, 2009):



Karena perannya sebagai inisiator, persentase degradasi polutan umumnya meningkat dengan meningkatnya konsentrasi  $H_2O_2$  (Kidak dan Ince, 2007). Namun demikian, berdasarkan kinetika dekomposisi ozon,  $H_2O_2$  juga berfungsi sebagai *scavenger* yang akan bereaksi dengan radikal OH dan menghasilkan radikal lain (Beltran, 2004).



Berdasarkan reaksi-reaksi di atas, konsentrasi  $H_2O_2$  cenderung naik turun dan tidak stabil seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Selain pada proses yang menggunakan kavitasi ultrasonik, keberadaan  $H_2O_2$  juga terdeteksi pada proses ozonasi walaupun konsentrasinya masih jauh lebih kecil dibanding proses yang menggunakan sonikasi. Walaupun cenderung tidak stabil, namun konsentrasi hidrogen peroksida paling tinggi terdapat pada proses O/K/S. Hal ini menunjukkan bahwa radikal OH paling banyak terbentuk pada proses gabungan ini.

### Konsentrasi Oksigen Terlarut

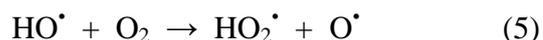
Reaksi dekomposisi ozon pada proses ozonasi menghasilkan oksigen sebagai produk akhir. Namun, untuk semua konfigurasi proses, konsentrasi oksigen terlarut menurun seiring waktu seperti dapat dilihat pada Gambar 8.

Penurunan konsentrasi oksigen terlarut pada berbagai kombinasi proses ozonasi terjadi karena salah satu atau kombinasi dari beberapa hal berikut:

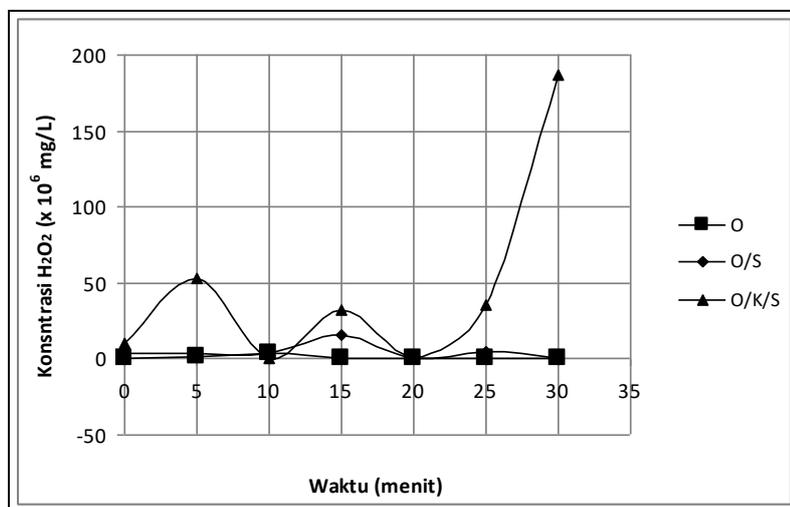
1. Terjadi dekomposisi termal (reaksi pirolisis) oksigen yang berada pada daerah antarfasa gas-cair karena keberadaan *hotspot*.
2. Reaksi oksigen dengan  $N_2$  bebas pada udara karena reservoir yang digunakan adalah reservoir terbuka. Reaksi antara oksigen dengan  $N_2$  bebas adalah sebagai berikut (Lesko, Colussi, dan Hoffmann, 2006):



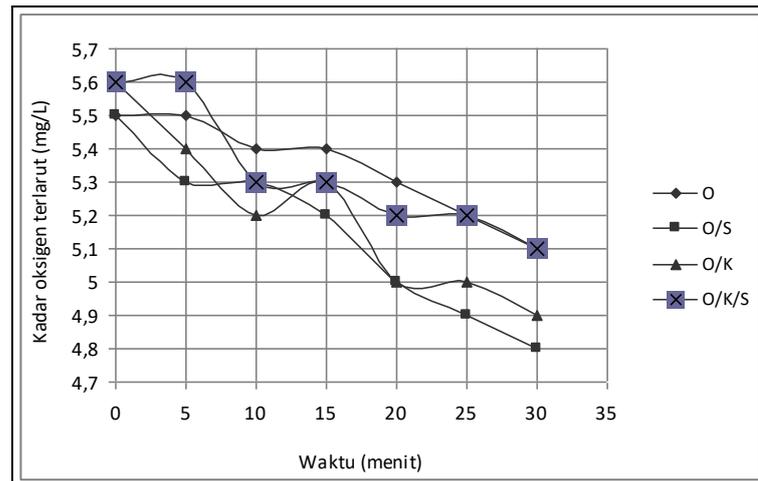
3. Reaksi oksigen terlarut dengan radikal OH yang bersifat nonselektif menurut reaksi berikut (Sivasankar dan Moholkar, 2009):



4. Penurunan kelarutan oksigen karena kenaikan suhu selama proses ozonasi. Kelarutan gas merupakan fungsi suhu, di mana jumlah gas terlarut makin besar pada suhu yang lebih rendah.



**Gambar 7.** Konsentrasi Hidrogen Peroksida Pada Berbagai Konfigurasi Proses



**Gambar 8.** Konsentrasi Oksigen Terlarut Pada Berbagai Konfigurasi Proses

5. Efek *degassing* atau tersisihnya gas terlarut dari dalam larutan karena pecahnya gelembung-gelembung kavitasi.

#### 4. KESIMPULAN

Penambahan kavitasi (hidrodinamik dan/atau ultrasonik) meningkatkan persentase penyisihan fenol, yang ditunjukkan dengan tingkat penyisihan fenol sebesar 56,27%; 46,46%; 26,28%; dan 18,63% masing-masing untuk proses ozonasi/kavitasi HD/sonikasi, ozonasi/sonikasi, ozonasi/kavitasi dan ozonasi yang berlangsung selama 30 menit.

Proses gabungan ozonasi/kavitasi HD/sonikasi merupakan proses yang paling efisien karena menghasilkan kelarutan ozon paling besar dan radikal OH paling banyak, yang ditunjukkan dengan persentase penyisihan fenol tertinggi. Namun, konsentrasi ozon residual dan konsentrasi ozon pada gas keluaran (*off gas*) paling kecil.

Sekitar 50%-60% penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH dan sementara 40%-50% sisanya adalah akibat reaksi langsung fenol dengan ozon.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Hibah Pasca Sarjana DP2M Dikti yang telah

membantu penelitian ini dan kepada Sarah Irene Nainggolan atas kerjasamanya dalam pengambilan data penelitian.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Beltran, Fernando J. (2004). *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Treatments*. Lewis Publishers. Florida.
- Bismo, Setijo., Sutrasno, K., Saksono, N., Karamah, E. F., dan Rahardjo, A. (2009). Some Aspects of Lake Water Treatment to Produce Clean Water Using Integration Processes of Adsorption, Filtration and Ozonation. *World Applied Science Journal*. 7 (4). 472-478.
- Esplugas, Santiago., Gimenez, J., Contreras, S., Pascual, E., dan Rodriguez, M. (2002). Comparison of Different Advanced Oxidation Processes For Phenol Degradation. *Water Research*. 36. 1034-1042.
- Gogate, P. R. dan Kabadi, A. M. (2009). A Review of Cavitation in Biochemical Engineering Biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*. 44. 60-72.
- Gogate, P. R. dan Pandit, A. B. (2004). A Review on Imperative Technologies For

- Wastewater Treatment I : Oxidation Technologies at Ambient Conditions. *Advances in Environmental Research*. 8. 501-551.
- Kidak, R. dan Ince, N.H. (2007). Catalysis of Advanced Oxidation Reactions by Ultrasound: A Case Study With Phenol. *Journal of Hazardous Materials*. 146. 630-635.
- Lesko, T., Colussi, A. J., dan Hoffmann, M. R. (2006). Sonochemical Decomposition of Phenol: Evidence for a Synergistic Effect of Ozone and Ultrasound for The Elimination of Total Organic Carbon From Water. *Environmental Science Technology*. 40. 6818-6823.
- Mason, T., dan Tiehm, Andreas ed. (2001). *Advances in Sonochemistry*. Jan Press Inc. USA.
- Priya, S. S., Premalata, M., dan Anantharaman, N. (2009). Solar Photocatalytic Treatment of Phenol Wastewater-Potential, Challenges and Opportunities. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 3 (6). 36-41.
- Sivasankar, T. dan Moholkar, V. S. (2009). Mechanistic Approach to Intensification of Sonochemical Degradation of Phenol. *Chemical Engineering Journal*. 149. 57-69.
- Von Gunten, Urs (2003). Ozonation of Drinking Water: Part I. Oxidation Kinetics and Product Formation. *Water Research*. 37. 1443-1467.
- Weavers, L. K. dan Hoffmann, M. R. (1998). Sonolytic Decomposition of Ozone in Aqueous Solution- Mass Transfer Effects. *Environmental Science & Technology*. 32 (24). 3941-3947.