

DEGRADASI FENOL DALAM LIMBAH CAIR SECARA FOTOOKSIDASI

Adriana Anteng Anggorowati^{1*}, Aning Ayucitra²

Prodi Teknik Kimia - Fakultas Teknik – Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Jalan Kalijudan 37 Surabaya (60114)

*e-mail : adrianaanteng@ukwms.ac.id

ABSTRAK

Pengolahan limbah cair telah dikembangkan dengan suatu teknologi yang disebut dengan *Advance Oxidation Processes* (AOPs). Dalam proses ini digunakan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) sebagai pengoksidanya. Radikal hidroksil ini memiliki kemampuan oksidasi yang besar yaitu 2,8 V. Dalam penelitian ini dilakukan degradasi polutan fenol dengan membandingkan dua proses yaitu oksidasi dengan dan tanpa fotofenton, dan fotooksidasi dengan ozon. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan persentase penurunan konsentrasi fenol akibat oksidasi dan fotooksidasi. Sampel larutan fenol dioksidasi dengan reagen Fenton yaitu campuran oksidator H_2O_2 dan FeSO_4 kemudian diradiasi dengan UV. Ozonisasi dilakukan dengan cara sampel larutan fenol dialiri ozon. Hasil dari penelitian ini adalah radiasi UV saja tanpa tambahan oksidator-kimia hanya mampu menurunkan kadar fenol hingga 20,34 % pada menit ke 50. Sedangkan jika menggunakan oksidator H_2O_2 dan radiasi UV, persentase penurunan konsentrasi fenol mencapai hingga 60,59 %. Pada proses oksidasi menggunakan reagen Fenton yang tanpa radiasi UV dan reagen Fenton yang dengan radiasi UV (Fotofenton) masing-masing dapat mendegradasi fenol hingga persentase penurunan konsentrasinya 74,26 % dan 79,99 %. Sedangkan pada proses ozonisasi fenol, tanpa dan dengan radiasi UV masing-masing dapat mendegradasi fenol hingga persentase penurunan konsentrasi fenolnya mencapai 88,61 % dan 92,48 %. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa radiasi UV sangat berpengaruh positif dalam mendegradasi fenol dalam limbah cair secara oksidasi.

Kata kunci: degradasi, fenol, fenton, fotooksidasi.

ABSTRACT

Liquid waste treatment has been developed with a technology called Advance Oxidation Processes (AOPs). In this process, the hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$) is used as the oxidizing agent. This hydroxyl radical has a high oxidation capacity of 2.8 V. In this study, the degradation of phenol pollutants was carried out by comparing two processes, namely oxidation with and without photo-fenton, and photooxidation with ozone. The purpose of this study was to determine the percentage decrease in phenol concentration due to oxidation and photooxidation. The sample of phenol solution was oxidized with Fenton's reagent, which is a mixture of oxidizing agents H_2O_2 and FeSO_4 then irradiated with UV. Ozonization was carried out by means of a sample of the phenol solution being fed with ozone. The result of this research is that UV radiation alone without chemical-oxidizing addition is only able to reduce phenol levels up to 20.34% at 50 minutes. Meanwhile, when using H_2O_2 oxidizing agents and UV radiation, the percentage reduction in phenol concentration reaches up to 60.59%. In the oxidation process, Fenton's reagent without UV radiation and Fenton's reagent with UV radiation (Photo-fenton) can degrade phenol up to a percentage of 74.26% and 79.99% respectively. Meanwhile, in the phenol ozonation process, without and with UV radiation, phenol could degrade phenol until the percentage of phenol concentration decreased reached 88.61% and 92.48%. Based on these results, it can be concluded that UV radiation has a very positive effect on oxidizing phenol in wastewater.

Key Words: degradation, phenol, fenton, photooxidation.

I. Pendahuluan

Pada beberapa tahun terakhir ini, perkembangan industri semakin pesat seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi. Limbah yang dihasilkan pun semakin bervariasi jenisnya. Pada umumnya berbagai limbah tersebut mengandung zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan maupun

lingkungan (Opoku *et al.* 2020). Oleh karena itu diperlukan adanya pengolahan yang baik agar dampak negatif dari limbah tersebut dapat dikurangi. Di Indonesia terdapat banyak industri kimia yang selain menghasilkan produk juga menghasilkan limbah buangan, dimana limbah tersebut dapat berupa limbah organik dan limbah

anorganik. Jika dibuang langsung tanpa diolah terlebih dahulu, maka limbah-limbah ini dapat membahayakan bagi lingkungan maupun manusia. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengatasi limbah-limbah tersebut antara lain dengan metode pengenceran dengan air agar konsentrasi limbah lebih encer, penambahan senyawa kimia lain agar terbentuk endapan logam berat, metode adsorpsi maupun metode biodegradasi (Raouf MEA *et al.* 2019).

Fenol dan derivatnya merupakan salah satu polutan yang sangat berbahaya di lingkungan karena bersifat racun. Fenol adalah salah satu senyawa pertama yang termasuk polutan dalam daftar prioritas U.S. Environmental Protection Agency - US EPA (Chowdhury, P 2017). Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menetapkan konsentrasi fenol dalam air minum tidak boleh melebihi 1µg . Berdasarkan beberapa studi telah teridentifikasi bahwa polutan utama dalam sumber air adalah senyawa fenolik, logam berat, dan pestisida (Akan JC, 2010). Jika manusia secara tidak langsung terpapar fenol, karena sifatnya yang korosif sehingga mengakibatkan iritasi kulit, mata hingga dapat mengganggu pernapasan manusia (Tsai-Ming Lin *et al.*, 2006). Struktur fenol menunjukkan reaktivitasnya yang mengarah pada sifat-sifatnya seperti persistensi di lingkungan, toksisitas dan kemungkinan sifat karsinogenik terhadap organisme hidup (Gami, A. A *et al.*, 2014).

Fenol dan turunannya yang terlarut dalam limbah cair sulit dikurangi konsentrasinya jika dilakukan secara alami, karena senyawa fenol dapat mengalami transformasi secara kimia, biokimia ataupun secara fisika. Oleh sebab itu banyak dilakukan penelitian dengan berbagai metoda yang bertujuan untuk menurunkan konsentrasi fenol dalam limbah cair agar memenuhi nilai ambang batas fenol (Imelda Hotmarisi Silalah *et al.*, 2020). Fenol banyak terdapat dalam air limbah kilang minyak sehingga telah dilakukan penelitian untuk menurunkan kadar fenol melalui proses AOPs (*Advance Oxidation Processes*) agar perawatan kilang dapat dipertahankan. Dalam penelitian ini dilaporkan ada dua metode AOPs yang diselidiki yaitu menggunakan pergandingan H₂O₂/UV dan H₂O₂/UV/O₃. Berdasarkan penelitian ini konsentrasi fenol dapat turun dari 1000 ppm hingga 37,5 ppm setelah 120 menit jika menggunakan metoda H₂O₂/UV/O₃ (Alif Nurul Azizah *et al.*, 2018). Proses AOPs merupakan proses oksidasi yang dapat menghasilkan radikal hidroksil (HO•) yang mampu mendegradasi senyawa fenol karena terurai menjadi CO₂ dan air (Chowdhury, P 2017). Dalam proses AOPs, ditambahkan reagen Fenton karena sangat efektif untuk menghilangkan senyawa aromatik yang ada

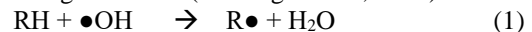
dalam limbah cair. Proses Fenton, yang merupakan reaksi antara besi dan hidrogen peroksida menghasilkan radikal hidroksil. Dalam kondisi asam radikal hidroksil ini sangat efisien untuk menghancurkan senyawa organik dan polutan anorganik (Mofrad M.R *et al.*, 2015). Radikal hidroksil ((•OH) termasuk oksidator yang kuat setelah Fluorin (F₂). Dengan demikian hampir semua senyawa organik yang berada dalam limbah cair dapat dioksidasi sehingga terurai menjadi senyawa lain yang tidak berbahaya (Hager, D. G., 1990).

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan seberapa besar konsentrasi oksidator dan fotooksidator dapat menurunkan persentase konsentrasi fenol. Penelitian ini diawali dengan menentukan persentase penurunan konsentrasi fenol yang diakibatkan oleh radiasi Ultra Violet (UV), kemudian fotooksidasi fenol dengan H₂O₂ dan membandingkannya dengan proses oksidasi dan fotooksidasi fenol menggunakan reagen Fenton. Metoda yang terakhir dilakukan dalam penelitian ini yaitu membandingkan proses ozonisasi fenol menggunakan bantuan radiasi UV dan tanpa UV.

II. Tinjauan Pustaka

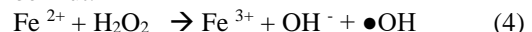
2.1. Proses Oksidasi

Teknologi proses oksidasi dalam penanganan limbah cair menggunakan satu atau kombinasi dari oksidator. Oksidator yang sering dipakai adalah ozon, hidrogen peroksida, radiasi ultra violet, titanium oksida, photo katalis, serta beberapa proses lainnya yang menghasilkan radikal hidroksil (•OH). Potensial oksidasi radikal hidroksil sebesar 2,8 V sedangkan ozon 2,07 V, sehingga radikal hidroksil mempunyai kemampuan untuk mengoksidasi lebih besar dari ozon dan sedikit lebih kecil dari fluorine (Munter R, 2001). Radikal hidroksil adalah suatu spesi yang aktif yang memiliki sifat radikal yaitu mudah sekali bereaksi dengan senyawa apa saja. Radikal ini juga sangat cepat bereaksi dengan senyawa yang bersifat organik maupun non-organik. Secara umum terdapat beberapa kemungkinan reaksi oksidasi radikal bebas dengan senyawa organik, sebagai berikut: (Wailing C *et al.*, 1971)



RH adalah senyawa organik.

Dalam proses degradasi fenol menggunakan hidrogen peroksida memerlukan katalis garam besi untuk mempercepat reaksi pembentukan radikal hidroksil sesuai dengan reaksi sebagai berikut:

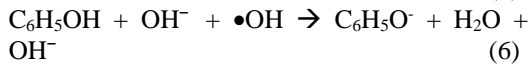


Radikal hidroksil yang dihasilkan dalam reaksi (4) akan menyerang senyawa fenol dalam limbah cair sebagai substrat sehingga membentuk senyawa baru yang toksisitasnya

relatif lebih rendah dari fenol. Reaksi Fenton juga merupakan metode yang efektif untuk degradasi fenol. Reagen Fenton terdiri dari hidrogen peroksida dan garam besi seperti besi sulfat. Dalam reaksi Fenton, H_2O_2 terurai secara katalitik oleh Fe^{2+} menjadi O_2 dan H_2O secara cepat dengan menghasilkan sejumlah besar radikal hidroksil (Zeng Z *et al*, 2013).

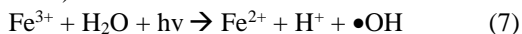
2.2. Oksidasi Fenol menggunakan Oksidator Hidrogen Peroksida dengan Radiasi Ultraviolet

Reaksi hidrogen peroksida dengan radiasi ultraviolet akan menyebabkan terbentuknya radikal hidroksil. Radikal hidroksil yang terbentuk akan mengoksidasi fenol (Kuscu Ö. S, 2014).



2.3. Oksidasi Fenol menggunakan Oksidator Besi (II) Sulfat dengan Radiasi Ultraviolet (UV)

Radiasi ultraviolet sangat berguna pada proses oksidasi fenol karena jika digabung dengan oksidator besi (II) sulfat, pembentukan radikal akan semakin cepat. Radiasi sinar UV terdiri dari spektra dengan panjang gelombang mulai dari 10 pm untuk sinar gama sampai dengan 1 km untuk gelombang radio. Namun lebih dari 99 % radiasi sinar UV yang dipancarkan mempunyai panjang gelombang antara 276-496 nm pada daerah fotokimia sehingga memungkinkan digunakannya radiasi sinar ultraviolet sebagai sumber sinar dalam proses oksidasi. Metoda ini dilakukan dengan mereaksikan ion ferri dalam air dengan bantuan radiasi UV sehingga terbentuk radikal $\bullet OH$. Reaksi ini berlangsung cepat pada suhu kamar dan pada pH antara 6-7 (Esplugas, S, *et al*, 1998).

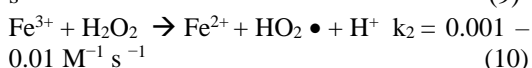
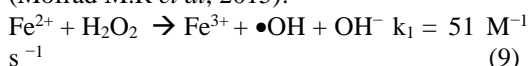


2.4. Sistem Fenton (H_2O_2 dan Fe^{2+})

Proses Fenton telah diperkenalkan oleh Fenton sejak ratusan tahun yang lalu untuk mengoksidasi asam (Belgiorno V *et al*, 2010, Solvay Interlox, Inc, 2001, Esplugas, S, *et al*, 1998):



Reaksi ini berlangsung cepat dan mengakibatkan Fe^{2+} teroksidasi menjadi Fe^{3+} dalam hitungan beberapa detik atau menit. Hidrogen peroksida didekomposisi oleh Fe^{2+} dan membentuk radikal hidroksil sesuai reaksi (Mofrad M.R *et al*, 2015):

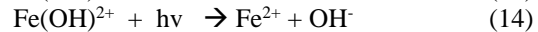
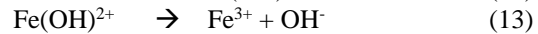
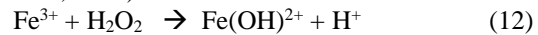


Ion ferri berfungsi sebagai katalis untuk mendekomposisi hidrogen peroksida dan

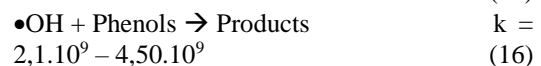
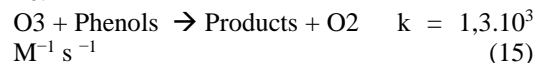
membentuk ion fero. Sehingga proses Fenton sangat efektif untuk pembentukan radikal $\bullet OH$. Reaksi Fenton ini terbukti mampu menguraikan fenol dengan mekanisme reaksi sebagai berikut : $C_6H_5OH + Fe^{2+} + \bullet OH + \bullet OH \rightarrow C_6H_5O^- + Fe^{3+} + H_2O + \bullet OH$ (11)

2.5. Sistem Fenton - Radiasi Ultraviolet

Gabungan antara reaksi Fenton dengan bantuan radiasi ultraviolet disebut dengan metode foto-fenton atau reaksi foto-fenton. Penggunaan reaksi fotofenton ini lebih efektif dan lebih disukai dibandingkan dengan metode AOP yang lain karena terbukti dapat mendegradasi komponen organik dalam waktu singkat. Reagen Fenton yang terdiri dari hidrogen peroksida (H_2O_2) dan besi (II) sulfat ($FeSO_4$) yang disinari dengan sinar ultraviolet menghasilkan reaksi sebagai berikut (Mokriani A *et al*, 1998, Munter, R *et al*, 2001, Esplugas, S *et al*, 1998):



Pada proses degradasi fenol menggunakan ozon dengan bantuan radiasi ultra violet, terdapat dua reaksi utama yang terjadi yaitu yang pertama adalah reaksi langsung ozon dengan fenol dan reaksi antara radikal hidroksil dengan fenol menghasilkan senyawa baru yang bersifat relatif ramah lingkungan. Keasaman (pH) sangat menentukan keberhasilan dalam proses penurunan konsentrasi fenol menggunakan UV dan ozon. Pada kondisi pH rendah, terjadi reaksi langsung antara molekular ozon dengan fenol adalah dominan dan hanya beberapa radikal hidroksil (yang dihasilkan oleh UV) saja yang membantu proses foto-oksidasi. Sedangkan pada kondisi netral atau pH sedikit lebih tinggi dari 7 atau suasana basa, kontribusi terbesar pada proses penurunan kadar fenol adalah radikal bebas hidroksil. Radikal bebas hidroksil dapat dihasilkan lebih banyak pada kondisi basa (Zeng Z *et al*, 2013). Jumlah radikal ini sangat menentukan efektivitas penurunan konsentrasi fenol. Reaksi degradasi fenol menggunakan ozon seperti tersebut dalam persamaan 15 dan 16.



III. Metode Penelitian

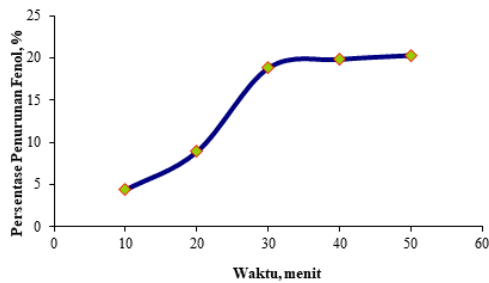
Pada penelitian ini, dilakukan proses penurunan konsentrasi fenol secara oksidasi. Oksidator yang digunakan adalah besi (II) sulfat ($FeSO_4$), hidrogen peroksida (H_2O_2) dan ozon. Fenol dalam limbah cair dialiri ozon dari ozon generator dengan laju alir 0,25 gr/h. Penentuan kadar fenol mula-mula dan setelah terjadi

oksidasi – fotooksidasi diukur menggunakan metoda analisa spektrofotometri pada panjang gelombang maksimum 460 nm sesuai dengan SNI 06-6989.21-2004. Variabel yang berubah dalam penelitian ini adalah konsentrasi larutan fenton dengan komposisi hidrogen peroksida (H_2O_2) dengan kisaran 25 mg/L sampai dengan 150 mg/L, dan konsentrasi besi (II) sulfat kisarannya 5 mg/L sampai dengan 25 mg/L. Adapun waktu yang dipergunakan untuk proses oksidasi antara 10 menit hingga 50 menit, dan samplingnya dilakukan tiap 10 menit. Sedangkan konsentrasi awal fenol 40 mg/L dan ketinggian lampu UV sejarak 20 cm dari larutan dibuat selalu tetap.

IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

4.1. Proses Oksidasi Fenol menggunakan Radiasi UV

Pengaruh waktu oksidasi terhadap penurunan fenol dapat dilihat pada Gambar-1.



Gambar-1. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Oksidasi menggunakan Radiasi UV

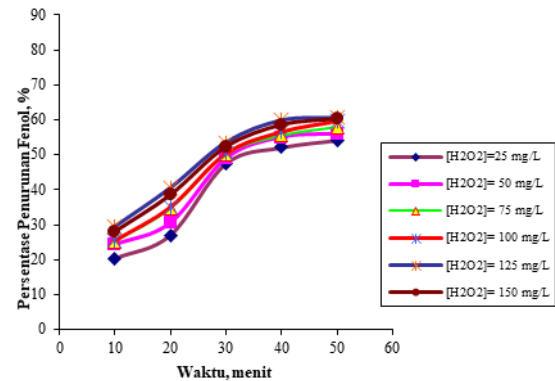
Berdasarkan pengamatan dalam Gambar-1, persentase penurunan kadar fenol tidak meningkat drastis setelah menit ke 30. Setelah menit ke 50, radiasi UV mampu menurunkan kadar fenol hingga 20,34 %. Kemampuan radiasi UV belum memadai untuk menurunkan polutan fenol dalam limbah cair. Radiasi UV mampu mendegradasi fenol dengan cara memutus ikatan -OH pada senyawa fenol sehingga ion H^+ akan lepas dan terbentuk senyawa alkil oksida atau ion fenolat ($C_6H_5O^-$) (Kuscu Ö. S, 2014). Toksisitas ion fenolat ini lebih rendah dari senyawa fenol.

4.2. Proses Fotooksidasi Fenol dengan Oksidator H_2O_2 menggunakan radiasi UV

Hasil pengukuran penurunan konsentrasi fenol setelah dioksidasi menggunakan H_2O_2 dan sinar UV ditunjukkan pada Gambar-2. Pada konsentrasi awal fenol 40 mg/l sebanyak 500 mL, persentase penurunan kadar fenol tertinggi dapat tercapai pada penggunaan oksidator H_2O_2 125 mg/L menggunakan radiasi UV setelah menit ke 50 yaitu 60,59 %. Penurunan konsentrasi fenol ini lebih tinggi dari pada penurunan kadar fenol yang dioksidasi hanya

menggunakan radiasi UV saja tanpa oksidator hidrogen peroksida, Peran oksidator hidrogen peroksida sangat efektif untuk menurunkan konsentrasi fenol dalam limbah.

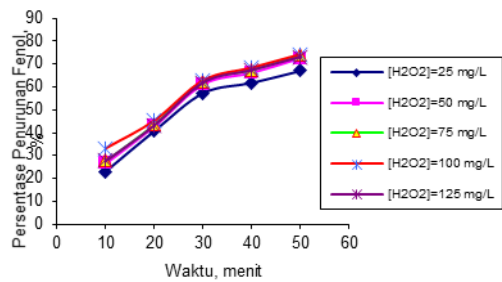
Pada konsentrasi awal fenol 40 mg/l sebanyak 500 mL, persentase penurunan kadar fenol tertinggi dapat tercapai pada penggunaan oksidator H_2O_2 125 mg/L menggunakan radiasi UV setelah menit ke 50 yaitu 60,59 %. Penurunan konsentrasi fenol ini lebih tinggi dari pada penurunan kadar fenol yang dioksidasi hanya menggunakan radiasi UV saja tanpa oksidator hidrogen peroksida, Peran oksidator hidrogen peroksida sangat efektif untuk menurunkan konsentrasi fenol dalam limbah.



Gambar-2. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Fotooksidasi menggunakan H_2O_2 dan Radiasi UV

4.3. Proses Oksidasi Fenol menggunakan Reagen Fenton tanpa radiasi UV dan menggunakan radiasi UV

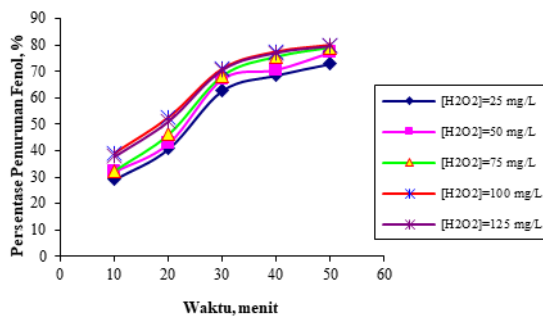
Hasil penelitian proses oksidasi fenol menggunakan reagen fenton seperti pada Gambar-3.



Gambar-3. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Oksidasi menggunakan reagen Fenton tanpa Radiasi UV

Oksidasi fenol menggunakan reagen fenton dengan komposisi H_2O_2 100 mgr/mL dan $FeSO_4$ 15 mgr/L tanpa radiasi sinar UV, hanya mampu menurunkan kadar fenol hingga 74,26 %. Sedangkan untuk proses fotooksidasi fenol menggunakan fenton menggunakan radiasi UV dapat ditunjukkan seperti pada Gambar-4. Berdasarkan hasil analisa pada Gambar-4,

proses fotooksidasi fenol yang dengan reagen Fenton (campuran H₂O₂ 100 mgr/mL dengan FeSO₄ 15 mgr/L) menggunakan radiasi UV dapat menurunkan kadar fenol hingga 79,99 %. Persentase penurunan fenol ini lebih tinggi dari pada hasil oksidasi fenol dengan reagen Fenton tanpa UV. Perbedaan ini disebabkan karena adanya radiasi UV yang dapat memperbanyak pembentukan radikal hidroksil (•OH) sehingga jumlah radikal hidroksil yang dihasilkan akan lebih banyak sesuai dengan reaksi (5) yang tertulis dalam sub-bab 2.2. Reagen Fenton juga menghasilkan radikal hidroksil seperti pada reaksi nomor (4) yang tertulis dalam sub-bab 2.1. Semakin banyak radikal hidroksil yang terbentuk maka semakin banyak fenol dalam larutan yang dapat didegradasi sesuai reaksi nomor (6) dalam sub-bab 2.2.

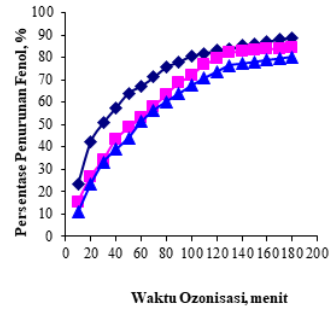


Gambar-4. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Fotooksidasi menggunakan reagen Fenton dan Radiasi UV

Senyawa radikal hidroksil (•OH) akan menyerang senyawa fenol dalam limbah cair sebagai substrat sehingga membentuk senyawa baru yaitu ion fenolat yang toksisitasnya relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan toksisitas fenol (Chowdhury, P 2017).

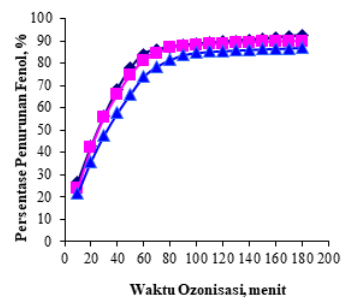
4.4. Proses Ozonisasi Fenol tanpa radiasi UV dan menggunakan radiasi UV

Ozon merupakan salah satu oksidator yang cukup kuat. Dalam penelitian ini ozon dibuat dengan mengalirkan oksigen ke dalam Ozon generator (RSO-9805;0,25gr/h) kemudian gas yang keluar dari generator ini adalah ozon yang langsung dialirkan ke dalam larutan limbah yang mengandung fenol. Setelah ozon mengalir selama 10 menit, tanpa diradiasi dengan UV, dilakukan sampling untuk diukur konsentrasi fenol setelah ozonisasi. Hasil penelitian penurunan konsentrasi fenol setelah dioksidasi dengan ozon tanpa radiasi UV dapat digambarkan seperti pada Gambar-5.



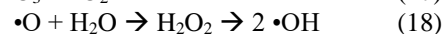
Gambar-5. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Oksidasi menggunakan Ozon tanpa Radiasi UV

Sedangkan Gambar-6 adalah hasil perhitungan persentase penurunan konsentrasi fenol yang dioksidasi dengan ozon dan dibantu radiasi UV.

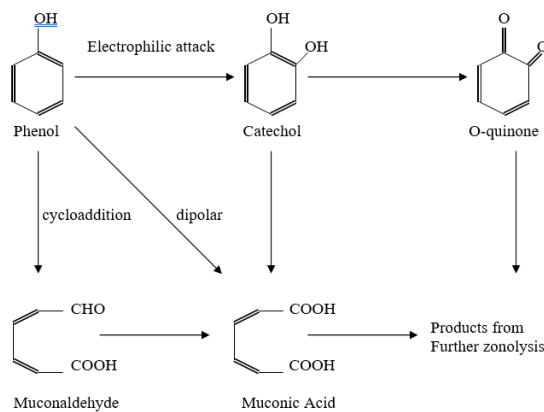


Gambar-6. Persentase Penurunan Konsentrasi Fenol akibat Oksidasi menggunakan Ozon dan menggunakan Radiasi UV

Hasil penurunan konsentrasi fenol dengan menggunakan ozon tanpa radiasi UV dapat mencapai hingga 88,61%, untuk konsentrasi awal fenol 40 mg/L. Sedangkan penurunan konsentrasi fenol akibat oksidasi ozon yang disinari dengan UV, dapat menurunkan hingga 92,48 %. Jika dibandingkan antara cara oksidasi menggunakan ozon saja maupun ozon yang dibantu sinar ultra violet, menunjukkan bahwa sinar ultra violet dalam penelitian ini memang berperan dalam memperbanyak jumlah radikal hidroksil bebasnya. Penurunan konsentrasi fenol ini diprediksi karena adanya radikal hidroksil (•OH) yang terbentuk dari ozon sangat besar sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut (Gottschalk C *et al*, 2000):

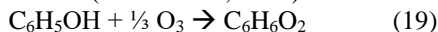


Radikal hidroksil (•OH) yang dihasilkan ini akan mengoksidasi fenol sehingga terbentuk senyawa baru yaitu *Catechol* dan *O-quinone* seperti terlihat dalam Gambar-7.



Gambar-7. Diagram Reaksi Ozonisasi Fenol (Gottschalk C *et al*, 2000)

Senyawa baru ini memiliki toksisitas yang lebih rendah dari senyawa fenol. Akibat ozonisasi, fenol dapat terdegradasi menjadi senyawa lain yaitu golongan *hydroquinone*, yang tidak bersifat toksik sesuai dengan reaksi sebagai berikut (Ismail A. A, 2003):



V. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa besarnya persentase penurunan konsentrasi fenol akibat oksidasi dan fotooksidasi pada menit ke 50, jika fenol hanya diradiasi UV saja tanpa penambahan oksidator kimia, persentase penurunan konsentrasinya hanya 20,34 %. Tetapi apabila sudah ditambah dengan oksidator kimia hidrogen peroksida (H_2O_2 75,75% w/w) dan diradiasi UV meningkat persentase penurunannya menjadi 60,59 %. Persentase penurunan konsentrasi fenol akan semakin tinggi jika oksidator yang digunakan adalah reagen Fenton dan sambil diradiasi UV dapat mencapai 79,99 %. Apabila tanpa radiasi UV dengan menggunakan oksidator reagen Fenton yang sama, persentase penurunan konsentrasi fenol hanya 74,26 %. Proses degradasi fenol dalam limbah ini akan semakin berhasil apabila menggunakan oksidator ozon (ozonisasi) dengan bantuan radiasi UV, dapat mencapai persentase penurunan konsentrasi fenol hingga 92,48 %. Persentase ini adalah yang terbesar dari seluruh proses degradasi fenol dalam limbah cair yang dilakukan dalam penelitian ini. Dengan demikian jika dibandingkan antara proses oksidasi dan fotooksidasi terhadap fenol dalam limbah cair maka fotooksidasi mampu menurunkan konsentrasi fenol dengan persentase terbesar. Radiasi UV sangat membantu proses oksidasi fenol menggunakan oksidator kimia untuk berubah menjadi senyawa lain yang memiliki toksisitas relative lebih rendah dari pada fenol.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah mendanai penelitian ini dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat yang telah memfasilitasi penelitian ini hingga tuntas.

Daftar Pustaka

1. Akan JC., Abdulrahman FI., Sodipo OA., Ochanya AE., Askira YK. (2010). Heavy metals in sediments from River Ngada, Maiduguri Metropolis, Borno State, Nigeria. *J Environ Chem Ecotox*; 2(9): 131–140.
2. Azizah A.N., I Nyoman Widiassa. (2018). *Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Refinery Wastewater Treatment Contains High Phenol Concentration*, MATEC Web of Conferences 156, 03012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815603012>.
3. Azizullah, A., Khattak, M.N.K., Ritcher,P., Hader, D-P. (2011). Water pollution in Pakistan and its impact on public health: A review. *Environ Intern*; 37: 479–497.
4. Badan Standar Nasional. (2004). SNI 06-6989.21-2004 tentang *Air dan air limbah – Bagian 21: Cara Uji Kadar Fenol secara Spektrofotometri*.
5. Belgiorno V., Nadeo V., Rizzo L., (2010). *Water, Waste Water and Soil Treatment by Advanced Oxidation Processes (AOPs)*. SEED, Italy. Web: www.seed.unisa.it.
6. Chowdhury, P., Nag, S., Ray, A. K. (2017), “Degradation of Phenolic Compounds Through UV and Visible-Light-Driven Photocatalysis: Technical and Economic Aspects”, *Intech open science open minds*, London. <http://dx.doi.org/10.5772/66134>.
7. Esplugas, S., Chamarro, E., Mokrini, A. (1998). *Degradation of Phenol in Aqueous Solutions using Fe³⁺ and UV Radiation*. Departement d’Enginyeria Quimica i Metal·lúrgia, Universitat de Barcelona. <http://photon.qui.ub.es/research/Esplugas-ecce-2.doc>.
8. Gami, A. A., Shukor, M., Khalil, K. A., Dahalan, F. A., Khalid, A., & Ahmad, S. A. (2014). Phenol and its toxicity. *Journal of Environmental Microbiology and Toxicology*, 2(1), 11–23. <https://doi.org/10.54987/jemat.v2i1.89>.
9. Gottschalk, C., Libra. J.A. & Saupe, A. *Ozonation of Water and Waste Water*. Wiley-VCH, 2000.
10. Hager, D. G., 1990, *Innouv. Hazard. Waste Treat. Technol. Ser.*, 2, 143 – 153.
11. Imelda, H S., Irwan., Nelly, W. (2020). Fotodegradasi Fenol dalam Lempung Terpillar TiO₂. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*. Journal

homepage:<http://jurnal.untan.ac.id/index.php/IJoPAC>.

12. Ismail A, A., Ibrahim I, A., Mohamed R, M. (2003) “*Degradation of phenol by photocatalytic oxidation*”; Central Metallurgical R&D Institute, CMRDI, P.O.Box 87 Helwan, Cairo, Egypt.
13. Kuscü Ö. S., Kaplan Y. (2014). *Asian Journal of Chemistry*. Vol. 26, No. 2, 6997-7005.
14. Lin, T., Lee, S., Lai, C., Lin, S. (2006). Phenol burn. *Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries* 32(4):517-21.
15. Mofrad M.R., Nezhad M.E., Akbari H., Atharizade M., Miranzadeh M.B. (2015). *J.Chem.Soc.Pak.*, Vol. 37, No. 02.
16. Munter, R. (2001). *Advanced Oxidation Processes – Current Status and Prospects*, In Proc. Estonian Acad. Sci. Chem, Estonia. 50, 2, 59-80.
17. Mokrini A., Oussi D., Chamarro E., Esplugas S. (1998). “*Photooxidation of Phenol in Aqueous Solution*” (Cooperative Research Report) Departamento de Ingenieria Quimica, Universidad de Barcelona.
<http://photon.qui.ub.es/research/phenol.html>.
18. Opoku E E O., Boachie M K. (2020) The environmental impact of industrialization and foreign direct investment Energy Policy 137 111178.
19. Raouf MEA, et al. (2019). *International Journal of Environment & Agricultural Science*, 3:1.
20. Solvay Interlox, Inc, (2001), “*Oxidation of Aromatics with Hydrogen Peroxide*”, Houston, Texas 77098-3099.
21. Wailing C., Kato S. (1971) “The oxidation of alcohols by Fenton’s reagent: the effect of copper ion” *J. Am. Chem. Soc.* 93, pp. 4275-4281.
22. Zeng Z., Zou H., Li X., Arowo M., Sun B., Chen J., Chu G., Shao L. (2013). Degradation of Phenol by Ozone in the Presence of Fenton Reagent in a Rotating Packed Bed. *Chemical Engineering Journal*. 229; 404–411.