

PENGARUH KONSENTRASI TiO₂ DAN KONSENTRASI LIMBAH PADA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH PEWARNA SINTETIK PROCION RED DENGAN METODE UV/FENTON/TiO₂

Tuty Emilia Agustina^{*}, Ahmad Bustomi, dan Jantan Manalaoon

^{*}Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jl. Palembang Prabumulih Km 32 Ogan Ilir Sumatera Selatan

Abstrak

Saat ini industri tekstil di Indonesia semakin berkembang, termasuk di provinsi Sumatera Selatan yang kaya dengan berbagai jenis kain tradisional. Procion Red adalah salah satu pewarna sintetik yang paling sering digunakan pada home industry kain tradisional khas Palembang. Namun, air limbah yang dihasilkan dari industri ini mengandung zat pewarna sintetik yang berbahaya bagi lingkungan. Untuk itu, perlu dilakukan pengolahan yang efektif untuk menanggulangnya. Salah satu cara untuk mengolah air limbah tersebut adalah melalui proses yang dikenal dengan Advanced Oxidation Processes (AOPs), diantaranya dengan metode UV-Fenton-Katalitik. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi optimum proses pengolahan air limbah Procion Red dengan metode UV-Fenton-Katalitik, maka dilakukan penelitian mengenai pengaruh konsentrasi Procion Red dan konsentrasi katalis. Katalis yang digunakan adalah TiO₂. Pada penelitian ini digunakan konsentrasi air limbah Procion Red 150 -300 ppm, konsentrasi katalis TiO₂ 0,05-0,4% (w/v), pH 3, kecepatan pengadukan 500 rpm dan proses pengolahan selama 5 menit. Dari hasil penelitian, pada penggunaan katalis TiO₂ dengan konsentrasi 0,4% didapatkan penurunan warna dan COD sebesar 100% dan 91,4%, berturut-turut. Sedangkan penggunaan konsentrasi limbah Procion Red sebesar 150-300 ppm tidak berpengaruh signifikan pada penurunan warna dan COD.

Kata kunci : AOPs, UV/Fenton/TiO₂, air limbah industri tekstil, procion red

Abstract

Nowadays the textile industry in Indonesia is growing, including in South Sumatra province which is rich in various kinds of traditional fabrics. Procion Red is one of the most synthetic dyes which often used in Palembang traditional cloth home industry. However, the wastewater generated from these industries contain synthetic dyes that are harmful to the environment. Hence, it is necessary to find an effective treatment to overcome the problem. One way to treat wastewater is by commonly known as Advanced Oxidation Processes (AOPs), such as by UV-Fenton-Catalytic method. In order to determine the optimum condition of the process, the research on the effect of Procion Red concentration and catalyst concentration was studied. TiO₂ was used as the catalyst. In this experiment, the concentrations of Procion Red were varied between 150 -300 ppm, the concentrations of TiO₂ catalyst were varied from 0.05 to 0.4% (w/v), pH 3, and the stirring speed of 500 rpm, for the reaction time of 5 minutes. From the results, by using TiO₂ catalyst concentration of 0.4%, the color and COD degradation of 100% and 91.4% were obtained, respectively. While by using Procion Red concentration of 150-300 ppm, no significant effect on the degradation of color and COD reduction were found.

Keywords : AOPs, UV/Fenton/TiO₂, textile industry wastewater, Procion Red

1. PENDAHULUAN

Salah satu bidang ekonomi non migas yang sedang berkembang di Indonesia adalah Industri tekstil. Hal ini dibuktikan dengan nilai ekspor tekstil dari tahun ke tahun yang menunjukkan peningkatan. Dari catatan Kementerian Perindustrian RI dan Enciety Business and Consult tahun 2014 saja, total nilai ekspor tekstil Indonesia pada 2012 mencapai USD 12,4 miliar. Semakin meningkatnya jumlah ekspor tekstil maka barang-barang pembantu dalam produksi tekstil juga mengalami peningkatan seperti zat warna.

Kebanyakan industri tekstil tersebut menggunakan pewarna sintetis seperti procion, erionyl dan auramin dengan beberapa alasan, seperti lebih murah dan lebih tahan lama jika dibandingkan pewarna alami, lebih mudah diperoleh dalam berbagai variasi warna, dan mudah dalam penggunaannya. Akan tetapi limbah yang dihasilkan memberikan warna yang nyata dan sulit terdegradasi di lingkungan (*non-biodegradable*). Jika kadarnya berlebihan akan mengganggu ekosistem lingkungan. Air limbah yang berasal dari industri tekstil jika langsung dibuang ke badan perairan akan mengurangi jumlah oksigen terlarut yang diperlukan oleh makhluk hidup di perairan karena oksigen terlarut tersebut justru digunakan untuk mengoksidasi berbagai polutan termasuk senyawa organik seperti zat pewarna sintetik.

Beberapa penelitian tentang pengolahan limbah industri tekstil telah banyak dilakukan, misalnya dengan cara kimia dengan metode kagulasi, dengan cara fisika misalnya melalui sedimentasi, metode adsorpsi dan lain sebagainya (Manurung, 2004). Namun pengolahan limbah dengan menggunakan metode adsorpsi masih menghasilkan limbah berupa adsorben dan metode ini hanya memindahkan limbah saja bukan mendegradasi limbah menjadi senyawa yang tidak berbahaya. Teknologi *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) merupakan teknologi alternatif pengolahan limbah yang cukup ekonomis karena mampu menghemat tempat dan energi, biaya investasi murah, aman, sederhana, proses pengolahan cepat dan efektif. Kelebihan metode ini dapat mendegradasi atau menguraikan senyawa-senyawa berbahaya yang bersifat *non-biodegradable* dalam limbah melalui oksidasi (Dwiasi, 2014).

Penelitian tentang sistem AOPs dengan berbagai kombinasi telah banyak dilakukan seperti Penelitian yang dilakukan oleh Mermaliandi dan Yourdan (2015), mengenai pengolahan air limbah pewarna sintetis dengan

menggunakan foto-fenton (UV dan Fenton). Pada penelitian tersebut digunakan pewarna sintetis Procion Red pada konsentrasi 150-300 mg/L, kecepatan pengadukan 500 rpm, rasio molar Fenton 1:20-1:80, pH 3, dan waktu reaksi selama 0 sampai 20 menit. Untuk semua rasio molar yang digunakan, penurunan warna sebesar 100% dicapai dalam waktu 10 menit. Dalam waktu yang sama, penurunan COD maksimum sebesar 95,29% diperoleh dengan penggunaan konsentrasi limbah pewarna sintesis 150 ppm dan rasio molar 1: 80.

Pada penelitian ini akan diteliti pengolahan limbah zat warna sintesis *Procion red* dengan proses foto-katalitik yang merupakan pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan oleh Mermaliandi dan Yourdan (2015). Sehingga diharapkan akan didapat kondisi yang optimum dalam pengolahan limbah pewarna *Procion red* dengan menggunakan metode Foto-Fenton-Katalitik.

Zat Warna

Warna merupakan spektrum tertentu yang terdapat didalam suatu cahaya sempurna berwarna putih. Identitas suatu warna ditentukan oleh panjang gelombang cahaya tersebut. Sebagai contoh warna biru yang memiliki panjang gelombang 460 nm. Radiasi yang tersebar secara merata akan tampak sebagai cahaya putih dan yang akan terurai dalam warna-warna spectrum bias dengan adanya penyaringan oleh prisma yang dipersepsikan sebagai sinar foton (Koko, 2011).

Molekul zat warna merupakan gabungan dari zat organik tidak jenuh dengan kromofor sebagai pembawa warna dan auksokrom sebagai pengikat warna dengan serat. Zat organik tak jenuh umumnya berasal dari senyawa aromatik dan derivatifnya (benzen, toluen, xilen, naftalena, antrasena.), Fenol dan derivatifnya (fenol, orto/meta/para kresol), senyawa mengandung nitrogen seperti piridin, kinolin, korbazolum. Gugus kromofor adalah gugus yang menyebabkan molekul menjadi berwarna. Pada tabel 2.1. dapat dilihat beberapa nama gugus kromofor dan memberi daya ikat terhadap serat yang diwarnainya. Gugus auksokrom terdiri dari dua golongan, yaitu:

Golongan kation : $-NH_2$, NHR, $-NR_2$ seperti $-NR_2Cl$.

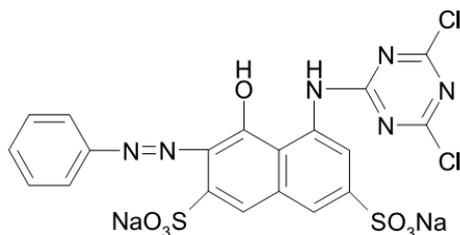
Golongan anion : $-SO_3H$, $-OH$, $-COOH$ seperti $-O$, $-SO_3$ dan lain-lain

Zat warna dapat digolongkan menurut sumber diperolehnya yaitu zat warna alam dan zat warna sintetik. Van Croft menggolongkan

zat warna berdasarkan pemakaiannya, misalnya zat warna yang langsung dapat mewarnai serat disebutnya sebagai zat warna substantif dan zat warna yang memerlukan zat-zat pembantu supaya dapat mewarnai serat disebut zat reaktif.

Kemudian Henneck membagi zat warna menjadi dua bagian menurut warna yang ditimbulkannya, yakni zat warna monogenetik apabila memberikan hanya satu warna dan zat warna poligenatik apabila dapat memberikan beberapa warna.

Zat warna reaktif pertama kali diproduksi tahun 1956. Zat warna jenis ini pada aplikasinya akan sulit dihilangkan karena adanya ikatan kovalen yang kuat antara atom karbon dari zat warna dengan atom O, N, atau S dari gugus hidroksi, amino atau thiol dari polimer. Keuntungan zat warna reaktif adalah spektra absorpsinya runcing dan jelas,



Gambar 1. Procion red MX-5B

Zat Pewarna Sintetis Procion Red

Zat warna reaktif yang sering digunakan pada industri tekstil antara lain Procion, Cibracon, Drimaren, dan Lavafix, yang dapat mengadakan reaksi substitusi dengan serat dan membentuk ikatan ester, dan zat warna Remazol, Remalan, dan Primazin, yang dapat mengadakan yang dapat mengadakan reaksi adisi dengan serat dan membentuk ikatan eter. Zat warna monoazo *procion red* MX-5B atau zat warna reaktif red 2 ($C_{19}H_{10}Cl_2N_6Na_2O_7S_2$) dengan berat molekul 615,3 gr mol⁻¹.

Advanced Oxidation Processes (AOPs)

Advanced Oxidation Processes secara khas adalah proses pembentukan dan penggunaan radikal bebas hidroksil ($\bullet OH$) sebagai oksidator kuat untuk mengurai senyawa-senyawa yang tidak dapat dioksidasi oleh oksidator konvensional seperti oksigen, ozon dan klorin. Kekuatan oksidasi relatif dari radikal hidroksil dengan mengesampingkan fluorin, radikal hidroksil merupakan pengoksidator yang paling reaktif. Radikal hidroksil bereaksi dengan senyawa yang terlarut, menginisiasi

strukturnya relatif sederhana, dan warnanya lebih terang (Hunger, 2003).

Tabel 1. Nama dan Struktur Kimia Kromofor

Nama Gugus	Struktur Kimia
Nitroso	NO
Nitro	NO ₂
Grup Azo	-N=N-
Grup Etilen	-C=C-
Grup Karbonil	-C=O
Grup Karbon – Nitrogen	-C=NH ; CH=N-
Grup Karbon Sulfur	-C=S ; -C-S-S-C-

Sumber : Manurung, 2004

reaksi beruntun sampai senyawa tersebut terurai secara sempurna.

Fenton

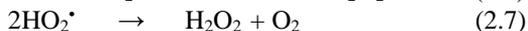
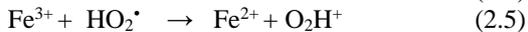
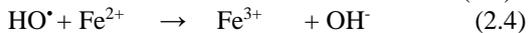
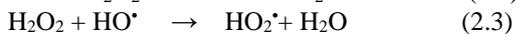
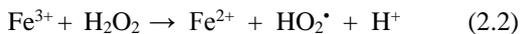
Hidrogen peroksida merupakan senyawa yang aman, efisien dan mudah digunakan untuk menangani reaktan yang banyak digunakan pada pencegahan kontaminasi. Namun, karena hidrogen peroksida itu sendiri bukanlah oksidan yang sangat baik untuk banyak polutan organik, maka harus dikombinasikan dengan bahan lain, seperti besi sulfat, ozon atau cahaya tampak, contohnya sinar UV untuk menghasilkan radikal hidroksil.

Proses Fenton didasarkan pada pembentukan radikal hidroksil oleh dekomposisi hidrogen peroksida saat bereaksi dengan ion besi (Fe^{2+} atau Fe^{3+}) yang bertindak sebagai katalis homogen pada pH asam (2-4) dan kondisi sekitar, sesuai dengan reaksi umum dibawah ini (2.1). Proses Fenton telah digunakan lebih dari satu abad dan digunakan untuk mendegradasi polutan organik yang ada dalam air limbah, dalam keadaan gelap dan waktu reaksi yang relatif singkat. Target utama polutan organik dari proses Fenton adalah kelarutan air, nukleofilik dan zat aromatik.



Pembentukan ion Fe^{3+} dapat dikurangi dengan cara penambahan H_2O_2 secara berlebih untuk membentuk lagi ion besi dan radikal lainnya sesuai dengan persamaan reaksi (2.1)-(2.7). Proses kedua ini disebut *like-Fenton*, itu lebih lambat dari reaksi Fenton dan memungkinkan regenerasi ion Fe^{2+} secara efektif dalam mekanisme siklik. Walaupun besi ditambahkan dalam jumlah kecil, ia

bertindak sebagai katalis sementara hidrogen peroksida terus membentuk radikal hidroksil.



Baik $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ dan $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$ merupakan reagen yang dapat mengdegradasi polutan organik. Bahan awal sebagian ditransformasikan ke beberapa produk intermedit, yang umumnya muncul untuk melawan reaksi oksidasi lebih lanjut (Safarzadeh-Amirietal *et al*, 1996).

Dibandingkan dengan AOPs lain, proses Fenton menyajikan beberapa keuntungan. Tidak ada energi masukan yang diperlukan untuk mengaktifkan hidrogen peroksida karena reaksi berlangsung pada tekanan atmosfer dan suhu kamar.

Foto-katalisis

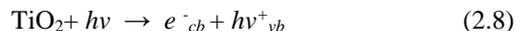
Fotokatalisis merupakan suatu proses reaksi kimia yang dibantu oleh Radiasi sinar UV ($\lambda < 400\text{nm}$) dan katalis semikonduktor seperti TiO_2 (C.M. So *et al*, 2002). Katalis merupakan suatu substansi yang dapat mempercepat laju reaksi untuk mencapai keadaan kesetimbangan jika ditambahkan dalam sistem reaksi kimia.

Katalis yang digunakan dalam suatu sistem reaksi fotokimia disebut fotokatalis yang mana memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi foton. Adanya proses adsorpsi energi foton ini akan mengaktifkan proses katalisis sehingga substansi radikal hidroksil cepat terbentuk dan akan mendegradasi polutan organik menjadi produk akhir yang lebih ramah lingkungan (Hoffmann *et al*, 1995). Reaksi oksidasi fotokatalisis pada Zat warna akan menghasilkan gas CO_2 dan ion mineral (Tan *et al*, 1999). Fotokatalisis bisa digunakan dan diterapkan dengan efektif untuk mengolah polutan dalam air ataupun air limbah seperti limbah tekstil.

Titanium Dioksida (TiO_2)

Titanium Dioksida (TiO_2) sering digunakan pada proses fotokatalisis karena katalis TiO_2 bersifat semikonduktor yang baik. Pada reaksi fotokatalitik, semikonduktor dapat berperan sebagai pengaktivasi dan katalis. Reaksi redoks cahaya dikarenakan pita valensi yang penuh berisi elektron dan pita konduksi yang kosong, dengan energi celah diantara kedua pita tidak terlalu besar. Ketika

sebuah foton dengan energi $h\nu$ yang sama atau lebih besar dari energi celah pitanya, E_g , maka elektron pada pita valensi akan memiliki energi yang cukup besar untuk dapat berpindah atau tereksitasi ke pita konduksi dan meninggalkan lubang positif ($h\nu^+$) pada pita valensi.



Lubang pada pita valensi jika beraksi dengan H_2O akan menghasilkan radikal hidroksil.



Reaksi ini merupakan salah satu jenis teknik oksidasi lanjutan dan merupakan awal dari reaksi fotokatalitik selanjutnya. (Deng and Zhao, 2015). Sedangkan pada pita konduksi akan mengalami reaksi (2.10)



Titanium Dioksida merupakan salah satu katalis yang sering digunakan pada proses fotokatalisis karena TiO_2 bersifat ramah lingkungan, harga TiO_2 tidak terlalu mahal dan mudah untuk didapatkan, selain itu TiO_2 juga bisa digunakan kembali (*reuse*).

2. METODOLOGI

Pada penelitian ini digunakan konsentrasi *Procion red* 150-300 ppm, konsentrasi katalis TiO_2 0,05-0,4% (w/v) dan reagen fenton dengan perbandingan molar $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan H_2O_2 1:80, menggunakan konsentrasi $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ sebesar 4 mM.

Larutan *Procion red* dibuat dengan konsentrasi 150 ppm kemudian diukur COD dan nilai absorbansinya. Tambahkan katalis TiO_2 dengan konsentrasi 0,05 (%w/v). Masukkan larutan yang telah dibuat ke dalam reactor UV. Atur kecepatan alat pengaduk 500 rpm. Masukkan reagen Fenton dengan rasio molar 1:80. Hidupkan Lampu UV. Ambil sampel setiap 5 menit untuk diukur nilai COD dan absorbansinya. Ulangi prosedur dengan variasi konsentrasi TiO_2 0,1; 0,2; dan 0,4 (%w/v) dan dengan variasi konsentrasi *Procion red* 200, 250 dan 300 ppm.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 menampilkan pengaruh penambahan katalis TiO_2 terhadap degradasi warna pada pengolahan limbah *Procion red* dengan metode UV-Fenton- TiO_2 . Pada grafik terlihat bahwa semakin besar konsentrasi TiO_2 semakin tinggi degradasi warna. Hal ini dapat

dilihat pada konsentrasi TiO_2 0,4% degradasi warna mencapai 100% pada konsentrasi limbah 300 ppm.

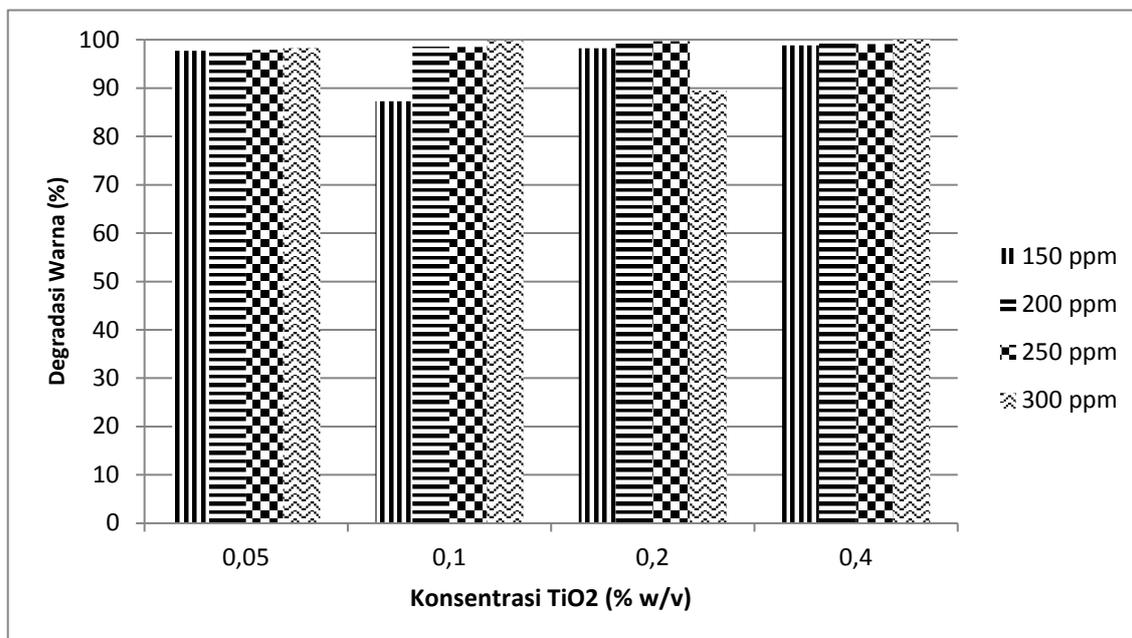
Degradasi warna yang tinggi terjadi karena molekul *procion red* telah teroksidasi. Pada metode UV-Fenton- TiO_2 , ketika sinar UV mengenai TiO_2 akan terbentuk radikal hidroksil (OH^*). Semakin banyak TiO_2 yang terkena sinar UV maka semakin banyak radikal OH^* yang terbentuk yang akan mengoksidasi molekul *Procion red* menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga tidak dapat memberikan warna.

Pada Gambar 3 dapat dilihat persen penurunan COD dimana semakin besar konsentrasi katalis TiO_2 maka semakin besar persen penurunan COD. Dapat dilihat pada grafik nilai maksimum persen penurunan COD yaitu 91,4% terjadi pada konsentrasi katalis TiO_2 0,4% dan konsentrasi limbah *Procion red* 250 ppm. Pada konsentrasi TiO_2 0,4% daerah permukaan katalis yang menyerap sinar UV lebih besar dibandingkan konsentrasi TiO_2 0,05%, 0,1% dan 0,2% maka radikal hidroksil OH^* yang terbentuk lebih banyak.

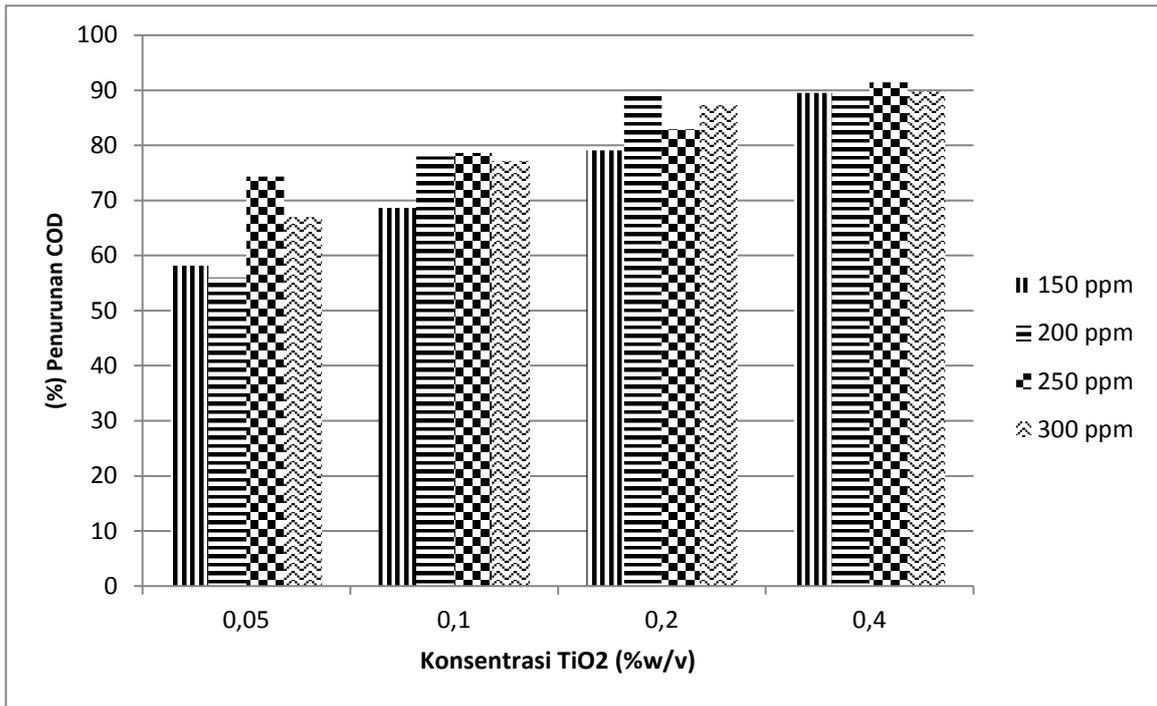
Banyaknya radikal OH^* yang terbentuk akan mengoksidasi molekul *Procion red* lebih banyak dan menjadi senyawa yang lebih sederhana dan kemudian menjadi CO_2 dan H_2O (Yourdan dan Febri, 2014). Semakin banyak molekul *Procion red* yang teroksidasi akan menurunkan nilai COD.

Gambar 4 menunjukkan pengaruh konsentrasi limbah *Procion red* terhadap degradasi warna pada pengolahan limbah *Procion red* dengan metode UV-Fenton- TiO_2 . Dapat dilihat degradasi warna pada konsentrasi limbah *Procion red* 150 ppm mencapai 98%, konsentrasi limbah *Procion red* 200 ppm dan 250 ppm mencapai 99% dan kondisi optimum degradasi warna terjadi pada konsentrasi limbah *Procion red* 300 ppm mencapai 100%, tapi secara keseluruhan degradasi warna terjadi pada seluruh konsentrasi limbah *Procion red* sehingga menghasilkan warna yang jernih. Oleh sebab itu dalam penelitian ini perbedaan konsentrasi limbah *Procion red* dari 150 ppm sampai 300 ppm tidak terlalu berpengaruh terhadap degradasi warna.

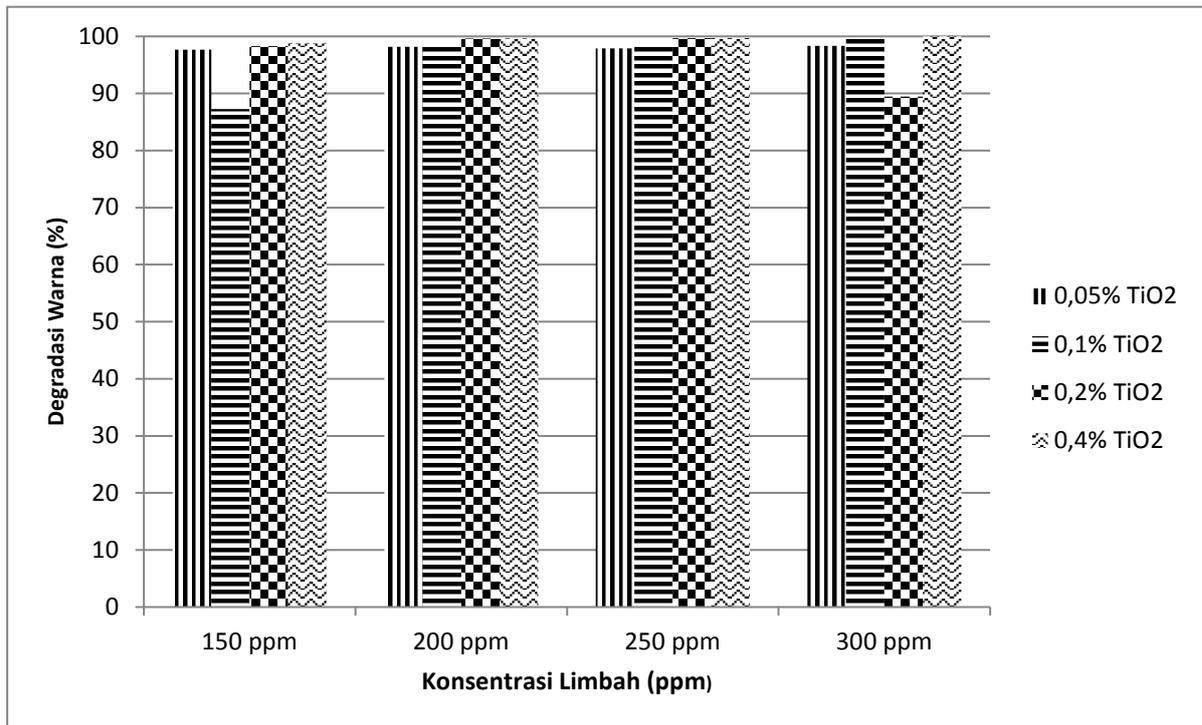
Gambar 5 menunjukkan pengaruh konsentrasi limbah *Procion red* terhadap persen penurunan COD pada semua konsentrasi Katalis TiO_2 . Dari grafik terlihat bahwa persen penurunan COD tertinggi pada konsentrasi limbah *Procion red* 150 ppm mencapai 89,5%, pada konsentrasi limbah *Procion red* 200 ppm mencapai 89%, pada konsentrasi limbah *Procion red* 250 ppm mencapai sebesar 91,4% dan pada konsentrasi limbah *Procion red* 300 ppm mencapai 89,8%. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa pada *range* konsentrasi limbah *Procion red* 150 ppm sampai 300 ppm tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada penurunan COD.



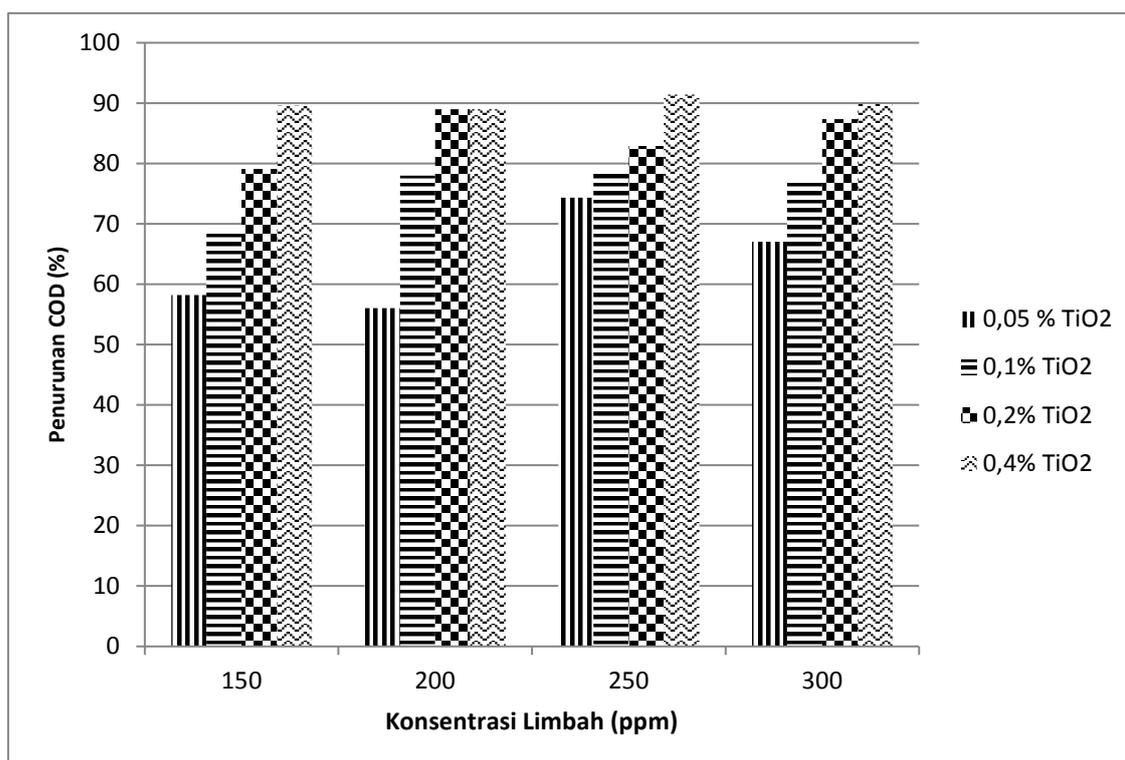
Gambar 2 . Pengaruh Konsentrasi Katalis TiO_2 terhadap Degradasi Warna pada berbagai Limbah *Procion Red*



Gambar 3. Pengaruh Konsentrasi Katalis TiO_2 terhadap Penurunan COD pada berbagai Konsentrasi Limbah *Procion Red*



Gambar 4. Pengaruh Konsentrasi Limbah *Procion Red* terhadap Degradasi Warna pada Semua Konsentrasi Katalis TiO_2



Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi Limbah *Procion Red* terhadap Penurunan COD Pada Semua Konsentrasi Katalis TiO₂

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Semakin besar konsentrasi Katalis TiO₂ pada pengolahan limbah *procion red* dengan metode UV-Fenton-TiO₂ maka semakin tinggi degradasi warna dan penurunan COD yaitu pada konsentrasi TiO₂ 0,4% degradasi warna mencapai 100% dan penurunan COD sebesar 91,4%.
2. Konsentrasi limbah *procion red* dengan konsentrasi 150–300 ppm tidak terlalu berpengaruh pada degradasi warna dan penurunan COD pada pengolahan limbah *procion red* dengan metode UV-Fenton-TiO₂.

Saran

1. Pengambilan sampel dilakukan pada *range* waktu dibawah 5 menit. Untuk itu diperlukan modifikasi reaktor agar lebih mudah untuk pengambilan sampel.
2. Untuk mempelajari pengaruh konsentrasi limbah *Procion Red* disarankan menggunakan konsentrasi diatas 300 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- Deng, Y and Zhao R. 2015. *Advanced Oxydation Processes (AOPs) in Waste Water*: Springer Internasional Publishing, USA.
- Dwiasi, D.W., et al. 2014. *Aplikasi Metode Advanced Oxidation Processes Untuk Menurunkan Kadar Metil Orange*. Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia VI 512, Surakarta.
- Hoffmann, M. Choi, and Bahnemann. 1995, *Environmental Applications of Semiconductor Photocatalyst*, California Institute of Technology, California.
- Hunger, K. 2003. *Industrial Dyes: Chemistry Properties Applications*. Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KgaA Weinheim. German.
- Koko, 2011. *Warna Batik*, <http://kokobahtiar.blogspot.com>. Diunduh pada Mei 2015.
- Manurung, R dkk. 2004. *Perombakan Zat Warna Azo Reaktif Secara Anaerob-Aerob*. Fakultas Teknik Jurusan Teknik Kimia USU. Sumatera Utara.

- Mermaliandi dan Yourdan. 2015. *Pengaruh Konsentrasi, Waktu Reaksi dan Rasio Molar Pada Pengolahan Pewarna Sintetis Procion red Menggunakan Foto-Fenton*. Laporan Penelitian Teknik Kimia: Universitas Sriwijaya. Palembang.
- Safarzadeh-Amiri A., Bolton J.R dan Cater S.R. 1996. *The Use of Iron in Advanced Oxidation Processes*. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 1, 18-26, 1996.
- So, C. M et al. 2002. *Degradation of azo dye Procion Red MX-5B by photocatalytic oxidation*. *Chemosphere* 46 (2002) 905–912. Hongkong.
- Tan, N.C.G., Opsteeg, J.L., Lettinga, G., Field, J.A. 1999. *Mineralization of azo dyes under integrated anaerobic/aerobic conditions*. In: Fass, R., Flashner, Y., Reuveny, S.(Eds.), *Novel Approaches for Bioremediation of Organic Pollution*. Plenum, New York, USA, pp. 83–93.