

**PENGARUH H₂O₂, PH DAN SUMBER SINAR
PADA DEGRADASI AIR LIMBAH PEWARNA INDIGO
MENGUNAKAN KATALIS TiO₂**

***INFLUENCE OF H₂O₂, PH, AND SOURCE RAY
ON INDIGO COLOUR WASTEWATER DEGRADATION USING TiO₂ CATALYST***

Djarwanti dan Cholid Syahroni

Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri

Jl. Ki Mangunsarkoro No 6, Semarang, 50136

Telp : (024) 8310216, Fax : (024) 8414811

E-mail : wanti235@yahoo.co.id

Naskah diterima tanggal 23 Januari 2014, disetujui tanggal 12 Maret 2014

ABSTRACT

The photocatalytic degradation of indigo dye wastewater was studied by using photocatalytic rotating drum reactor. The effect of pH, H₂O₂ and UV light sources on photocatalytic activity was investigated. This study consist of catalyst preparation, XRD and SEM characterization, followed by photocatalytic degradation. It was revealed that TiO₂ film prepared by anodizing formed tube with pore diameter 100 nm. The structure was anatase with crystalite size 4-17 nm. Hydrogen peroxide addition, however, improved the photocatalytic activity, with the optimum concentration was 0,1% v/v. Modifications of initial pH between 4.0 and 10 do not affect the activity. Experiment under sun light give better result compared to using artificial UV light.

Keywords : photocatalytic, H₂O₂, pH, indigo dye wastewater, TiO₂/Ti

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian adalah mengkaji sampai sejauh mana pengaruh peroksida, pH dan sumber sinar lampu UV dan sinar matahari dalam proses degradasi fotokatalisis terhadap air limbah indigo menggunakan reaktor *rotating drum*. Tahapan penelitian adalah : pembuatan katalis TiO₂/Ti secara anodizing, karakterisasi katalis melalui uji XRD dan SEM dilanjutkan dengan degradasi fotokatalisis air limbah pewarna indigo Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa struktur kristal adalah anatase dengan ukuran 4 – 17 nm. Bentuk Kristal nanotube berdiameter 100 nm. Hasil degradasi secara fotokatalitik dengan variasi penambahan hidrogen peroksida menunjukkan hasil terbaik pada penambahan peroksida 0,1% volum. Variasi pH tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap degradasi sampel limbah indigo baik itu pH asam maupun basa. Degradasi di bawah sinar matahari memberi efek lebih baik dibanding dengan lampu UV.

Kata kunci : fotokatalisis, H₂O₂, pH, air limbah indigo, TiO₂/Ti

PENDAHULUAN

Fotokatalisis menggunakan titanium dioksida (TiO₂) telah terbukti menjadi salah satu metode yang efektif untuk mendegradasi polutan organik yang ada dalam air limbah (Chong,dkk, 2010), termasuk air limbah industri tekstil (Alinsafi,dkk, 2007 dan Damodor,dkk, 2007). Senyawa organik mampu didegradasi hingga tingkat mineralisasi, sehingga tidak meninggalkan residu (sludge) yang selama ini menjadi masalah serius bagi pengolahan sistem konvensional. Sumber cahaya yang digunakan bisa berasal dari lampu UV atau

dapat memanfaatkan sinar matahari, sehingga sangat cocok untuk diterapkan di negara tropis seperti Indonesia, yang sepanjang tahun terpapar oleh sinar matahari dengan intensitas yang tinggi.

Fotokatalitik adalah suatu proses transformasi kimia yang memerlukan bantuan cahaya dan katalis yang bersifat semikonduktor (Fujisima,dkk, 1997). Semikonduktor tersebut jika terkena oleh sinar UV atau sinar matahari yang mempunyai foton lebih dari *energy* bahan semikonduktornya ($h\nu \geq EG$) akan menghasilkan electron (e⁻) di pita konduksi yang dapat mereduksi senyawa logam dan hole

(h +) di pita valensi yang dapat mengoksidasi senyawa organik yang berada di permukaan. Selain TiO₂ semikonduktor yang banyak digunakan untuk proses fotokatalisis antara lain Fe₂O₃, SnO₂, ZnO, ZnS, CuS, CeO₂, ZrO₂ dan WO₃ (Linsebigler, dkk, 1995). Tetapi hingga saat ini TiO₂ lebih sering digunakan dalam aplikasi fotokatalisis khususnya pengolahan limbah, karena banyak terdapat di alam mempunyai sifat stabil terhadap cahaya, tidak beracun, kemampuan untuk mengoksidasi yang tinggi dan tidak larut dalam kondisi eksperimen (Linsebigler, dkk, 1995).

Fenomena fotokatalisis pada permukaan TiO₂ dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika suatu semikonduktor tipe n dikenai cahaya (*hν*) dengan energi yang sesuai, maka elektron (*e*⁻) pada pita valensi (*vb*) akan pindah ke pita konduksi (*cb*), dan meninggalkan lubang positif (*h*⁺) pada pita valensi, disebut eksitasi. Sebagaimana besar (*e*⁻/*h*⁺) ini akan berekombinasi kembali, baik di permukaan ataupun di dalam bulk partikel, disebut de-eksitasi. Sedangkan sebagian lain dari (*e*⁻/*h*⁺) dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor, dimana pada akhirnya, (*h*⁺) dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak (*e*⁻) akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor. Dalam hal ini semikonduktor tersebut adalah titanium dioksida (TiO₂). Pada prinsipnya, reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron dari substrat ke (*h*⁺). Apabila potensi oksidasi yang dimiliki oleh (*h*⁺) pada pita valensi ini cukup besar untuk mengoksidasi air pada permukaan partikel, maka akan dihasilkan gugus hidroksil. Radikal hidroksil merupakan spesi pengoksidasi kuat dan memiliki potensial redoks sebesar 2,8 Volt. Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi sebagian besar zat organik menjadi air, asam mineral dan karbon dioksida. (Linsebigler, dkk, 1995, Fujisima, dkk, 1997).

Beberapa hasil penelitian mengungkapkan bahwa faktor yang berpengaruh dalam proses fotokatalisis menggunakan TiO₂ antara lain adalah pH, penambahan hidrogen peroksida, intensitas sinar UV, konsentrasi awal air limbah, dan jenis air limbah. Dalam penelitian ini akan diamati sampai seberapa jauh pengaruh pH, konsentrasi peroksida dan sumber sinar UV terhadap laju degradasi air limbah tekstil pewarna indigo secara fotokatalisis.

Beberapa peneliti telah melaporkan metode pembuatan katalis TiO₂, serta penggunaannya dalam proses fotokatalisis. Metode tersebut diantaranya adalah *dip coating* menggunakan TiO₂ powder (Zhang, dkk, 2001), *sol gel-dip coating* menggunakan prekursor Ti-

organik (Xu, 2008), *anodizing* plat titanium (Quan, dkk, 2005 dan Chen, dkk 2007), serta oksidasi termal dengan memanaskan plat titanium (Harper, dkk, 2001). Dari beberapa metode tersebut, *anodizing* plat titanium merupakan metode yang relatif murah, sederhana dan reproduisibel. Terlebih lagi metode ini menghasilkan film yang memiliki aktifitas tinggi dan daya rekat yang kuat terhadap penyangga. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan katalis TiO₂ yang dibuat secara *anodizing* dipermukaan plat Titanium (TiO₂/Ti).

Tujuan dari penelitian adalah mempelajari pengaruh peroksida, pH dan sumber sinar lampu UV dan sinar matahari dalam proses degradasi fotokatalisis terhadap air limbah indigo menggunakan katalis TiO₂/Ti.

METODE PENELITIAN

Bahan dan alat penelitian

Bahan yang digunakan adalah plat Ti kemurnian 99,9% dan ketebalan 0,2 mm. Plat Cu ketebalan 0,3 mm, etilen glikol, asam fluorida, asam nitrat, natrium nitrat dan amonium nitrat. Sampel air limbah berasal dari industri tekstil pewarna indigo di Jawa Tengah. Lampu UV merk Sankyo Denki 20W.

Alat yang digunakan adalah: bak kaca, power supply, *furnace*, pHmeter dan reaktor fotokatalisis

Preparasi katalis

Plat Ti dipotong dengan ukuran 20 x 25 cm kemudian diampelas dengan kertas amplas halus, dicuci dengan larutan deterjen dan dibilas dengan akuades. Selanjutnya plat Ti direndam (*etching*) dalam larutan asam (campuran HNO₃ : HF : H₂O = 3:1:6) selama 2 menit, kemudian dibilas dengan akuades dan dibiarkan kering alami. *Anodizing* dilakukan dengan menempatkan plat Ti sebagai anoda (kutub positif) dan plat Cu sebagai katoda (kutub negatif). Proses *anodizing* dilakukan dalam bak kaca bersekat. Suhu dijaga tidak lebih dari 20°C. Komposisi elektrolit : NH₄F 1% + Air 3% dalam etilen glikol. Waktu *anodizing* 2 jam pada voltase 40 V. Setelah selesai *anodizing* plat Ti dikalsinasi pada suhu 500°C selama 2 jam

Karakterisasi Katalis

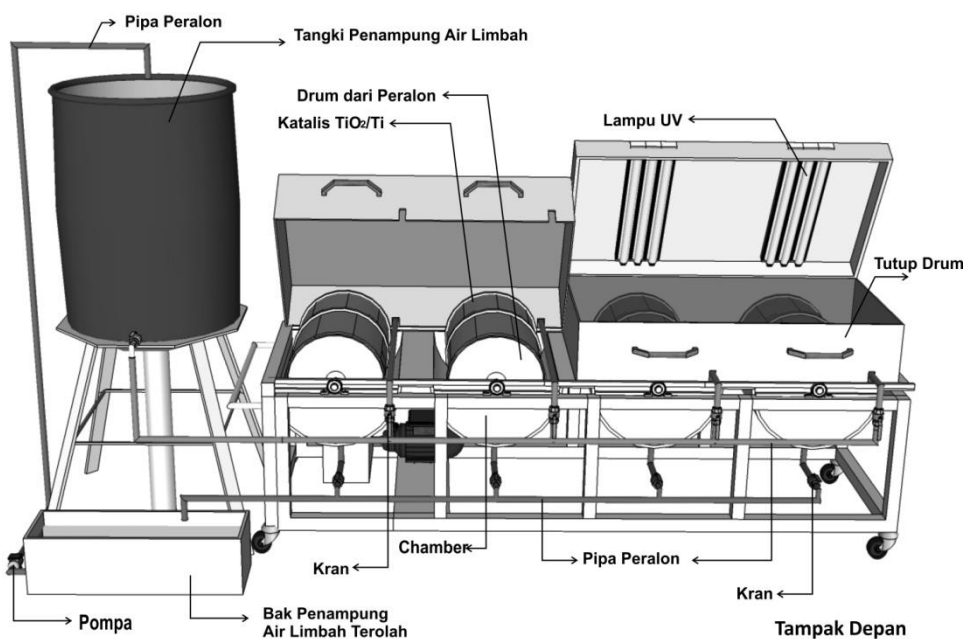
Katalis TiO₂/Ti yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-X (XRD) Phillips PW-1710 serta *Scanning Electron Microscope* (SEM) JEOL JSM-6390.

Reaktor fotokatalisis

Reaktor yang dibuat untuk mendegradasi air limbah secara fotokatalitik ini

berbentuk *rotating drum* (Gambar 1). Reaktor fotokatalitik ini merupakan 1 (satu) unit peralatan yang terdiri dari beberapa bagian. Bagian utama dari alat ini adalah 4 (empat) buah drum dari tabung pralon PVC yang

dipasang paralel. Diseluruh permukaan luar drum ditutup dengan plat Titanium yang telah dikenakan proses *anodizing* membentuk lapisan tipis TiO₂.



Gambar 1. Reaktor Fotokatalitik

Bagian lainnya adalah bak (*chamber*) berbentuk tabung setengah silinder terbuat dari *stainless steel* yang diletakkan dibawah drum. Cairan yang akan didegradasi dimasukkan kedalam tabung setengah silinder melalui tangki feeding dengan sistim spray. Drum dipasang sedemikian rupa sehingga sebagian drum bagian bawah tercelup cairan tersebut. Masing-masing drum diputar secara paralel digerakkan oleh motor dengan kecepatan 60 – 70 rpm. Proses degradasi dilakukan dengan sumber cahaya dari sinar matahari atau dari lampu UV. Oleh karena itu disetiap 2 drum dipasang penutup yang dilengkapi dengan lampu UV yang bisa difungsikan pada saat reaktor beroperasi tanpa sinar matahari. Penutup drum masing-masing berukuran panjang 98 cm, lebar 62,5 cm dan tinggi 25 cm. Lampu UV berjumlah 12 buah, 20 watt, 352 nm. Merk lampu adalah Sankyo Denky Blacklight Blue. Reaktor bisa dioperasikan sistim *batch* maupun kontinyu. Ukuran masing-masing drum yang dilapisi katalis TiO₂ adalah panjang 50 cm dan diameter 32 cm. Chamber penampung air limbah yang terletak dibawah drum berbentuk setengah silinder dengan ukuran panjang 54 cm, diameter 40 cm.

Degradasi Air Limbah Indigo Secara Fotokatalitik

Percobaan Proses degradasi air limbah menggunakan katalis TiO₂ dilakukan secara bertahap. Proses Degradasi menggunakan reaktor dengan komponen utama lapisan katalis TiO₂ nano partikel dengan system air limbah sebagai sampel disemprotkan pada drum yang berputar secara kontinu. Luas permukaan 4 (empat) drum seluruhnya adalah kurang lebih 18.800 cm². Sampel yang digunakan adalah limbah yang berasal dari industri tekstil unit *Dying* Indigo. Sebagai sumber sinar digunakan lampu UV merk Sankyo Denki 20W Variabel yang diamati adalah :

pH : alami, 4; 5; 6; 7; 8; 9 dan 10
 Kadar H₂O₂ : 0% v/v , 0,1% v/v, 0,5% v/v, 1% v/v, dan 2% v/v

Sampel yang digunakan sebanyak 60 liter, jadi untuk variasi kandungan peroksida 0,1%; 0,5%; 1% dan 2% masing-masing sampel ditambahkan peroksida berturut-turut : 60ml; 300ml, 600ml dan 1200ml

Evaluasi hasil penelitian

Untuk mengetahui efisiensi kinerja katalis dan reaktor fotokatalitik maka selama proses degradasi dilakukan pengambilan

sampel selang waktu 1 jam, yaitu pada jam ke 0; 1; 2 dst sampai 8 jam. Terhadap sampel tersebut diuji kandungan COD. Efisiensi dihitung dari prosentase penurunan COD sebelum dan sesudah degradasi menggunakan rumus : $(C_0 - C_n) / C_0 \times 100\%$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi katalis dengan uji XRD dan SEM

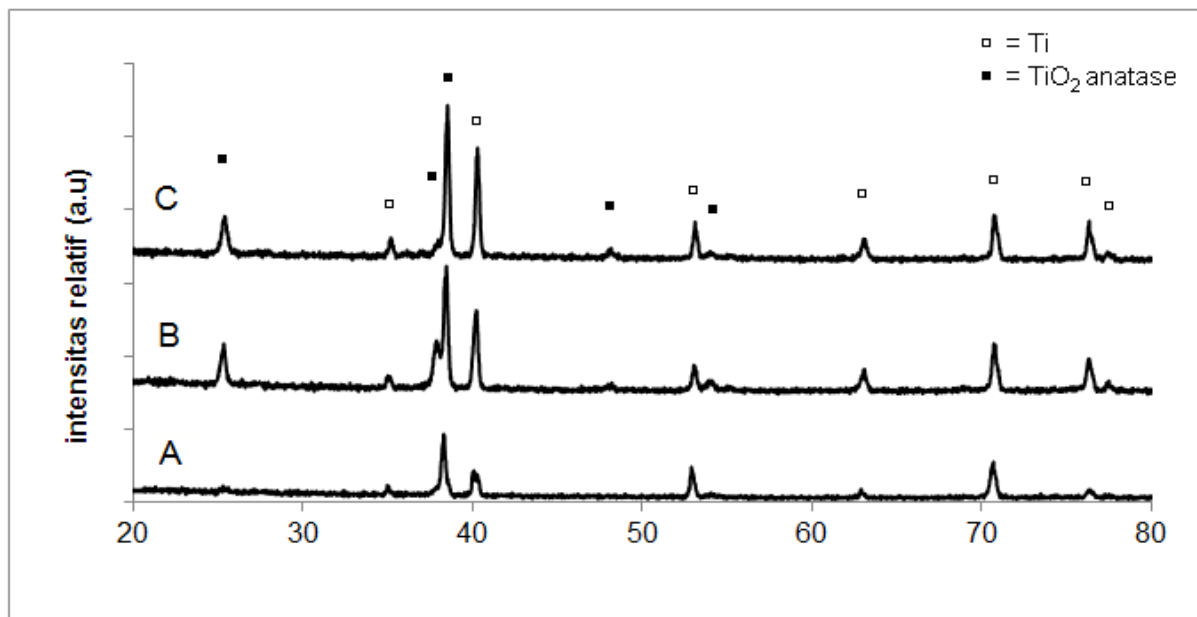
Uji XRD terhadap katalis TiO₂/Ti yang dibuat secara *anodizing* pada 40 V/2 jam diperlihatkan pada Gambar 2. Dari tiga buah sampel A, B dan C yang diuji terlihat bahwa hanya terdapat struktur kristal *anatase*, tidak ada kristal *rutile* maupun *brookite* dalam katalis tersebut. Dalam aplikasinya pada fotokatalis, umumnya digunakan TiO₂ pada fasa *anatase* karena mempunyai kemampuan fotokatalitik yang tinggi. Kinerja TiO₂ sebagai fotokatalis

berdasarkan proses kimia yang terjadi di permukaan akibat transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga luas permukaan spesifik, ukuran partikel dan tipe struktur memiliki peran penting (Hagfeldt & Grätzel, 1995, dalam Hari Sutrisno, 2009).

Ukuran kristalit dapat diperkirakan menggunakan data pelebaran puncak XRD sesuai dengan persamaan Scherer:

$$r = \frac{K \lambda}{\beta \cos \alpha}$$

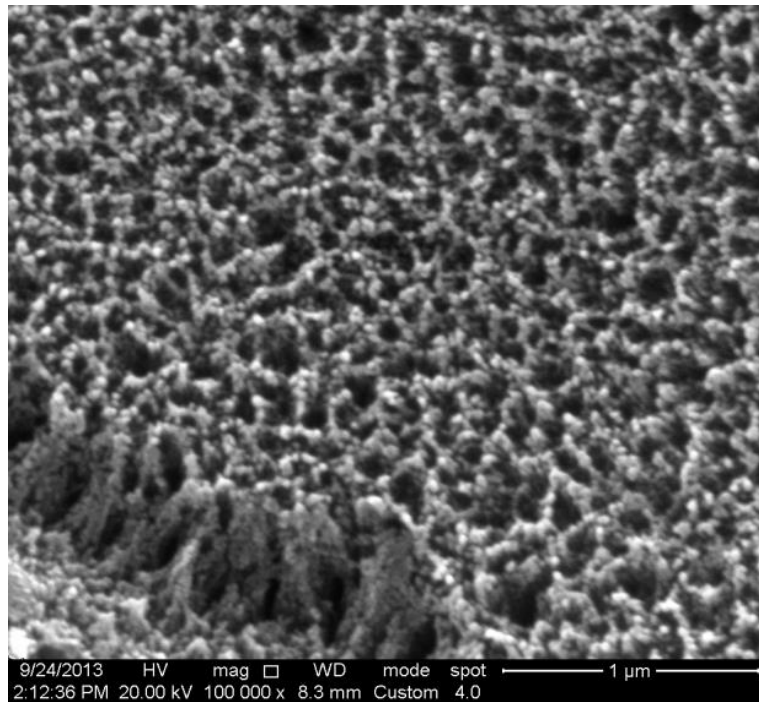
dengan r adalah ukuran kristalit, K adalah tetapan, λ adalah panjang gelombang sinar-X, β adalah lebar setengah-puncak dan θ adalah setengah sudut difraksi dalam derajat. Dengan perhitungan menggunakan software X Powder, diperoleh ukuran kristalit TiO₂ sampel A, B dan C berturut-turut adalah 17 nm, 8 nm dan 4 nm.



Gambar 2. Pola difraksi sinar-X film tipis TiO₂/Ti yang dipreparasi secara *anodizing* pada bias potensial 40 V selama 2 jam

Hasil foto SEM permukaan lapisan tipis TiO₂ dapat dilihat pada gambar 3. Dari gambar tersebut tampak bahwa susunan kristal sudah berbentuk tube, walaupun sebagian dindingnya telah larut. Diameter porinya berukuran sekitar 100 nm. Terbentuknya tube ini memang

diharapkan, karena tingkat porositasnya lebih tinggi dibanding bentuk pejal atau rod. Menurut Paulose dkk (2006), adanya unsur fluor dalam elektrolit pada proses *anodizing* menentukan dimensi nanotube.

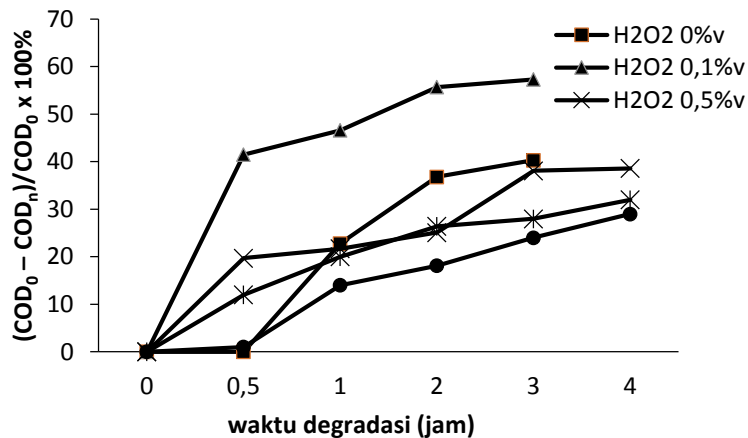


Gambar 3. Hasil foto SEM permukaan film TiO₂

Pengaruh konsentrasi H₂O₂

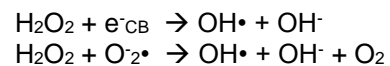
Prosentase penurunan COD pada variasi penambahan H₂O₂ bisa dilihat pada gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penambahan peroksida 0,1% v/v adalah

kondisi paling bagus. Dalam waktu 3 jam, kandungan COD awal 239,4 mg/l turun menjadi 102,2 mg/l. Prosen penurunan COD sebesar 57,3%.



Gambar 4. Prosentase Penurunan COD pada Variasi H₂O₂

Tanpa penambahan peroksida hasilnya kurang optimal. Degradasi sampai dengan waktu 3 jam untuk penambahan peroksida 0%; 0,1%; 0,5%; 1% dan 2% prosentase penurunan COD berturut-turut 40,3%; 57,3%; 38,1%; 28,0% dan 24,0%. Peroksida dalam proses degradasi air limbah ini menambah timbulnya OH• radikal dari intereaksi katalis TiO₂ nanopartikel dan sinar UV. Persamaan reaksinya sebagai berikut (Chin, dkk, 2004):



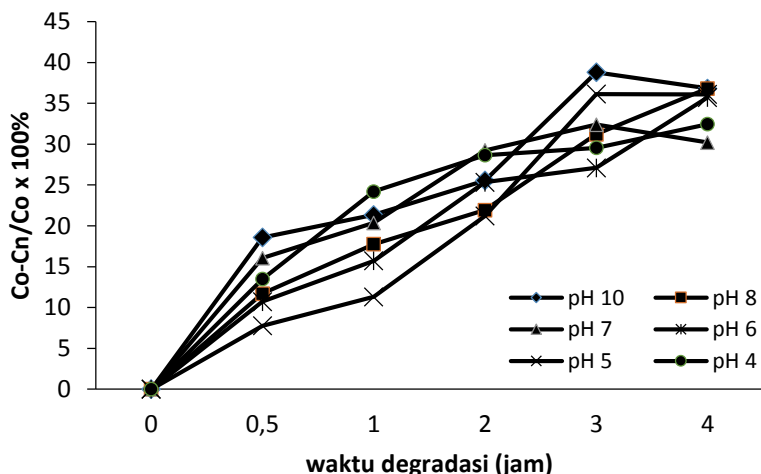
Penambahan peroksida lebih besar dari 0,1% volum juga tidak memberikan hasil yang bagus. Disisi lain kelebihan peroksida juga sebagai salah satu zat yang mengganggu proses uji kadar COD dengan metode Kalium Bichromat. Oleh karena itu dapat dimengerti jika penamabhan peroksida dalam kadar

terkecil tersebut dapat member efek terbesar dalam penurunan kadar COD. Penambahan peroksida yang berlebihan akan berefek pada gangguan proses uji kadar COD. Sehingga makin besar penambahan peroksida makin tidak efektif menurunkan kadar COD (Anonim, 2010). Bahkan Kang, dkk, 1999 dalam Anonim (2010) mengatakan bahwa pengaruh peroksida didalam analisa COD bisa mencapai 45 – 50%.

Pengaruh pH

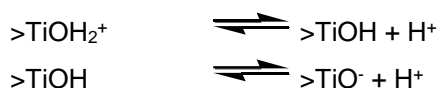
Pengaruh pH dipelajari dengan melakukan percobaan terhadap sampel limbah

dengan beberapa variasi pH yaitu 4, 5, 6, 7, 8, dan 10, yang hasilnya disajikan pada Gambar 5 .Dari grafik tersebut terlihat bahwa variasi pH larutan sampel tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap degradasi sampel. Terlihat hingga jam ke 4, penurunan nilai COD memberikan hasil yang hampir sama untuk semua variasi pH yang dicoba, yaitu antara 30 – 36 %. Hasil tersebut juga tidak menunjukkan kecenderungan tertentu terhadap penurunan ataupun kenaikan pH sampel.



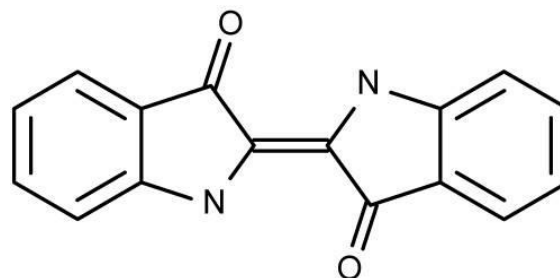
Gambar 5. Presentase penurunan COD pada variasi pH

Kondisi pH larutan sampel diketahui akan mempengaruhi muatan permukaan dari katalis TiO₂. Permukaan TiO₂ dapat bermuatan positif, negatif atau tidak bermuatan. pH dimana permukaan suatu oksida tidak bermuatan disebut *Zero Point Charge* (pH_{zpc}) yang untuk TiO₂ berada disekitar 7. Bila pH larutan lebih kecil dari pH_{zpc} maka permukaan TiO₂ akan bermuatan positif, sebaliknya bila pH larutan lebih besar dari pH_{zpc} maka permukaan TiO₂ akan bermuatan negatif, sesuai dengan kesetimbangan berikut (Galves, 1999):



Proses degradasi fotokatalisis diawali dengan adsorpsi senyawa yang didegradasi ke permukaan katalis TiO₂. Dalam suasana asam, permukaan katalis akan bermuatan positif dan akan cenderung mengadsorpsi spesi yang bermuatan negatif, sebaliknya jika dalam suasana basa permukaan katalis akan bermuatan negatif dan akan cenderung

mengadsorpsi spesi yang bermuatan positif. Indigo adalah jenis zat warna yang tidak bermuatan, seperti terlihat dari struktur molekulnya sebagai berikut:



Oleh karena itu muatan pada permukaan katalis TiO₂ tidak berpengaruh terhadap degradasi indigo, karena adsorpsi yang terjadi di permukaan katalis bukan adsorpsi kimia akan tetapi hanya adsorpsi fisika saja.

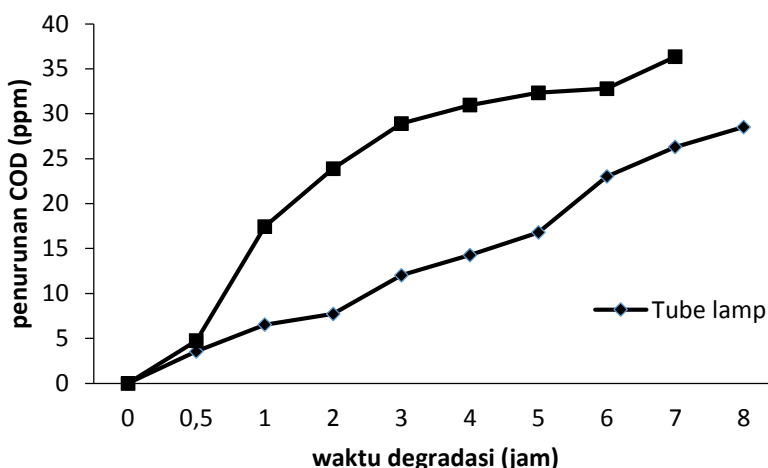
Degradasi dengan variasi sumber sinar UV

Sumber sinar UV yang digunakan adalah sinar matahari dan lampu UV jenis *tube lamp*. Percobaan dilakukan pada kondisi optimum yaitu dengan penambahan hidrogen peroksida 0,1% V/V dan pH diatur pada pH 10. Proses degradasi dimulai ketika matahari

sudah cukup tinggi sehingga intensitas sinarnya dianggap cukup, yaitu mulai sekitar jam 09.00. Percobaan diakhiri ketika sinar matahari sudah tidak memberi sinar yang cukup yaitu menjelang sore hari.

Dari Gambar 6 terlihat bahwa sinar UV dari matahari memberi efek lebih baik dibanding dengan dari lampu. Pada durasi 7 jam degradasi menggunakan lampu UV hanya mampu menurunkan COD 26,30% sedangkan menggunakan sinar matahari mampu menurunkan COD 36,35%. Pengukuran intensitas sinar UV menggunakan lampu tercatat sekitar 540 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Pengukuran

intensitas sinar UV matahari selama rentang waktu percobaan (jam 09.00 sampai dengan jam 16.00) berkisar antara 640 - 3300 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Aktifitas fotokatalis TiO₂ berbanding lurus dengan intensitas sinar UV yang sampai ke permukaan katalis. Semakin tinggi intensitas sinar UV, maka akan semakin banyak partikel TiO₂ yang terkena sinar UV, sehingga populasi pasangan hole dan e⁻ juga semakin banyak. Akibatnya, aktifitas fotokatalis TiO₂ juga akan semakin meningkat. Hal inilah yang menyebabkan laju degradasi menggunakan sinar matahari lebih tinggi dibanding menggunakan lampu UV.



Gambar 6. Presentase penurunan COD pada variasi sumber sinar UV

KESIMPULAN

Penambahan hidrogen peroksida memberikan pengaruh pada degradasi fotokatalis air limbah pewarna indigo menggunakan katalis TiO₂/Ti. Hasil degradasi secara fotokatalis dengan variasi penambahan hidrogen peroksida menunjukkan hasil terbaik pada penambahan peroksida 0,1% V/V. Persentase penurunan COD 57,30% pada waktu 3 jam. Variasi pH tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap degradasi sampel limbah indigo baik itu pH asam maupun basa. Degradasi dibawah sinar matahari memberi hasil lebih baik dibanding dengan dari lampu UV.

DAFTAR PUSTAKA

A. Alinsafi, F. Evenou, E.M. Abdulkarim, M.N. Pons O. Zahraa, A. Benhammou, A. Yaacoubi, A. Nejmeddine, 2007, Treatment of textile industry wastewater by supported photocatalysis, *Dyes and Pigments*, Vol 74, 439-445.

Anonim, 2010, Peroxide Interference in the PeCOD and Dichromate Method for

COD, www. Aquadiagnostic.com, Application Note 004 v01 p 1-4.

Chen, X., Mao, S., S., 2007, Titanium Dioxide Nanomaterial: Synthesis, Properties, Modification and Application, *Chem Rev*, 107: 2891-2959.

Chin Mei Ling, Abdul Rahman Mohamed & Subhash Bhatia, 2004, Photodegradation of methylene blue dye in Aqueous stream using immobilized tio2 film, *Catalyst: synthesis, characterization and Activity studies*, *Jurnal Teknologi*, 40(F) Jun. 2004: 91-103 © Universiti Teknologi Malaysia

Chong, M.N., B. Jin, C.W.K. Chow, C. Saint, 2010, Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review, *Water Research*, Vol 44, 2997-3027.

Damodar, K. Jagannathan, T. Swaminathan 2007, Decolourization of reactive dyes by thin film immobilized surface photoreactor using solar irradiation, *Solar Energy*, , 81, 1-7.

Fujishima, A., K. Hashimoto, T. Watanabe, 1997, TiO₂ photocatalysis fundamental and applications, BKC Inc., Tokyo.

- Galves, J.B., 1999, Solar detoxification, UNESCO WSP Program
- Hagfeldt, A. & Grätzel, M. (1995). Light-Induced Redox Reactions in Nanocrystalline Systems. *Chemical. Review.* (95): 49-68.
- Harper J.C., Christensen P. A., Egerton T. A., Curtis T. P. and Gunlazuardi J.; 2001, Effect of catalyst type on the kinetics of the photoelectrochemical disinfection of water inoculated with E.coli, *Journal Applied Electrochemistry*, 31, Vol. 6: 623-628.
- Hari Sutrisno, 2009, Tinjauan Mikrostruktur Kereaktifan Anatas Dan Rutil Sebagai Material Superfotohidrofil Permukaan, Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, 16 Mei 2009
- Paulose, et al, 2006, "Anodic Growth of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays to 134 ím in Length", *The Journal of Physical Chemistry B Letters*, 2006, 110, 16179-16184, Published on Web 07/28/2006
- Quan, X., Yang, S., Ruan, X., Zhao, H., 2005, Preparation of titania nanotubes and their environmental applications as electrode, *Environ. Sci. Technol*, 39: 3770-3775
- Xu, Y., He, Y., Cao, X., Zhong, D., Jia, J., 2008, TiO₂/Ti rotating disk photoelectrocatalytic (PEC) reactor: a combination of highly effective thin-film PEC and conventional PEC processes on a single electrode, *Environ. Sci. Technol.*, 42: 2612-2617
- Zhang, L., Kanki, T., Sano, N., Toyoda, A., 2001, Photocatalytic degradation of organic compounds in aqueous solution by a TiO₂-coated rotating-drum reactor using solar light, *Solar Energy*, 70, Vol. 4:331-337