

PENGEMBANGAN REAKTOR FOTOKATALITIK ROTATING DRUM UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL

Cholid Syahroni, Djarwanti

Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri (BBTPPI), Semarang

ABSTRAK

Teknologi pengolahan air limbah secara fotokatalitik mampu mendegradasi senyawa organik hingga tingkat mineralisasi, sehingga tidak meninggalkan residu (*sludge*). Penelitian ini bertujuan membuat reaktor fotokatalitik *rotating drum* dan mengaplikasikannya pada industri tekstil pewarnaan indigo.

Langkah percobaan adalah pembuatan reaktor fotokatalitik *rotating drum*, pembuatan katalis TiO_2/Ti dengan cara *anodizing* serta pemasangannya pada reaktor, karakterisasi katalis (uji XRD, SEM dan LSV) dan melakukan uji coba degradasi air limbah di industri tekstil pewarna indigo. Proses *anodizing* dilakukan dengan arus listrik searah 40 volt selama 2 jam menggunakan elektrolit etilen glikol yang mengandung amonium fluoride dan air. Uji karakterisasi secara XRD dan SEM menunjukkan bahwa struktur kristal TiO_2 adalah anatase dengan ukuran kristalit 8 – 13 nm. Bentuk kristal *nanotube*, dengan diameter 30 – 110 nm.

Uji coba reaktor dilakukan di industri tekstil pewarna indigo. Variabel degradasi air limbah adalah waktu tinggal dan konsentrasi peroksida. Hasil ujicoba menunjukkan bahwa degradasi secara fotokatalitik dengan penambahan peroksida 0,5% terhadap air limbah dari unit *dyeing* pewarna indigo bisa menurunkan COD 72,12% dalam waktu 2 jam.

Kata kunci :degradasi fotokatalitik/ fotoelektrokatalitik, indigo, TiO_2/Ti , *rotating drum*

PENDAHULUAN

Degradasi kontaminan organik dalam air menggunakan proses fotokatalitik/fotoelektrokatalitik merupakan salah satu alternatif pengolahan limbah yang sangat menjanjikan. Dengan proses ini, senyawa organik mampu didegradasi hingga tingkat mineralisasi, sehingga tidak meninggalkan residu (*sludge*) yang selama ini menjadi masalah serius bagi pengolahan dengan sistem konvensional. Fotokatalitik meliputi irradiasi semikonduktor oksida logam seperti titanium oksida (TiO_2) dengan sinar ultra violet (UV). TiO_2 merupakan katalis yang sangat efektif dalam proses fotokatalitik. Hal ini disebabkan TiO_2 bersifat inert baik secara kimia maupun biologi, tidak beracun, stabil terhadap korosi serta harganya relatif murah (Andayani W., et al., 2001).

Preparasi, sintesa dan modifikasi aplikasi TiO_2 nano partikel terus dilakukan oleh para peneliti. Chen dkk (1999) menguraikan dari berbagai cara sintesis misalnya cara: sol gel, micelle, sol, hidrotermal, solvotermal, oksidasi langsung, disposisi uap secara kimiawi, fisik, elektrik, kimiawi sonik, *microwave* dan lain sebagainya. Dari berbagai cara tersebut, hanya cara *anodizing* dengan larutan elektrolit organik mengandung florida yang dapat mengendalikan ukuran (*size*) partikel nano TiO_2 (Grimes et.al, 2009). Preparasi secara *anodizing* ini akan menghasilkan partikel TiO_2 berbentuk tabung dan mempunyai struktur partikel berbentuk anatase. Bentuk ini mempunyai luas permukaan yang paling luas sehingga mempunyai efektifitas yang tinggi untuk mendegradasi secara fotokatalitik maupun fotoelektrokatalitik terhadap bahan organik yang menjadi beban cemaran dalam air limbah industri.

Secara umum proses fotokatalisis diawali dengan absorpsi energi foton oleh semikonduktor, yang menyebabkan terjadinya pemisahan muatan atau foteksitasi dalam semikonduktor. Elektron (e^-) akan tereksitasi ke pita konduksi dengan meninggalkan *holes*/lubang positif (h^+) pada pita valensi. Selanjutnya akan terjadi oksidasi yang sangat kuat jika ada senyawa organik yang terabsorpsi pada permukaan TiO_2 .

Penelitian ini adalah rangkaian dari penelitian-penelitian tahun sebelumnya, yaitu pengembangan reaktor fotokatalitik/fotoelektrokatalitik untuk pengolahan limbah cair industri tekstil. Dalam penelitian selama dua tahun terakhir, dihasilkan reaktor fotokatalitik *rotating drum* menggunakan katalis TiO_2 untuk mendegradasi senyawa zat

warna tekstil, dalam skala laboratorium. Reaktor tersebut terbukti cukup efektif dan mampu menurunkan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD) hingga 50 – 65% dalam waktu 60-120 menit, tanpa menghasilkan residu/ *sludge*. Dalam penelitian ini dilakukan *scale up* reaktor fotokatalitik tersebut serta menguji kinerjanya dengan menggunakan sampel air limbah yang sesungguhnya.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan Penelitian

Etching	: amplas halus nomor 600, HNO ₃ dan HF
Anodizing	: plat Ti (kemurnian 99,9% dengan ketebalan 0,2mm), plat Cu (ketebalan 0,3 mm), etilen glikol (<i>teknis</i>), Ammonium Florida p.a dan es batu
Degradasi fotokatalitik	: air limbah indigo, plat Titanium, H ₂ O ₂ , lampu UV (merk Sankyo Denki 20W) dan NaNO ₃ .
Analisa COD	: asam sulfat, kalium bichromat, fero amonium sulfat, kalium hydrogen phtalate dan mercury sulfat

Alat Penelitian

Etching	: bak kaca,
Anodizing	: bak kaca, power supply dan termometer. : asam sulfat, kalium bichromat, fero amonium sulfat, kalium hydrogen phtalate dan mercury sulfat
Kalsinasi	: <i>furnace</i> (merk Linderbeger Blue Type BF 51828C),
Degradasi fotokatalitik	: <i>potentiostat</i> , pompa air, pHmeter, reaktor fotokatalitik/fotoelektrokatalitik
Analisa COD	: COD reflux, buret

Perlakuan awal

Plat Ti dipotong dengan ukuran 20 x 25 cm kemudian diampas dengan kertas amplas halus hingga bersih dan mengkilat, dicuci dengan larutan deterjen dan dibilas dengan akuades.

Proses Etching

Plat Ti direndam (*etching*) dalam larutan asam (campuran HNO_3 : HF: H_2O = 3:1:6) selama 2 menit, kemudian dibilas kembali menggunakan akuades dan dibiarkan kering alami.

Proses Anodizing

Proses *anodizing* adalah proses oksidasi menggunakan reaksi elektrokimiawi dalam suatu elektrolit. *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 , dengan menambahkan es batu pada bak luar jika suhu mulai naik. Komposisi elektrolit : NH_4F 1% + Air 3% dalam etilen glikol. Waktu *anodizing* 2 jam pada voltase 40 V.

Proses Kalsinasi

Setelah selesai *anodizing* plat Ti dikalsinasi pada suhu 500°C selama 2 jam.

Karakterisasi Katalis

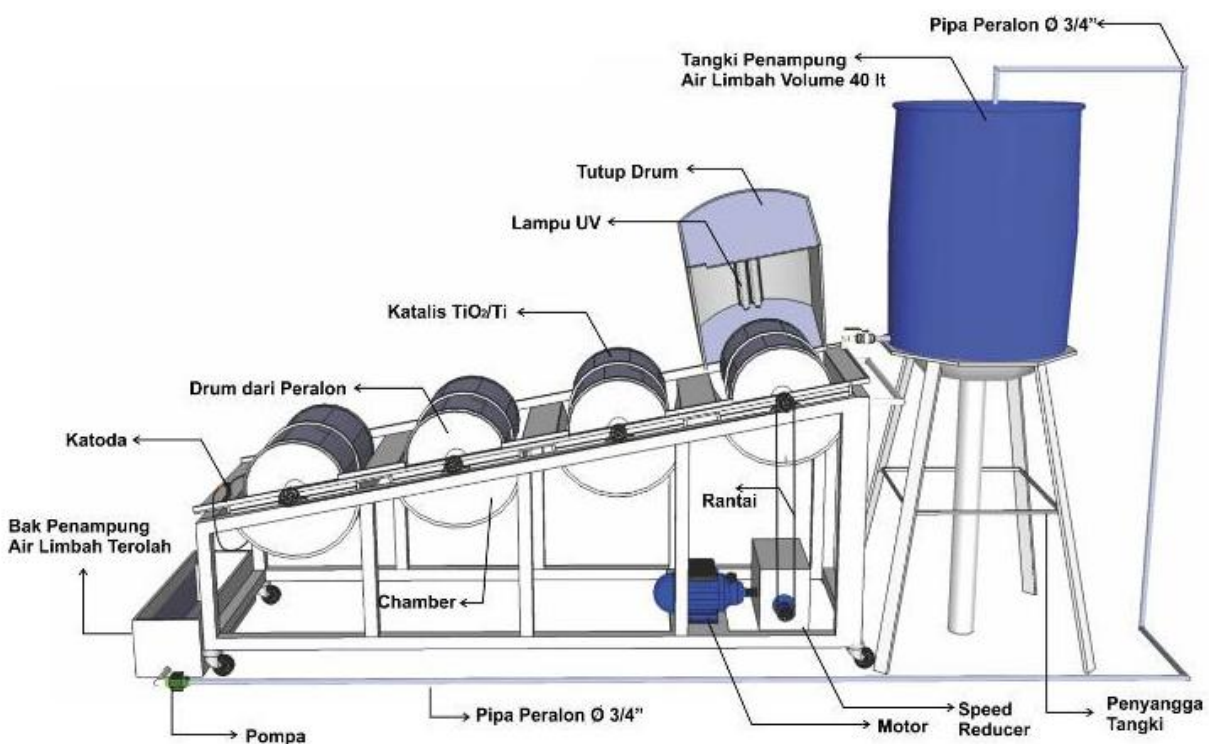
Katalis TiO_2/Ti yang dihasilkan diuji respon arus cahayanya dengan metode *Linear Sweep Voltametri (LSV)*, Untuk melihat karakteristik kristalografi katalis TiO_2 dan morfologi permukaan TiO_2 dilakukan analisis menggunakan *XRD* dan *SEM*.

Pembuatan Reaktor

Bagian utama dari reaktor adalah 4 buah drum berlapis katalis TiO_2 yang dipasang secara seri. Reaktor ini merupakan modifikasi dari dua buah reaktor yang telah dibuat pada penelitian sebelumnya. Dibandingkan dengan reaktor sebelumnya reaktor ini mempunyai beberapa kelebihan. Reaktor ini bisa difungsikan untuk operasi *batch* maupun kontinyu. Posisi drum dibuat bertingkat sehingga memungkinkan air limbah mengalir secara gravitasi dari drum satu ke drum berikutnya. *Overflow* dari drum terakhir bisa disirkulasi lagi kedalam tangki *feeding* menggunakan pompa, selanjutnya didistribusikan lagi ke drum-drum secara seri.

Sistim *batch* memungkinkan adanya limbah dibagian bawah *chamber* tidak ikut terdegradasi, kecuali kalau dibantu dengan pengadukan atau aerasi. Didalam sistim kontinyu, setiap tetes air limbah mempunyai kesempatan yang sama untuk kontak dengan katalis. Sistim sirkulasi menyebabkan air limbah bisa tercampur secara merata, sehingga efisiensi degradasi pun menjadi tinggi.

Kelebihan lainnya adalah sistim *feeding* air limbah dari drum satu ke drum berikutnya selain secara gravitasi juga bisa dengan sistim *spray*. Air limbah mengalir dari bak *feeding* melalui pipa pralon berlubang yang dipasang memanjang diatas drum. Percikan air limbah dari lubang pipa memungkinkan terjadinya *transfer* oksigen kedalam air limbah. Dengan demikian kandungan oksigen terlarut menjadi lebih besar karena transfer oksigen selain dari putaran drum juga dari sistim *spray* ini. Adanya oksigen menyebabkan kecepatan degradasi bertambah. Dengan sistim *spray* ini tidak perlu lagi dipasang aerator untuk suplai oksigen.



Gambar.3.1. Reaktor Fotokatalitik

Modifikasi lain dari reaktor ini adalah disetiap chamber dilengkapi dengan kran dibagian bawah untuk pengambilan contoh. Kran ini bisa disambung dengan pipa dan dihubungkan ke drum berikutnya jika diinginkan proses kontinyu dengan *feeding* tanpa *spray*. Jika diinginkan pengoperasian hanya menggunakan 1 atau 2 drum saja pengaturan *feeding* bisa diatur dengan membuka atau menutup kran-kran yang bersangkutan.

Degradasi Air Limbah Indigo Secara Fotokatalitik

Untuk mengetahui dan mempelajari kinerja reaktor *rotary drum* serta katalis yang telah dibuat, dilakukan percobaan degradasi air limbah industri tekstil yang mengandung zat warna indigo secara fotokatalitik menggunakan reaktor tersebut. Keasaman (pH) diatur dengan menambahkan HNO_3 kedalam air limbah. Selanjutnya air limbah ditambah dengan H_2O_2 30% dengan variasi 0,05%; 0,1%; 0,5% dan 1% volume. Selain % volume dari peroksida variabel lainnya yang diamati adalah waktu degradasi : 0; 1; 29 jam.

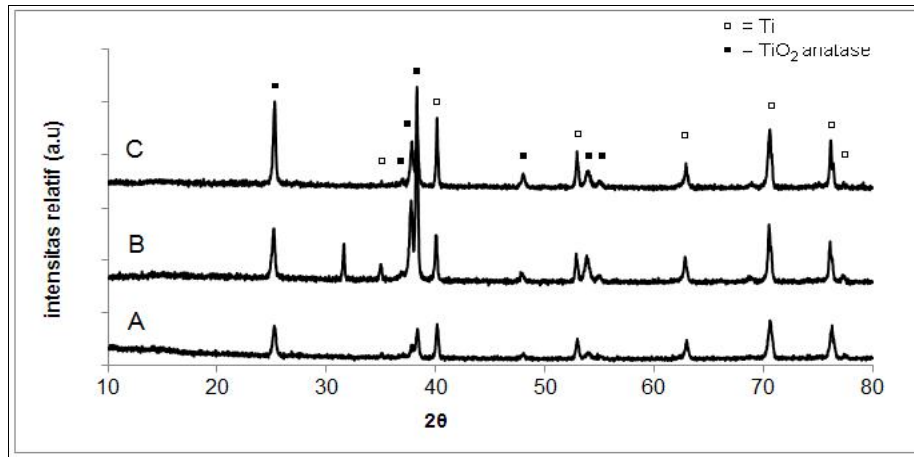
Evaluasi Hasil Penelitian

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; 29 jam. Terhadap sampel tersebut diuji kandungan COD dan TOC.

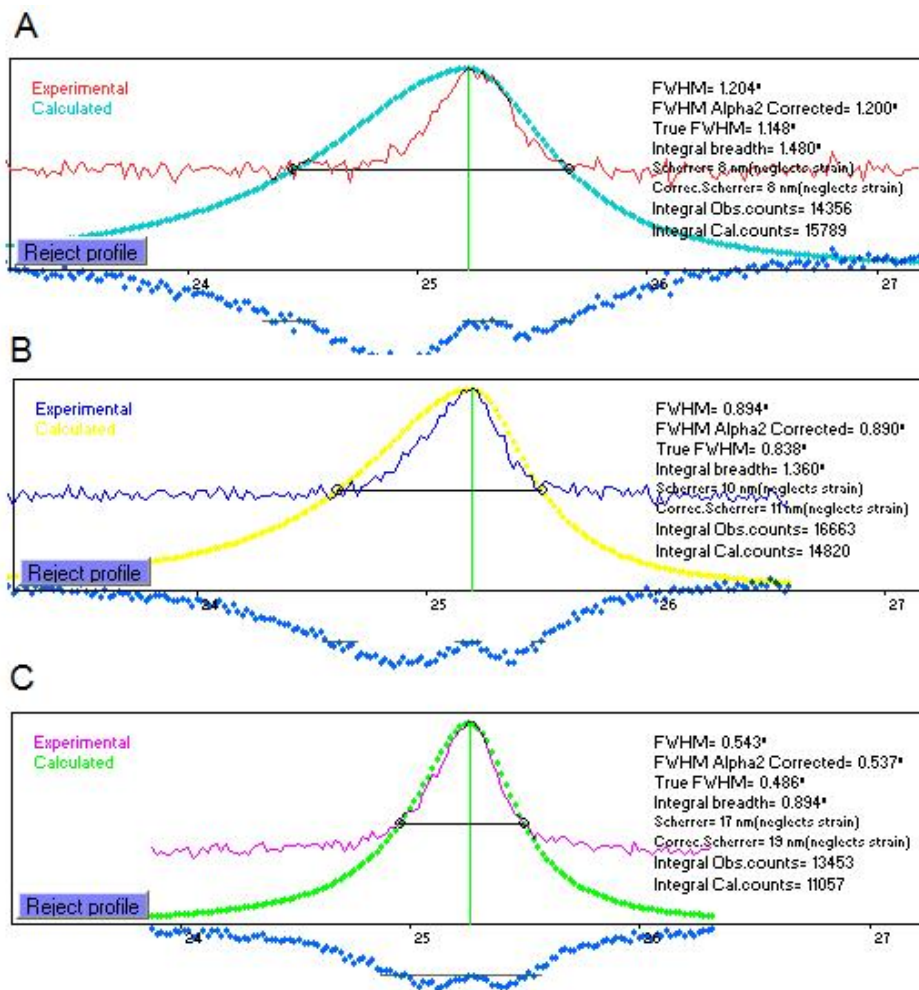
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi katalis dengan uji XRD (X-Ray Diffraction)

Karakterisasi dengan alat XRD dilakukan untuk mendapatkan informasi struktur dan ukuran kristal TiO_2 . Ada 3 buah katalis yang diuji yaitu katalis A, B dan C. Dilihat secara visual katalis A mewakili katalis kualitas baik, katalis B mewakili kualitas sedang dan katalis C mewakili kualitas kurang baik. Pengukuran terhadap film tipis TiO_2/Ti yang dipreparasi dengan metode *anodizing*, masing-masing sampel A, B dan C diperlihatkan pada Gambar. 4.1. Dapat dilihat bahwa pada pola difraksi film TiO_2/Ti terdapat puncak tambahan yang bukan pola difraksi Ti, yaitu masing-masing pada sudut 2θ : $25,2^\circ$; $37,0^\circ$; $37,8^\circ$; $38,3^\circ$; $47,9^\circ$; $53,9^\circ$ dan $55,1^\circ$. Hasil ini merujuk pada bidang kristal (101), (103), (004), (112), (200), (105) dan (211) struktur TiO_2 anatase (PCPDF No. 78-1510). Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa tidak terdapat struktur kristal lain yang dihasilkan dari preparasi TiO_2 dengan metode *anodizing* pada percobaan ini.



Gambar 4.1. Pola difraksi sinar-X film tipis TiO_2/Ti yang dipreparasi secara *anodizing* pada bias potensial 40 V selama 2 jam



Gambar 4.2. Hasil perhitungan ukuran kristalit TiO_2 berdasarkan persamaan Scherer menggunakan software X Powder

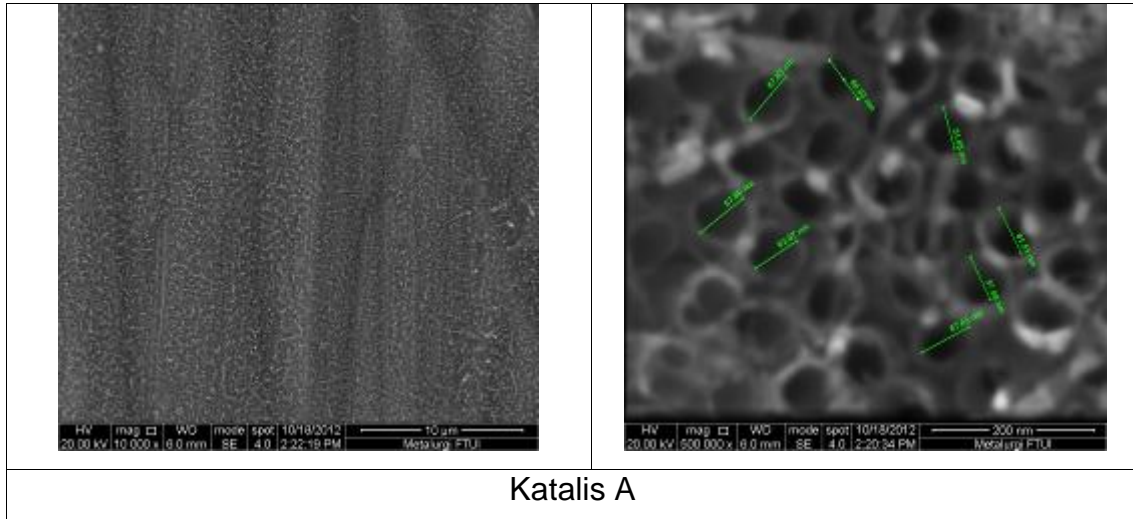
Ukuran kristalit dapat diperkirakan menggunakan data pelebaran puncak XRD sesuai dengan persamaan Scherrer:

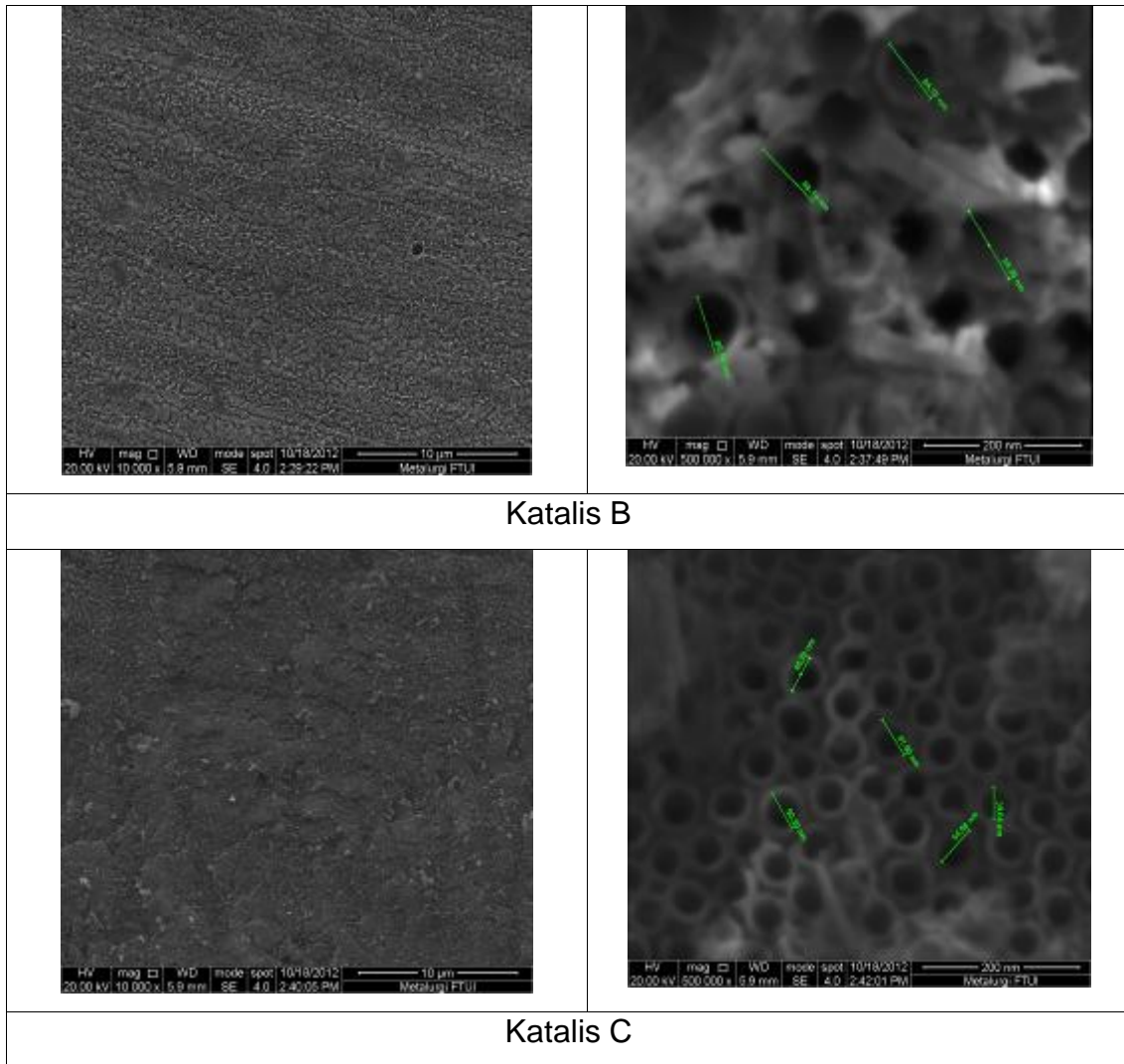
$$r = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

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 XPowder*, diperoleh ukuran kristal TiO₂ sampel A, B dan C berturut-turut adalah 8 nm, 11 nm dan 13 nm.

Karakterisasi katalis dengan SEM

Tujuan uji SEM adalah untuk mendapatkan gambaran morfologi lapisan TiO₂. Dari uji SEM terlihat bahwa lapisan katalis TiO₂ A, B maupun C berbentuk nanotube. Perkiraan diameter tube katalis A antara 60 – 70 nm, katalis B antara 80- 110 nm dan katalis C antara 30 – 60 nm.





Gambar 4.3. Hasil uji SEM katalis A, B dan C dengan perbesaran 10 ribu kali (kiri) dan 500 ribu kali (kanan)

Percobaan degradasi air limbah dari bak ekualisasi

Percobaan pertama dilakukan terhadap sampel air limbah yang diambil dari bak ekualisasi industri tekstil PT APAC INTI CORPORA (PT. AIC). Bak ekualisasi ini menampung semua air limbah dari PT. AIC. Ada dua jenis pewarna tekstil yang digunakan yaitu pewarna indigo dan pewarna black sulfur. Selain air limbah dari unit pewarnaan, air limbah dari unit *scrubber*, unit *water treatment*, unit *sizing* dan unit-unit lainnya dimasukkan kedalam bak ekualisasi. Degradasi fotokatalitik didalam percobaan dilakukan secara *batch* dan paralel. Sebagai sumber sinar UV adalah sinar matahari. Hasil degradasi ditampilkan pada Tabel 4.1. Dari tabel terlihat bahwa hasil degradasi

tidak bagus karena sampai dengan waktu 4 jam nilai COD sangat fluktuatif bahkan terjadi kenaikan nilai COD walaupun pada degradasi 5 jam terjadi penurunan mendekati 60%. Nilai COD yang fluktuatif ini diduga penyebab utama adalah sampel masih mengandung TSS cukup besar. Putaran drum yang sekaligus berfungsi sebagai pengadukan tidak cukup membuat TSS homogen didalam *chamber*. Sampel yang diambil dari bagian bawah kadang terikut TSS yang berbentuk flok yang menyebabkan COD menjadi tinggi.

Tabel 4.1. Hasil Uji COD dan prosentase penurunan COD pada proses degradasi fotokatalitik secara *batch* sampel dari bak ekualisasi

No Drum		Drum 1		Drum 2	
Vol Limbah		15 liter		15 liter	
Pengenceran		3 kali		3 kali	
Waktu	„ (jam)	ppm	%	ppm	%
10.45	0	572,50	0,00	498,00	0,00
11.45	1	316,90	44,65	925,50	neg
12.45	2	416,50	27,25	796,80	neg
13.45	3	956,10	neg	761,60	neg
14.45	4	430,60	24,79	693,30	neg
15.45	5	232,90	59,32	287,80	42,21

Penyebab kedua adalah limbah yang terkumpul di bak ekualisasi PT. AIC tidak hanya berasal dari unit pewarnaan tetapi juga berasal dari berbagai sumber antara lain dari water treatment, scrubber boiler, scrubber incinerator, unit packing yang mengandung B₃ dan sebagainya. Jadi limbah selain mengandung bahan pewarna juga mengandung bahan-bahan anorganik yang sulit untuk didegradasi dan bisa menyebabkan gangguan didalam analisa COD.

Percobaan degradasi air limbah dari proses dyeing

Percobaan selanjutnya menggunakan sampel air limbah langsung dari proses dyeing pewarna indigo. Air limbah ini berasal dari pencucian kain setelah dilakukan pencelupan warna indigo. Percobaan sebelumnya dilakukan secara *batch*. Percobaan

ini dilakukan semi kontinyu. Jumlah air limbah yang diolah setiap percobaan sejumlah 50 liter. Air limbah dialirkan dari bak *feeding* ke drum satu dan drum berikutnya secara seri. Dari drum terakhir air limbah ditampung dan disirkulasi kembali melalui pompa ke bak *feeding*. Aliran limbah ke drum-drum secara spray melalui pipa yang diberi lubang. Dengan demikian tidak diperlukan aerasi untuk suplai oksigen. pH dinetralkan dengan menambah HNO_3 . Variasi percobaan adalah konsentrasi peroksida H_2O_2 sebesar 0,05; 0,1; 0,5 dan 1% dan waktu degradasi 0 jam, 1jam, 2 jam..... 9 jam. Sumber sinar sepenuhnya menggunakan lampu UV black light, 20 watt, 352 nm. Oleh karena itu percobaan tidak terpancang waktu seperti halnya percobaan menggunakan sinar matahari. Penurunan nilai COD dan prosentase penurunannya bisa dilihat pada Tabel 4.2. dan Gambar 4.4.

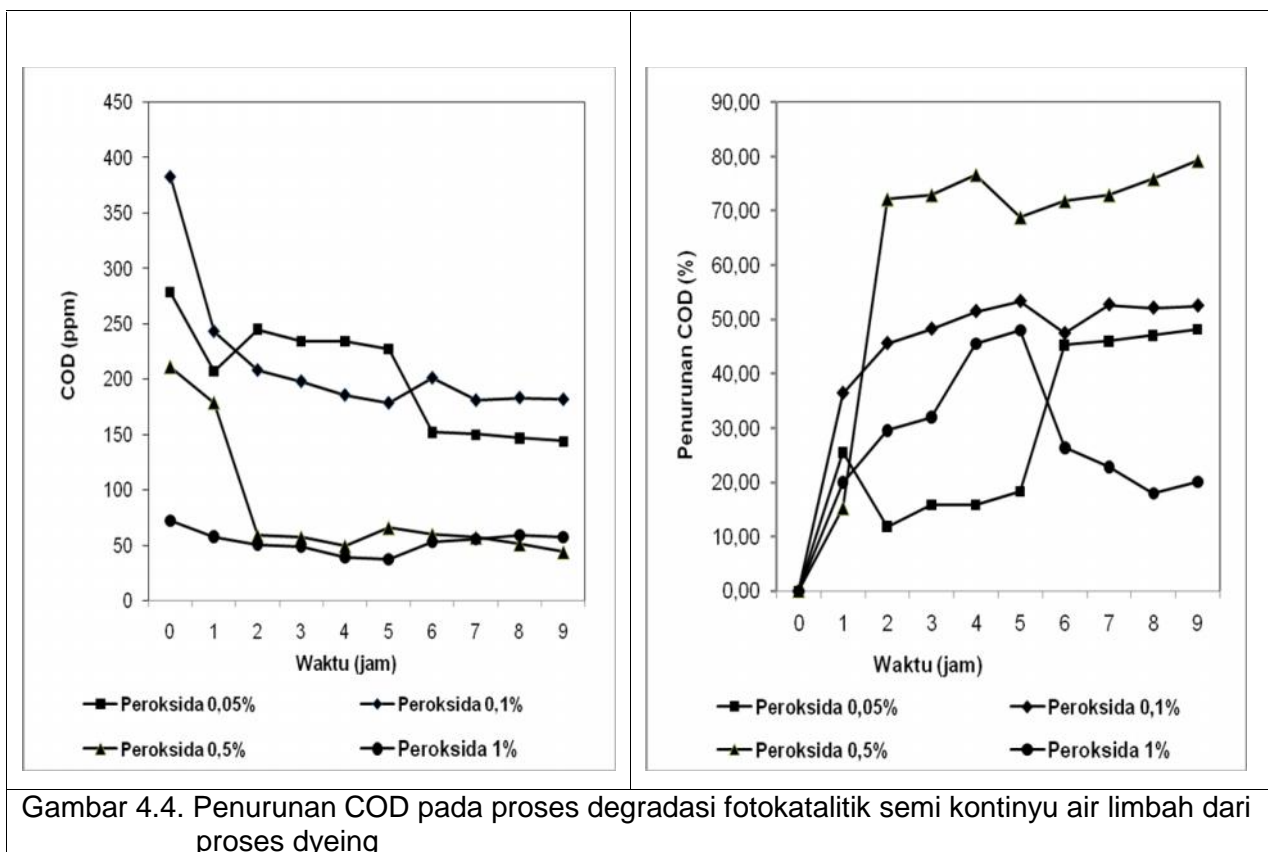
Tabel 4.2. Hasil Uji COD dan prosentase penurunan COD pada proses degradasi fotokatalitik semi kontinyu air limbah dari proses dyeing

" (Jam)	H_2O_2 0,05% volum		H_2O_2 0,1% volum		H_2O_2 0,5% volum		H_2O_2 1% volum	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
0	278	0,00	382,40	0,00	211	0,00	72,05	0,0
1	207	25,54	243,00	36,45	178,8	15,26	57,64	20,0
2	245	11,87	207,90	45,63	58,82	72,12	50,72	29,6
3	234	15,83	197,80	48,27	57,25	72,87	48,99	32,0
4	234	15,83	185,40	51,52	49,41	76,58	39,20	45,6
5	227	18,35	178,30	53,37	65,88	68,78	37,47	48,0
6	152	45,32	200,90	47,46	59,61	71,75	53,03	26,4
7	150	46,04	180,70	52,75	57,25	72,87	55,56*	22,9*
8	147	47,12	183,00	52,14	50,98	75,84	59,09	18,0
9	144	48,20	181,50	52,54	43,92	79,18	57,56	20,1

Terlihat bahwa pada 1 jam pertama kecepatan degradasi lebih tinggi dibanding jam berikutnya, baik untuk konsentrasi peroksida 0,05%, 0,1%, 0,5% maupun 1%. Konsentrasi peroksida 0,5% cenderung hasilnya lebih baik dibanding lainnya, karena prosentase penurunan COD mencapai 72,12% pada waktu degradasi 2 jam dan mencapai 79,18% pada waktu degradasi 9 jam. Sedangkan pada konsentrasi peroksida

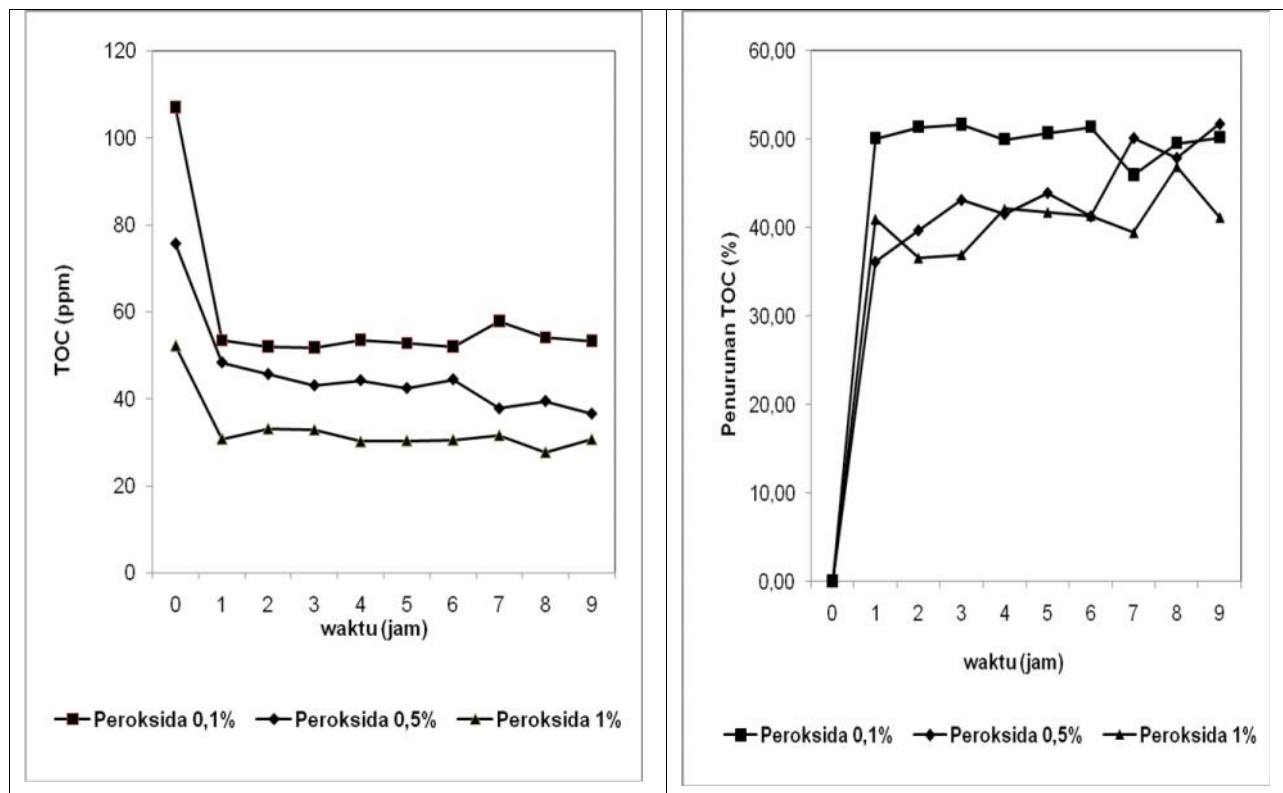
0,05%, 0,1% dan 1% menunjukkan prosentase penurunan COD berturut-turut 48,20%, 52,54% dan 20,10% pada waktu degradasi 9 jam.

Konsentrasi COD awal sangat mempengaruhi laju degradasi fotokatalitik. Ike (2006) dan anonim (2008) membuktikan bahwa jika konsentrasi organik didalam larutan itu kecil, maka transfer massa dari larutan ke permukaan katalis akan menjadi sedikit. Laju degradasi akan semakin meningkat jika konsentrasi polutan lebih besar, karena akan semakin banyak polutan yang teradsorpsi ke permukaan katalis. Hal ini juga terjadi pada konsentrasi peroksida 1 ppm, yang mana konsentrasi awal COD paling kecil dibanding lainnya sehingga prosen penurunannyaupun paling kecil. Kemungkinan lain rendahnya prosentase penurunan COD ini karean reaktor sudah dipergunakan untuk percobaan berulang kali sehingga diduga efisiensi semakin rendah.



Tabel 4.4. Hasil Uji TOC dan prosentase penurunan TOC pada proses degradasi fotokatalitik semi kontinyu air limbah dari proses dyeing

" (jam)	H ₂ O ₂ 0,1%		H ₂ O ₂ 0,5 %		H ₂ O ₂ 1%	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%
0	107	0,00	75,60	0,00	52,20	0,00
1	53,4	50,09	48,30	36,11	30,80	41,00
2	52	51,40	45,60	39,68	33,10	36,59
3	51,7	51,68	43,00	43,12	32,90	36,97
4	53,5	50,00	44,20	41,53	30,20	42,15
5	52,75	50,70	42,40	43,92	30,40	41,76
6	52	51,40	44,40	41,27	31,60	41,38
7	57,8	45,98	37,70	50,13	31,60	39,46
8	54	49,53	39,40	47,88	27,70	46,93
9	53,3	50,19	36,50	51,72	30,70	41,19



Gambar 4.5. Penurunan TOC pada proses degradasi fotokatalitik semi kontinyu air limbah dari proses dyeing

Selain dilakukan uji COD juga dilakukan uji TOC (Total Organic Carbon) sebagai cross check proses degradasi ini. Hasilnya bisa dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.5. Konsentrasi peroksida 0,1%, 0,5% dan 1% pada waktu degradasi 9 jam menghasilkan prosentase penurunan TOC berturut-turut 50,19%, 51,72% dan 41,19%.

KESIMPULAN

- Katalis TiO_2/Ti yang telah dibuat secara *anodizing* pada kondisi 40 V selama 2 jam telah menghasilkan kristal jenis anatase dengan ukuran 8 – 13 nm bentuk nanotube dengan kisaran diameter tube antara 30 - 110 nm.
- Reaktor fotokatalitik *rotating drum* telah diuji cobakan di PT. APAC INTI CORPORA. Hasil uji coba menunjukkan bahwa degradasi secara fotokatalitik terhadap air limbah dari unit dyeing pewarna indigo dengan penambahan peroksida 0,5% dalam waktu 2 jam dan 9 jam bisa menurunkan COD 72,12% dan 79,18%.

DAFTAR PUSTAKA

1. Andayani, W., 2001, Degradasi Pentaklorofenol dalam air secara fotokatalitik dengan TiO_2 yang diimmobilisasikan pada logam titanium : evolusi senyawa intermediet, Tesis magister Ilmu Kimia, Program Pasca Sarjana FMIPA UI.
2. Chen, X., Mao, S., S., 2007, Titanium Dioxide Nanomaterial: Synthesis, Properties, Modification and Application, *Chem Rev*, **107**, 2891-2959.
3. Craig A. Grimes, and Gopal K. Mor 2009, TiO_2 "Nanotube Arrays, Synthesis, Properties, and Applications", Springer Dordrecht Heidelberg, London New York
4. Dionysios D. Dionysiou, Arturo A. Burbano, Makram T. Suidan, Isabelle Baudin and Jean-michel Laine, 2002, Effect of Oksigen in a Thin-Film Rotating Disk Photocatalytic Reactor , *Environ. Sci. Technol*, 2002, 36, 3834-3843.
5. Fujishima, A., K. Hashimoto, T. Watanabe, 1997, *TiO₂ photocatalysis fundamental and applications*, BKC Inc., Tokyo.
6. Hoffman M. R., S. T. Martin, W. Choi., D.W. Bahnemann, 1995, Environmental Application of Semiconductor Photocatalysis, *Chem. Rev.*, **95**, 69-96

7. Ike.Y, Yuni K. Krisnadi, Riwandi Sihombing dan Jarnuzi Gunlazuardi, 2006, Degradasi Linear LAS secara Fotokatalitik dengan TiO₂ yang diimobilisasi pada dinding bagian dalam kolom gelas, Seminar Nasional MKICS, UI, Jakarta.
8. Jiang, D., 2004, Studies of photocatalytic processes at nanoporous TiO₂ film electrode by photoelectrochemical techniques and development of a novel methodology for rapid determination of chemical oxygen demand, Thesis, Griffith University, Australia
9. Linsebigler, A. L., L. Guanguan, J. T. Yates, 1995, Photocatalysis on TiO₂ surface: principles, mechanism and selected results, *Chem. Rev*, **95**, 735-758.
10. 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**, 4, 331–337