

SINTESIS NANOPARTIKEL TITANIUM(IV) OKSIDA-BESI UNTUK FOTODEGRADASI PESTISIDA SIPERNIETRIN

Diana Rakhmawaty Eddy*, Andika Triputra F, Rustaman

Laboratorium Kimia Material, Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetaahuan Alam, Universitas Padjadjaran
11. Raya Bandung-Sumedang Km. 21 Jatinangor 45363
Email : diana.ralimawatigunpad.acid

IN TISARI

Pada umumnya TiO_2 murni memiliki *band gap* yang besar. Proses doping terbukti efektif untuk mempertajam dan meningkatkan aktivitas fotokatalis. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensintesis fotokatalis titanium(IV) oksida-besi yang dapat rндеgradasi pestisida sipermetrin. Metode sintesis yang digunakan adalah metode sol-gel. Padatan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ dilarutkan ke dalam akuabides lalu ditambahkan $TiCl_4$ sambil diaduk. Langan yang didapat ditambahkan NI-1,4011 sampai pH 7. Endapan yang didapat lalu disentrifugasi kemudian dicuci dengan air hingga bebas ion dan dikalsinasi dengan suhu $350^\circ C$. Selanjutnya dikarakterisasi menggunakan SEM didapatkan morfologi Fe-Ti O_2 berbentuk granula dan basil XRD diketahui bahwa Fe-Ti O_2 memiliki struktur nail dengan *particle size* sebesar 17,95 nm. Uji aktivitas fotokatalitik dilakukan terhadap pestisida sipermetrin didapatkan aktivitas fotokatalisis tertinggi pada fotokatalis Fe-Ti O_2 5% b/b sebesar 41,99% pada etilbenzenadan 44,01% pada o-xilena.

Kata Kunci: Fe-Ti O_2 , fotokatalis, pestisida sipennetrin, doping, fotodegradasi.

ABSTRACT

Generally pure TiO_2 have a large of band gap. Doping was proved to be effective to narrow and increases photocatalytic activity. The purpose of this research is to syntesize titasnium{119 oxide doped with iron that can degrade cypermethrin. The syntesize method which used in this research is the sol-gel method. Firts the $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ is dissolved in aquabidistilata then add $TiCl_4$ solution under stirring. The obtained solution was added NH_4OH until the pH is 7. The obtained precipitate was centrifuge, then washed with water until CL ion was negative then calcinated at $350^\circ C$. The sampel was characterized using SEM, obtained that the moifology is garanule and XRD result shown that the structure is rutile with particle size about 17.95 nm. After that done the photocatalytic activity test against cypermethrin. From the results of this research, obtained that the highest photocalatylic is the Fe-Ti O_2 5 wt% is 41.99% for etylbenzene and 44.01% for o-xylene.

Keywords: Fe-Ti O_2 , photocatalyst, cypermethrin pesticides, doping, photodegradation.

PENDAHULUAN

Penggunaan pestisida di bidang pertanian dan perkebunan pada tahun 2005 mengalami peningkatan secara kuantitas (Kundua, et al., 2005). Pestisida merupakan senyawa yang membunuh atau mengendalikan organisme yang tidak diinginkan. Pestisida memiliki ciri umum yaitu menghambat proses metabolik vital dan organisme yang tidak diinginkan (Baird & Cann, 2008). Pestisida merupakan senyawa organik yang sulit didegradasi secara alami (Kaushik, et al., 2010).

Berbagai jenis pestisida sudah banyak digunakan untuk menangani masalah hama pada tanaman, salah satunya adalah sipermetrin. Sipermetrin merupakan insektisida piretroid sintetis yang digunakan untuk membunuh serangga pada tanaman kapas dan selada, untuk membunuh kecoa, kutu, dan rayap. Sipermetrin merupakan racun bagi sistem saraf. Sipermetrin juga menekan sistem kekebalan tubuh, dan menghambat pembentukan antibodi (Cox, 1996).

Selain dapat meningkatkan hasil pertanian dan perkebunan, pestisida juga dapat mencemari lingkungan sebagai dampak dari penggunaannya. Sisa penggunaan pestisida yang tidak terserap oleh tanaman dapat terserap oleh tanah dan

terbawa oleh aliran air (Lagana, et al., 2000).

Saat ini sudah banyak metode yang dapat digunakan untuk menanggulangi pencemaran dari pestisida terhadap lingkungan, salah satunya adalah menggunakan fotokatalis untuk fotodegradasi. Proses ini banyak digunakan karena energi yang dibutuhkan untuk melakukan degradasi didapat dari energi radiasi cahaya matahari (Malato et al., 1999). Salah satu fotokatalis yang sering digunakan untuk proses fotodegradasi adalah titanium dioksida. Titanium dioksida merupakan material yang telah digunakan secara luas sebagai pigmen pada cat, pasta gigi, dan sebagai fotokatalis. Titanium dioksida memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan-polutan organik maupun anorganik, sehingga titanium dioksida dapat menjadi solusi dalam pemecahan masalah lingkungan seperti pengolahan limbah cair (Kokila et al., 2011).

Dibandingkan dengan fotokatalis lain, titanium dioksida memiliki banyak keunggulan yaitu sifatnya yang non toksik, stabilitasnya yang tinggi, harganya yang relatif murah, dan kelimpahannya yang tinggi. Namun dibalik keunggulan yang ditawarkan oleh titanium dioksida, ternyata titanium dioksida jika digunakan sebagai

fotokatalis masih memiliki kekurangan yaitu *band gap* yang cukup tinggi (sekitar 3,2 eV). Hal tersebut menyebabkan terbatasnya penggunaan titanium dioksida yang hanya mampu menyerap cahaya UV saja. Untuk menanggulangi masalah tersebut, dilakukan berbagai modifikasi terhadap titanium dioksida. Salah satunya adalah dengan mendoping titanium dioksida dengan berbagai macam logam transisi (Kokila et al., 2011).

Salah satu logam transisi yang banyak digunakan untuk mendoping titanium dioksida adalah logam Fe, hal tersebut karena logam Fe memiliki konfigurasi orbital d yang setengah penuh. Dilaporkan oleh Yu, et al., bahwa aktivitas fotokatalitik dari *Fe-doped titanat nanotube* adalah 2 kali lebih tinggi dari pada titanium dioksida degussa di bawah pencahayaan oleh sinar tampak. Aktivitas fotokatalis di bawah pencahayaan sinar UV awalnya akan meningkat dan kemudian menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi Fe (Wen, et al., 2012).

Pada penelitian kali ini, dilakukan sintesis Fe-TiO₂ yang akan digunakan untuk mendegradasi pestisida sipermetrin.

TINJAUAN PUSTAKA

Fotokatalisis

Fotokatalisis merupakan suatu proses kombinasi antara proses fotokimia dan

katalis, yaitu suatu proses degradasi secara kimiawi dengan melibatkan cahaya sebagai pemicu dan katalis sebagai pemercepat proses transformasi tersebut. Jika suatu semikonduktor dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan tereksitasi ke pita konduksi, dan meninggalkan *hole* (h^+) pada pita valensi (Gunlazuardi, 2001; Slamet, et al., 2007).

Beberapa jenis semikonduktor yang dapat dipakai untuk proses fotokatalisis dari kelompok oksida misalnya: TiO₂, Fe₂O₃, ZnO, W₃O₉, dan SnO₂, sedangkan dari kelompok sulfida adalah CdS, ZnS, CuS, dan FeS. Diantara sekian banyak jenis semikonduktor, hingga saat ini serbuk TiO₂ (terutama dalam bentuk kristal anatase) memiliki aktivitas fotokatalis yang tinggi, stabil dan tidak beracun. Secara komersial serbuk TiO₂ juga mudah didapat dan diproduksi dalam jumlah besar (Slamet, et al., 2007).

Titanium Dioksida

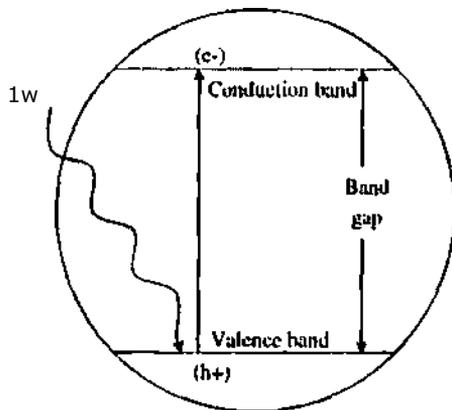
Setelah penelitian yang dilakukan oleh Fujishima dan Honda pada tahun 1972 yang mengungkapkan kemampuan fotoelektrokimia titanium(IV) oksida yang dapat mendekomposisikan air menjadi gas oksigen dan gas hidrogen pada kondisi diradiasi oleh sinar UV, Titanium(IV)

- oksida telah menarik perhatian banyak peneliti selama bertahun-tahun. Sehingga sekarang ini banyak penelitian mengenai degradasi polutan organik dengan menggunakan beberapa semikonduktor (Chen & Mao, 2007; Fujishima, et al., 2007; Ni, et al., 2007; Wen et al., 2012). Banyak peneliti setuju bahwa TiO₂ adalah fotokatalis terbaik untuk lingkungan. Keunggulan TiO₂ dibanding fotokatalis yang lainnya yaitu aktivitas yang tinggi, stabilitas yang tinggi terhadap sinar UV, dan bersifat nontoxic (Kaneko & Okura, 2002).

Daya oksidasi kuat radikal hidroksil dan superoksida terbukti dapat menghancurkan polutan dan mikroorganisme. Pada awalnya para peneliti menggunakan reaktor sistem suspensi untuk melaksanakan reaksi fotokatalitik, dimana TiO₂ disuspensikan ke dalam air yang diolah lalu diiluminasi dengan sinar UV yang sesuai. Dengan sistem suspensi ini muncul kendala teknis dalam hal memisahkan atau mengambil kembali suspensi TiO₂ dari air yang telah diolah. Pada saat ini, reaktor dengan sistem TiO₂ yang diamobilisasi pada bahan penyangga yang sesuai, dipandang mempunyai prospek aplikasi yang lebih baik. TiO₂ biasanya diolah menjadi film tipis sebelum digunakan untuk keperluan

degradasi zat-zat organik secara fotokatalitik (Gunlazuardi, 2001).

Berikut adalah skema ilustrasi fotokatalisis TiO₂



Gambar 1. Skema Ilustrasi Fotokatalisis TiO₂(Hanaor & Sorrell, 2011)

METODE PENELITIAN

Pembuatan fotokatalis Fe-TiO₂

Nanopowder Fe-TiO₂ dibuat dengan metode sol-gel. FeC_{13.6H₂₀} dilarutkan dengan 200,0 mL akuabides. Kemudian dimasukkan 5,0 mL TiC₁₄ tetes demi tetes ke dalam larutan FeC_{13.6H₂₀} sambil diaduk selama 2 jam. Setelah diaduk selama 2 jam pada suhu ruang, dispersi yang didapat dipanaskan pada suhu 50°C sambil diaduk selama 16 jam. Endapan yang didapat kemudian disentrifugasi dan dicuci dengan akuades lalu ditambahkan amonium hidroksida pekat sampai pH 7. Selanjutnya endapan yang didapat disaring dan dicuci dengan akuades sampai bebas

ion Cr. Kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 2 jam, lalu dikalsinasi pada suhu 350°C selama 4 jam.

Karakterisasi

Karakterisasi yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi, analisis morfologi menggunakan *scanning electron microscope* (SEM), dan analisis struktur kristal menggunakan *x-ray diffraction* (XRD).

Uji fotodegradasi pestisida sipermetrin

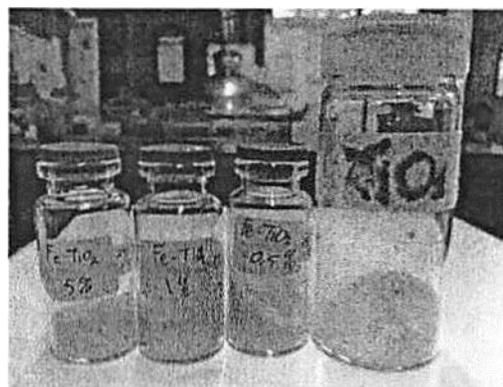
Larutan sipermetrin dibuat konsentrasi 250 ppm sebanyak 1 liter. Larutan diambil 50 mL dan dimasukkan ke tabung kuarsa kemudian ditambah 50 mg fotokatalis. Setelah itu diiradiasi dengan lampu UV selama 3 jam. Sampel yang didapatkan diambil 50 mL untuk dianalisis menggunakan GC-MS. Setelah itu dilihat penurunan persen sipermetrinnya pada setiap fotokatalis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

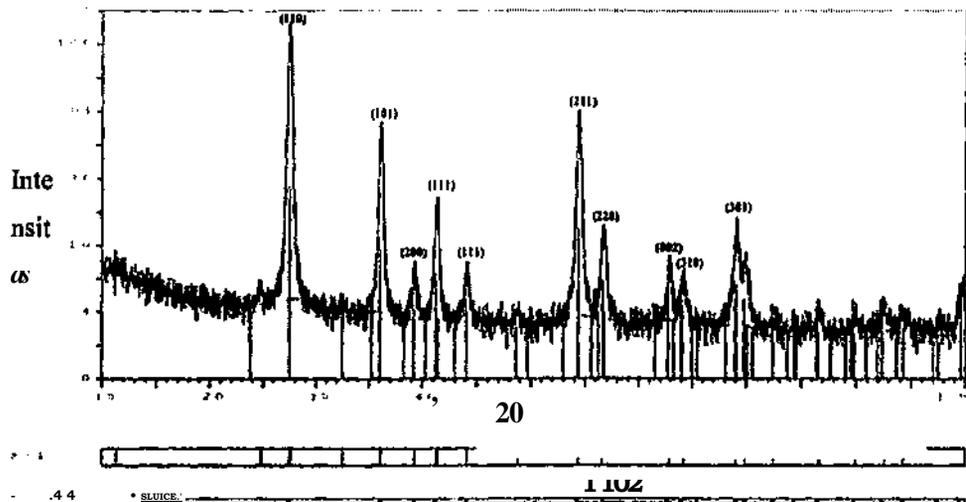
Fotokatalis titanium(IV) oksida-besi disintesis dengan 3 variasi konsentrasi untuk mengetahui pengaruh konsentrasi besi terhadap aktifitas dari fotokatalis. Besi(II) klorida yang digunakan untuk mensintesis Fe-TiO₂ 0,5% bib sebanyak

0,0305 g, untuk mensintesis Fe-TiO₂ 1% bib sebanyak 0,0610 g, dan sebanyak 0,3052 gram untuk mensintesis Fe-TiO₂ 5% b/b Gambar 2 merupakan fotokatalis Fe-TiO₂ yang telah disintesis berwarna kuning, sedangkan warna dari TiO₂ MUM i berwarna putih. Perubahan warna dari putih menjadi kuning disebabkan adanya logam besi yang terdoping ke dalam TiO₂.

Pada Gambar 3, dapat dilihat pola difraksi dari Fe-TiO₂. Dan pola difraksi tersebut dapat dilihat bahwa struktur kristal yang terbentuk adalah struktur rutil, walaupun secara teori kalsinasi pada suhu rendah (350-400°C) seharusnya menghasilkan anatase. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya Fe yang ditambah berpengaruh terhadap bentuk struktur menjadi rutil.



Gambar 2. Fotokatalis (1) TiO₂ P25 Degussa, (2) Fe-TiO₂ 0,5% b/b hasil sintesis, (3) Fe-TiO₂ 1% bib hasil sintesis, dan (4) Fe-TiO₂ 5% b/b hasil sintesis



Gambar 3. Difraktogram dan Fe-TiO₂ 0,5% b/b

Dari data XRD selain untuk mengetahui 'struktur kristal dari Fe-TiO₂, dapat juga digunakan untuk mengetahui *particle size* dengan menggunakan persamaan scherrer,

$$t = \frac{k\lambda}{\Delta 2\theta \cos \theta}$$

Dimana t merupakan ukuran partikel (Å), k merupakan panjang gelombang yang digunakan dalam analisis (A), k merupakan konstanta kekasaran permukaan sampel (0,92), B merupakan lebar puncak terkoreksi (radian), dan θ merupakan sudut Bragg (°) (Ratnasari, et al., 2009).

Dengan menggunakan persamaan scherrer, dapat diperkirakan bahwa *particle size* dari Fe-TiO₂ sebesar 15,83 nm ditinjau pada 20 27,5 derajat, 19,85 nm ditinjau dari 20 36,6 derajat, dan 17,95 nm ditinjau dari 20 54,4 derajat. Hal tersebut

dapat membuktikan bahwa Fe-TiO₂ yang disintesis berukuran nanometer.

Morfologi dari Fe-TiO₂ 0,5% b/b pada perbesaran 30000 kali memiliki bentuk granula dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil

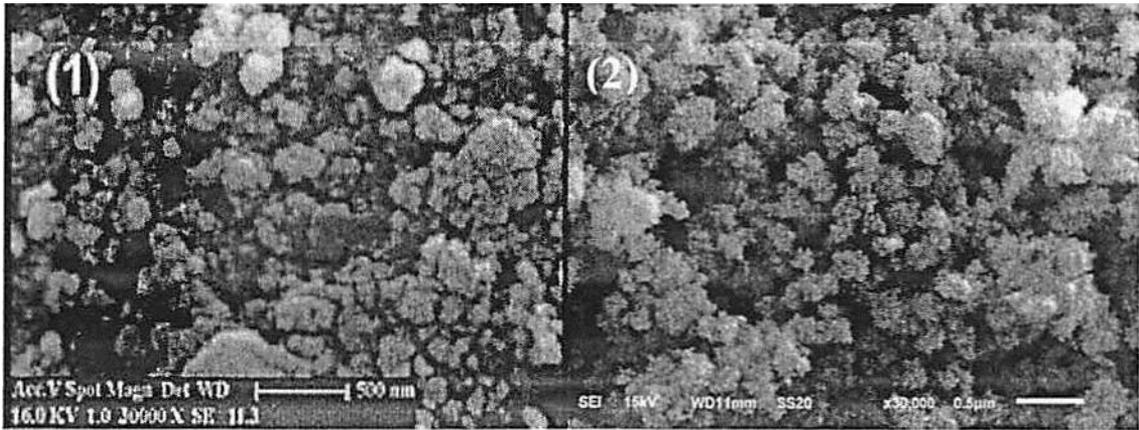
SEM dari Fe TiO₂ 0,5% b/b yang disintesis dibandingkan dengan hasil SEM TiO₂ murni pada penelitian Shahrul dan Hossain tahun 2011. Morfologi Fe-TiO₂

0,5% b/b yang disintesis tidak memiliki perbedaan

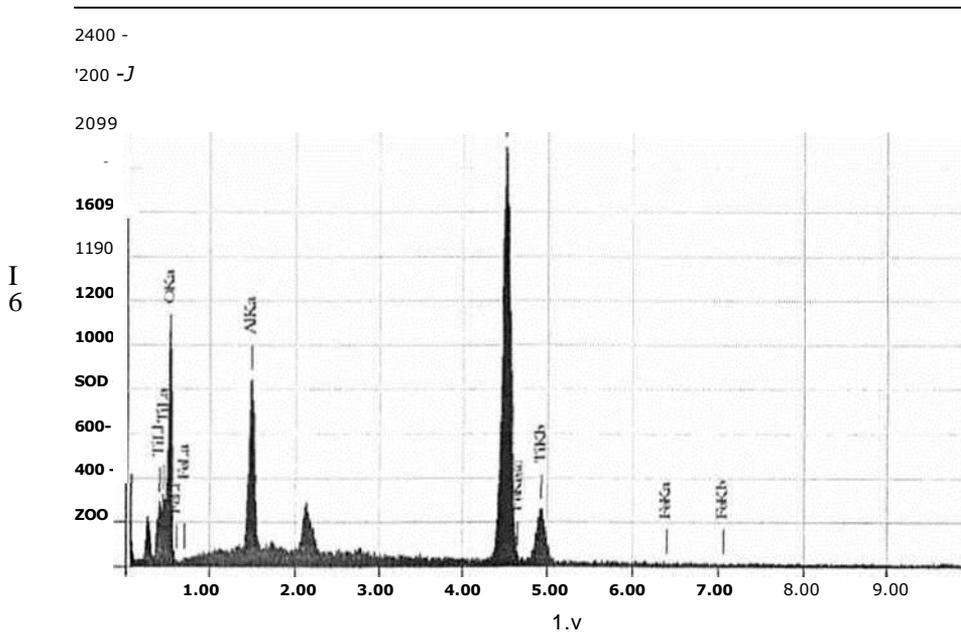
yang signifikan dibandingkan dengan TiO₂ murni. Hal tersebut menunjukkan bahwa

logam Fe masuk ke dalam kisi kristal dari TiO₂. Komposisi dari logam Fe lebih kecil dari yang dihitung secara teoritis. Pada saat sintesis dibuat konsentrasi Fe sebesar 0,5% b/b namun pada hasil analisis SEM-EDX

terlihat bahwa komposisi Fe yang sebenarnya sebesar 0,03% b/b.



Gambar 4. Mikrograf hasil karakterisasi SEM (1) TiO₂ perbesaran 30.000 kali (Shahruz & Hossain, 2011) dan (2) Fe-TiO₂ 0,5% b/b hasil sintesis perbesaran 30.000 kali.



Element	(key)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass% Cation	K
K	Al	0.525	52.42	0.34	75.07		21.9E
K	Fe	1.486	5.86	0.08	4.98		7.6(
Total		4.508	41.68	0.19	19.94		70.3[
		6.398	0.03	0.42	0.01		0.0'
			100.00		100.00		

Gambar 5. Difraktogram SEM-EDX dari Fe-TiO₂ 0,5% b/b

Hasil SEM-EDX dapat dilihat pada Gambar 5. Setelah diketahui morfologi dan bentuk kristal dari Fe-TiO₂ yang disintesis, dilanjutkan dengan uji aktivitas fotokatalisnya. Untuk menguji aktivitas fotokatalisnya dilakukan proses fotodegradasi dari Fe-TiO₂ terhadap pestisida sipermetrin. Sipermetrin dipilih karena merupakan salah satu pestisida yang banyak di Indonesia. Pestisida sipermetrin merupakan insektisida piretroid sintetik, dan merupakan pestisida golongan organoklorin. Sipermetrin ini bersifat stabil dan tidak mudah terdegradasi secara alami.

Uji aktivitas fotokatalis Fe-TiO₂ terhadap pestisida sipermetrin dilakukan iradiasi selama 3 jam. Setelah diiradiasi selama 3 jam dan diambil 50 mL sampel, kemudian tiap sampel dianalisis dengan menggunakan kromatografi gas — spektroskopi massa (GC-MS). Setelah didapat data hasil GC-MS, kemudian dilihat hasil penurunan konsentrasi dari sipermetrin dan dibandingkan setiap variasi konsentrasinya dengan standar sipermetrin. Dapat dilihat pada Tabel 1 menyatakan persen area dari etilbenzena dan o-xilena pada sipermetrin setelah dan sebelum fotodegradasi. Gambar 6 menunjukkan penurunan *persen* area etilbenzena pada pestisida sipermetrin. Degradasi dengan menggunakan TiO₂ P25, terdapat penurunan persen area etilbenzena sebesar 0,24%, dari 2,81% menjadi 2,57%. Degradasi dengan menggunakan Fe-TiO₂ 0,5% b/b, terdapat penurunan persen area etilbenzena sebesar 0,57%, dari 2,81% menjadi 2,24%. Degradasi dengan menggunakan Fe-

TiO₂ 1% b/b, terdapat penurunan persen area etilbenzena sebesar 1,18%, dari 2,81% menjadi 1,63%. Degradasi dengan menggunakan Fe-TiO₂ 5% b/b, terdapat penurunan persen area etilbenzena sebesar 1,18%, dari 2,81% menjadi 1,63%.

Pada Gambar 6, degradasi dengan menggunakan TiO₂ P25, terdapat penurunan persen area o-xilena sebesar 0,28%, dari 2,84% menjadi 2,56%.

Tabel 1 Persen area etilbenzena dan o-xilena pada pestisida sipermetrin.

Fotokatalis		% area etilbenzena	% area o-xilena
Sebelum fotodegradasi	Tanpa fotokatalis	2,81	2,84
	TiO ₂ P25	2,57	2,56
Setelah fotodegradasi	Fe-TiO ₂ 0,5% b/b	2,24	2,20
	Fe-TiO ₂ 1% b/b	1,63	1,72
	Fe-TiO ₂ 5% b/b	1,63	1,59

Degradasi dengan menggunakan Fe-TiO₂ 0,5% b/b, terdapat penurunan persen area o-xilena sebesar 0,64%, dari 2,84% menjadi 2,2%. Degradasi dengan menggunakan Fe-TiO₂ 1% b/b, terdapat penurunan persen area o-xilena sebesar 1,12%, dari 2,84% menjadi 1,12%. Degradasi dengan menggunakan Fe-TiO₂ 5% b/b, terdapat penurunan persen area o-xilena sebesar 1,25%, dari 2,41% menjadi 1,59%.

Pada Gambar 6 dapat dilihat penurunan persen area etilbenzena dari sipermetrin yang telah didegradasi dengan menggunakan fotokatalis TiO₂ P25 memiliki kemampuan degradasi

sebesar 8,54%, dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 0,5% b/b memiliki kemampuan degradasi sebesar 20,28%, dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 1% b/b memiliki kemampuan degradasi 41,99%, dan dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 5% b/b memiliki kemampuan degradasi sebesar 41,99%.

Pada Gambar 7 dapat dilihat juga penurunan persen area dari o-xilena pada

sipermetrin yang telah didegradasi dengan menggunakan fotokatalis TiO₂ P25 memiliki kemampuan degradasi sebesar 9,85%, dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 0,5% b/b memiliki kemampuan degradasi sebesar 22,53%, dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 1% b/b memiliki kemampuan degradasi sebesar 39,43%, dan dengan menggunakan fotokatalis Fe-TiO₂ 5% b/b memiliki kemampuan degradasi sebesar 44,01%.

Hasil degradasi yang paling baik adalah Fe-TiO₂ 5% b/b. Hasil degradasi dengan fotokatalis Fe-TiO₂ 5% b/b menunjukkan penurunan persen area etilbenzena mengalami penurunan sebesar 41,99% dan pada penurunan persen area o-xilena mengalami penurunan 44,01%. Pada penelitian Abazović *et. al.*, 2009 dan Wen *et. al.*, 2012 mengungkapkan bahwa semakin tinggi konsentrasi Fe pada TiO₂ dapat menurunkan aktivitas dan fotokatalis TiO₂. Pada penelitian ini didapatkan hasil fotodegradasi yang paling baik pada konsentrasi 5% b/b, hal tersebut terjadi karena konsentrasi Fe yang sebenarnya

terdoping pada TiO₂ lebih kecil dari yang diharapkan saat sintesis. Dari hasil SEM-EDX terlihat bahwa konsentrasi Fe yang sebenarnya pada Fe-TiO₂ 0,5% b/b yaitu sebesar 0,03% b/b massa, dan diperkirakan konsentrasi Fe yang sebenarnya pada Fe-TiO₂ 1% b/b yaitu sebesar 0,06% b/b dan diperkirakan konsentrasi Fe yang sebenarnya pada Fe-TiO₂ 5% b/b yaitu sebesar 0,3% b/b. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Wen *et al.*, 2012 yang mengungkapkan bahwa Fe-TiO₂ dengan konsentrasi Fe sebesar 0,3% b/b memiliki aktivitas fotokatalitik yang paling optimal.

Pada penelitian Wen, *et al.*, 2012 mengungkapkan bahwa penambahan konsentrasi Fe yang paling optimal adalah sebesar 0,3% b/b dan aktivitasnya akan menurun seiring penambahan konsentrasi Fe.

KESIMPULAN

Titanium(IV) oksida-besi secara morfologi hampir sama dengan titanium(IV) oksida murni, namun pada titanium(IV) oksida-besi terjadi perubahan warna dari putih menjadi kuning. Fe-TiO₂ yang disintesis memiliki struktur rutil dengan *particle size* sebesar 17,95 nm.

Fotokatalis titanium(IV) oksida-besi 0,5% b/b, 1% b/b, dan 5% b/b dapat digunakan untuk mendegradasi pestisida sipermetrin. Didapatkan hasil fotodegradasi yang optimum yaitu pada titanium(IV) oksida-besi 5% b/b yang dapat menurunkan persen area sipermetrin sebesar 41,99% pada etilbenzena dan 44,01% pada o-xilena.

DAFTAR PUSTAKA

- Azizi,R., Rosuouli,S., Ahmadi,N., Kolaei,J. & Azizi,M. 2012. *A Systematic Investigation of Experimental Conditions o the Particle Size and Structure of TiO₂ Nanoparticle Synthezed by A Sol-gel Method*. Nanometrology Centre, Tehran.
- Baird, C. & Cann, M. 2008. *Environmental Chemistry, Fourth Edition*. W. H. Freeman and Company. New York.
- Brinker C. J. & Sherer G. W. 1990. *Sol-Gel Science*, Academic Press, San Diego.
- Calvert, C. A. 2010. <http://tsciconsulting.blogspot.com/2010/10/characterization-necessary-for.html>.
- Chen, X. & S. S. Mao. 2007 *Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis. Properties, Modifications, and Applications*, *Chem. Rev.* 107.2891-2959
- Cox, C. 1996. *Insecticide Factsheet, Cypermethlyn. journal of pesticide reform/summer 1996 • vol.16, no. 2.*
- El-Maazawi, M., Finken, A.N., Nair, A.B.& Grassian, A.V. 2000, *Adsorption and Photocatalytic Oxidation of Acetone on TiO₂: An in Situ Transmission FT-IR Study*, *J. Catal.*, 191, hal. 138-146.
- Fitriah. 1998. *Desinfeksi Air Secara Fotoelektrokatalisis dengan Menggunakan Laplsan TiO₂ yang Diimobilisasi pada Logam Titanium*. Skripsi, FMIPA, UI, Depok
- Fujishima, A., X. Zhang, D. A. & Tryk. 2007. *Heterogenous Photocatalysis: from Water Photolysis to Applications in Environmental Cleanup*, *Int. J. Hydrogen Energy* 31. 14841488
- Gunlazuardi, J. 2001, *Fotokatalisis pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya*, Seminar Nasional Kimia Fisika H.
- Hanaor, D. A. & Sorrell, C. C. 2011. *Review of the anatase to rutile phase transformation*. *J Mater Sci* (2011) 46:855-874. Sidney.
- Hardiananto. 2011. *Teknologi Sol-gel*. <https://hardiananto.wordpress.com/2011/01/17/teknologi-sol-gel/>
- Honda, K & A, Fujishima. 1972. *Nature* 238, 37; 1972. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 44, 1184.
- Kaneko,M.& Okura, I. 2002. *Photocatalyst, Science and Technology*. Amazon. Japan.
- Khausik, A., H. R. Sharma, S. Jaun, J. Dawra & C. P. Khausik. 2010. *Pesticides Pollution of River Ghaggar in Haryana, India*. *Environ, Monit. Assess.* 160.61-69.
- Kokila, P., Senthilkumar, V., Nazeer, K. P. 2011. *Preparation and Photocatalytic Activity of Fe³⁺ -Doped TiO₂ Nanoparticles*. *Archives of Physics Reasearch*, 2011,2 (1): 246-253.
- Kundua, S., A. Pala & A. K. Dikshitb. 2005. *UV Induced Degradation of Herbicide 2, 4-D: Kinetics, Mechanism and Effect of Various Conditions on Degradation, Separation and Purification Technilogy*, 44. 121-129

Lagana, A., A. Bacaloni, I. D. Leva, A. Faberi, G. Fogo & A. Marino. 2000, *Occurrence and Determination of Herbicides and Their Major Transformation Product in Environmental Waters. Analytica Chimica Acta, Vol. 462. 187-197.*

Li, Y., Li, X., and Yin. 2005, *Photocatalytic Degradation of Methyl Orange in a Sparged Tube Reactor with TiO₂-Coated Activated Carbon Composites, Catal.commun., 6, hal. 650-655.*

Liu, J., Yang, R., & Li, S. 2006. *Preparation and Application of Efficient TiO₂ Photocatalyst, J. Environ. Sci, 5, hal. 979-982.*

Malato, S., J. Blanco, J. M. Herrman & Catal, 1999. *Today 54. 191-377*

Matos, J., Laine, J., and Herrmann, J. M., 2001. *Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania, J. Catal., 200, hal. 10-20.*

Ni, M., M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung & K. Sumathy. 2007. *A Review and Recent Developments in Photocatalytic Water-Splitting Using TiO₂ for Hydrogen Production, Renew, Sustain. Energy Rev. 11.401-425.*

Pike, L. & Wilmington. 2008. *Scanning Electron Microscopy (SEM) & Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS).* www.micronanalytical.com/sem.html

Purwanto, A. 2008. *Synthesis Nanopartikel dengan Metode Sol-Gel.*

<https://aguspur.wordpress.com/2008/10/17/syn-thesis-nanopartikel-metode-sol-gel/>.

Rahman, R. 2008. *Pengaruh Proses Pengeringan, Anil, dan Hidrotermal Terhadap Kristalinitas Nanopartikel TiO₂ Hasil Proses Sol-Gel. Departemen Metalurgi dan Mineral UI. Depok.*

Ratnasari, D., S. Hermanihadi, W. Indriyanto, A. Fathony, F. W. H. Devi, P. R. I. Agung & Y.R. Amin. 2009. *X-Ray Diffraction (XRD).* Universitas Sebelas Maret.

Schweitzer, 2009. *Scanning Electron Microscopy (SEM).* <http://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scamting-electron-microscopy/>

Shahruz, N. & M. M. Hossain. 2011. *Synthesis and Size-Control of TiO₂ Photocatalyst Nanoparticles Preparation Using Sol-Gel Method. World Applied Sciences Journal 12 (11): 1981-1986.*

Slamet, Bismo, S. dan Rita, A., 2007. *Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk Degradasi Polutan Organik, Laporan Penelitian Hibah Bersaing, Universitas Indonesia.*

Slamet, Nasution, H.W., Purnama, E., Kosela, S., Gunlaivardi, J. 2005. *Photocatalytic Reduction of CO₂ on Copper-doped Titania Catalysts Prepared by Improved-impregnation Method. Catal.*

Commun., 6, hal. 313-319.

Tjahjanto, R. T. & Gunlazuardi, J. 2001. *Preparasi Lapisan Tipis TiO₂ sebagai Fotokatalis: Keterkaitan antara Ketebalan dan Akticitas Fotokatalisis*, Jurnal Penelitian Universitas Indonesia:Vol.5 No. 2 Seri Sains, Desember 2001.

Torimoto, T., Ito, S., Kuwabata, S., dan Yoneyama, H.1996. *Effects of Adsorbents Used as Supports for TiO₂ Loading on Photocatalytic Degradation of Propylamide*, *Environ.Sci. Technol.*, 30, hal. 1275-1281.

Wen, L., Liu, B., Zhao, X., Nakata, K., Murakami, T., & Fujishima, A. 2012. *Synthesis, Characterization, and Photocatalysis of Fe-Doped TiO₂: A Combined Experimental and Theoretical Study*. Hindawi Publishing Corporation *International Journal of Photoenergy* Volume 2012, Article ID 368750, 10 pages doi:10.1155/2012/368750

United States Environmental Protection Agency. 1989. Cypermethrin Pesticide Fact Sheet. Washington, D. C.