

Pengaruh Jenis Prekursor dan Suhu Kalsinasi terhadap Karakteristik Komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dan Aplikasinya dalam Degradasi Rhodamin B

E Wiyono[✉], F W Mahatmanti, S. Priatmoko

Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima 11 Januari 2018
Disetujui 23 Maret 2018
Dipublikasikan 1 April 2018

Keywords:

TiO_2 Precursor's, Calcination Temperature, $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ Composites, Rhodamine B.

Abstrak

Rhodamin B merupakan zat warna yang membahayakan jika terpapar langsung sehingga perlu pengolahan khusus. Salah satu upaya pengolahannya adalah dengan fotodegradasi menggunakan material semikonduktor dan radiasi sinar ultraviolet. Titanium dioksida (TiO_2) merupakan fotokatalis yang sangat baik dan dengan substrat SiO_2 dapat menyediakan situs adsorpsi yang dapat mendukung TiO_2 dalam mendegradasi senyawa organik. Telah dilakukan penelitian tentang sintesis fotokatalis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ untuk: (i) mengetahui pengaruh jenis prekursor TiO_2 dan suhu kalsinasi terhadap karakteristik komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, (ii) mengetahui pengaruh pH larutan awal terhadap degradasi zat warna rhodamin B oleh komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$. Komposit disintesis dengan metode sol-gel menggunakan titanium (IV) isopropoksida, titanium (IV) butoksida sebagai prekursor TiO_2 , dan tetraorthosilikat sebagai prekursor SiO_2 . Proses kalsinasi dilakukan pada suhu 500, 600 dan 700°C. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ amorf, SiO_2 berfungsi sebagai *host* dari TiO_2 . Hasil karakterisasi DR-UV menunjukkan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ memiliki nilai *band gap* terkecil sebesar 3,34 eV. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan ikatan Si-O-Si, Si-O-Ti dan Ti-O pada bilangan gelombang 1083,61 cm^{-1} ; 951,89 cm^{-1} ; dan 660,62 cm^{-1} . Hasil uji degradasi rhodamin B menunjukkan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ yang disintesis menggunakan TiIPP dan suhu kalsinasi 600°C memiliki aktivitas fotokatalitik tertinggi dengan persentase degradasi sebesar 56,63% dan menunjukkan aktivitas fotokatalitik tertinggi pada pH 9 sebesar 60,92% selama 3 jam.

Abstract

Rhodamine B is a coloring substance that endangers if exposed directly so that special processing is needed. One of the processing efforts is by photodegradation using semiconductor materials and ultraviolet radiation. Titanium dioxide (TiO_2) is a very good photocatalyst and with SiO_2 substrate can provide adsorption sites that can support TiO_2 in degrading organic compounds. The research of the synthesis of $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ photocatalyst composite has been done. The aims of this research is to: (i) study the effect of TiO_2 precursor and the calcination temperature of the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ composite characteristics, (ii) the effect of initial pH of solution to the degradation of rhodamine B dye by $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ composite. Synthesis of composite prepared by sol-gel method using titanium (IV) isopropoxide, titanium (IV) butoxide as a precursor of TiO_2 , and tetraorthosilicate as a precursor of SiO_2 . Calcination process at a temperature of 500, 600 and 700°C. XRD characterization results indicate $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ composite amorphous and amorphous SiO_2 which functions as host of TiO_2 . DR-UV characterization results that $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ composites has the smallest value of band gap is 3,34 eV. FTIR characterization results indicate a bond Si-O-Si, Si-O-Ti and Ti-O at 1083,61 cm^{-1} ; 951,89 cm^{-1} ; and 660,62 cm^{-1} wavenumbers. The results of degradation of rhodamine B shows the composite $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ synthesized using TiIPP and calcination temperature of 600°C has the highest photocatalytic activity with the degradation percentage is 56,63% and showed the highest photocatalytic activity at pH 9 is 60,92% for 3 hours.

© 2018 Universitas Negeri Semarang

[✉] Alamat korespondensi:
E-mail: edywiyono525@gmail.com

PENDAHULUAN

Zat warna rhodamin B merupakan zat warna dasar yang penting dalam proses pewarnaan pada industri tekstil. Rhodamin B sangat berbahaya jika terpapar langsung melalui kulit, mata atau tertelan (Aprilia *et al.* 2012). Berbagai teknik atau metode penanggulangan limbah tekstil telah dikembangkan, diantaranya adalah dengan metode adsorpsi. Namun metode ini ternyata kurang begitu efektif karena zat warna tekstil yang diadsorpsi tersebut terakumulasi di dalam adsorben, sehingga menimbulkan permasalahan baru. Sebagai alternatif, dikembangkan metode fotodegradasi menggunakan material semikonduktor dan radiasi sinar ultraviolet. Titanium dioksida (TiO_2) merupakan fotokatalis yang sangat baik dan dapat diaplikasikan di berbagai bidang.

Pengembangan TiO_2 dengan SiO_2 dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik (Sirimahachai *et al.* 2010). Substrat SiO_2 juga merupakan adsorben yang dapat menyediakan situs adsorpsi yang mendukung TiO_2 dalam mendegradasi senyawa organik. Selain itu menurut Gao dan Wachs (1999), SiO_2 sebagai pendukung material katalis, memiliki stabilitas termal dan ketahanan mekanik yang tinggi dan dapat menjaga kinerja fotokatalis TiO_2 (Sellapan 2013). Menurut Balachandaran *et al.* (2014), sifat kimia dan fisika dari komposit TiO_2 - SiO_2 tergantung pada komposisi dan tingkat homogenitas dari TiO_2 maupun SiO_2 dalam campuran komposit. Kumar *et al.* (2013) telah melakukan sintesis komposit TiO_2 - SiO_2 metode sol-gel menggunakan prekursor titanium (IV) isopropoksida (TiIPP) dan tetraetilortosilikat (TEOS) dengan variasi persentase mol oksida TiO_2 dalam SiO_2 . Dari hasil penelitian tersebut, komposit 40% mol TiO_2 / SiO_2 menunjukkan struktur komposit TiO_2 - SiO_2 amorf dengan luas permukaan spesifik yang besar serta memiliki aktivitas fotokatalitik yang optimal.

Dalam melakukan sintesis komposit berbasis titania biasanya menggunakan prekursor sejenis Ti-alkoksida, semakin panjang rantai alkoksi (-OR) pada prekursor maka prekursor akan semakin stabil dan laju hidrolisis pada proses

sol-gel semakin lambat, sehingga berpengaruh terhadap karakteristik dari komposit (Simonsen & Soogard 2010). Menurut Zhang *et al.* (2001) suhu kalsinasi dapat mempengaruhi karakteristik komposit, terutama fase kristal TiO_2 dan tingkat kristalinitas komposit. Faktor lain yang menentukan besarnya daya fotokatalitik adalah kristalinitas suatu fotokatalis. Fotokatalis amorf memiliki daya fotokatalitik lebih rendah daripada komposit dengan kristalinitas yang lebih tinggi (Gustavsson & Schuler 2010).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan sintesis komposit TiO_2 - SiO_2 berdasarkan variasi jenis prekursor TiO_2 yaitu TiIPP dan TiBu, sementara prekursor SiO_2 menggunakan TEOS. Perbandingan mol 40% TiO_2 / SiO_2 berdasarkan Kumar *et al.* (2013). Sintesis komposit dilakukan berdasarkan metode sol-gel dengan tahapan proses hidrolisis, kondensasi, aging dan kalsinasi. Proses kalsinasi dilakukan pada variasi suhu 500, 600 dan 700°C hingga diperoleh 6 jenis komposit TiO_2 - SiO_2 berdasarkan variasi jenis prekursor TiO_2 dan suhu kalsinasi. Selain itu juga dilakukan sintesis komposit TiO_2 sebagai pembanding. Komposit TiO_2 - SiO_2 selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* dan *Diffuse Reflectance UV-Vis*. Komposit selanjutnya dilakukan uji aktivitas fotokatalitik terhadap rhodamin B selama 3 jam. Komposit yang memiliki aktivitas optimal terhadap degradasi rhodamin B selanjutnya kembali dilakukan uji aktivitas fotokatalitik terhadap rhodamin B dengan variasi pH larutan rhodamin B. Selain itu komposit optimal dikarakterisasi menggunakan *FTIR spectrophotometer* dan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Rays*.

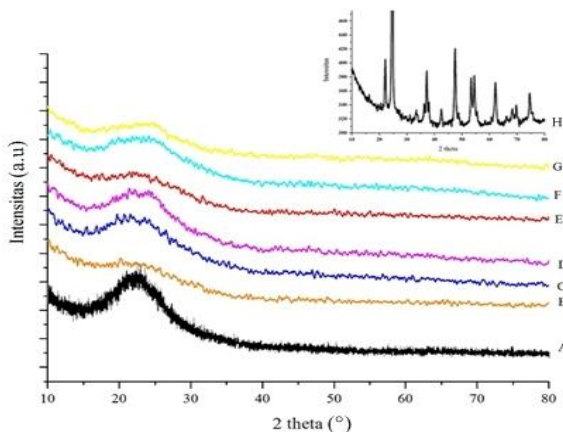
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil kalsinasi diperoleh 7 sampel padatan dengan warna putih pada setiap sampel. Analisis secara fisik meliputi kenampakan warna, berat bersih, dan struktur fisik komposit TiO_2 - SiO_2 dan TiO_2 , ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil kalsinasi komposit TiO₂-SiO₂

Sampel	Suhu kalsinasi (°C)	Warna	Berat bersih (g)	Struktur fisik
TA-500	500	Putih	1,3225	Serbuk halus
TSA-500	500	Putih	6,9648	Serbuk kasar
TSA-600	600	Putih	6,8885	Serbuk kasar
TSA-700	700	Putih	6,8104	Serbuk kasar
TSB-500	500	Putih	6,9970	Serbuk kasar
TSB-600	600	Putih	6,9497	Serbuk kasar
TSB-700	700	Putih	6,8894	Serbuk kasar

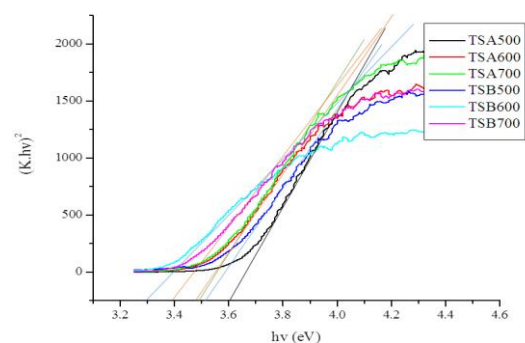
Berdasarkan hasil analisis menggunakan XRD pada Gambar 1 dapat diketahui bahwa sifat komposit TiO₂-SiO₂ dengan pengaruh perbedaan jenis prekursor TiO₂ tidak memperlihatkan adanya struktur kristalin tetapi lebih cenderung bersifat amorf (*amorphous*) sehingga tidak memperlihatkan puncak-puncak yang jelas pada sudut 2 θ , berbeda dengan komposit TiO₂ yang lebih bersifat kristalin dilihat dari puncak-puncak yang cenderung meruncing pada Gambar 1 (H).



Gambar 1. Perbandingan difraktogram XRD komposit TiO₂-SiO₂: (A) SiO₂ amorf (Elnahrawy & Ali 2014), (B) TSA-500, (C) TSA-600, (D) TSA-700, (E) TSB-500, (F) TSB-600, (G) TSB-700 dengan komposit TiO₂: (H) TS-500

Berdasarkan hasil difraktogram, TiO₂-SiO₂ tidak menunjukkan sifat kristalin dan lebih menunjukkan bahwa komposit bersifat amorf dengan keamorfan mirip seperti difraktogram SiO₂ seperti dikutip pada Gambar 1 (A) (Elnahrawy & Ali 2014). Difraktogram TiO₂ (sampel TS-500) jelas menunjukkan sifat kristalin dari fraksi anatase TiO₂ sesuai dengan difraktogram standar atau JCPDS (*Joint Commite on Powder Diffraction Standards*) TiO₂ anatase. Komposit TiO₂-SiO₂ semuanya menunjukkan sifat amorf dikarenakan

penggunaan perbandingan antara TiO₂ dan SiO₂ yang lebih didominasi penggunaan SiO₂. Selain itu, metode sintesis juga berpengaruh terhadap kristalinitas ataupun hasil akhir dari komposit TiO₂-SiO₂. Dari keenam difraktogram TiO₂-SiO₂ yang dihasilkan menunjukkan bahwa sifat padatan yang dihasilkan adalah amorf. SiO₂ bertindak sebagai *host* dari TiO₂, dan partikel TiO₂ terdistribusi ke dalam matriks raksasa dari SiO₂. Hal ini dapat dilihat pada data 2 θ yang dihasilkan masing-masing difraktogram TiO₂-SiO₂ yang tidak menunjukkan kristal TiO₂ murni pada komposit TiO₂-SiO₂.



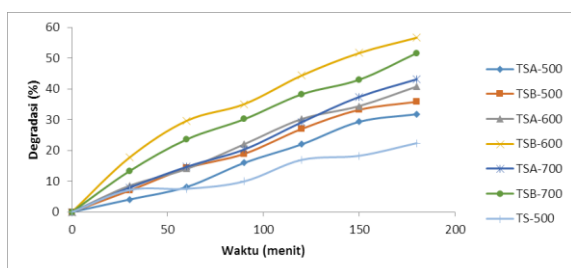
Gambar 2. Kurva *band gap* sampel komposit TiO₂-SiO₂ yang disintesis berdasarkan variasi jenis prekursor TiO₂ dan suhu kalsinasi 500, 600 dan 700°C.

Penghitungan energi *gap* dilakukan dengan menggunakan persamaan Kubelka-Munk. Energi *gap* untuk SiO₂ yang merupakan semikonduktor dengan celah pita energi, langsung diperoleh dari grafik hubungan antara (K.hv)² terhadap energi (hv). Energi *gap* diperoleh dari perpotongan garis lurus yang ditarik memotong sumbu x pada kurva yaitu saat (K.hv)² sama dengan nol. Berdasarkan Gambar 2 diperoleh energi *gap* TiO₂-SiO₂ disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Celah pita energi (*band gap*) komposit TiO₂-SiO₂ yang disintesis berdasarkan variasi jenis prekursor TiO₂ dan suhu kalsinasi, komposit TiO₂ dan SiO₂ (Gustavsson & Schuler 2010)

No	Sampel	Celah pita energi (eV)
1	TSA-500	3,61
2	TSB-500	3,53
3	TSA-600	3,49
4	TSB-600	3,34
5	TSA-700	3,50
6	TSB-700	3,41
7	TiO ₂	3,20
8	SiO ₂	9,00

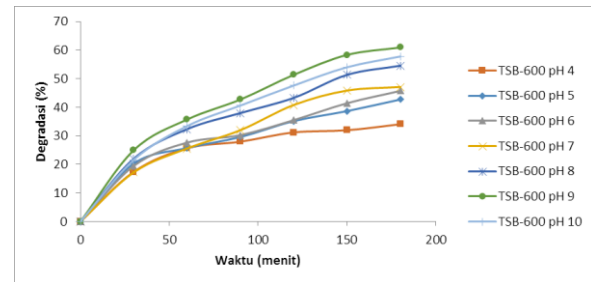
Penggunaan jenis prekursor TiO₂ yang berbeda juga mempengaruhi penurunan energi *gap* silika. Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa penggunaan jenis prekursor TiO₂ mempengaruhi penurunan energi *gap* yang dihasilkan. Penurunan energi *gap* dengan penggunaan berbagai jenis prekursor TiO₂ menyebabkan energi *gap* silika turun dengan selisih yang cukup besar. Selain itu perbedaan suhu kalsinasi pada proses sintesis juga mempengaruhi penurunan energi *gap* dari silika. Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa suhu kalsinasi pada 600°C menyebabkan penurunan energi *gap* yang paling signifikan yaitu sebesar 3,34 eV pada sampel TSB-600 (untuk jenis prekursor TiBu) dan 3,49 eV pada sampel TSA-600 (untuk jenis prekursor TiIPP).



Gambar 3. Fotodegradasi rhodamin B menggunakan komposit TiO₂-SiO₂ dan TiO₂ (variasi jenis prekursor TiO₂ dan suhu kalsinasi)

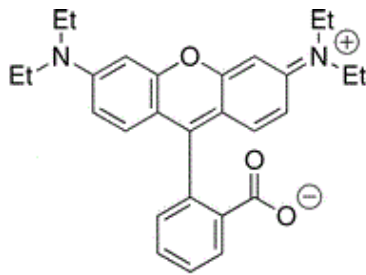
Uji aktivitas fotokatalitik selama 3 jam didapatkan persentase degradasi rhodamin B sebesar 22,56 % untuk sampel TS-500 yang merupakan komposit TiO₂. Komposit TiO₂-SiO₂ yang menggunakan prekursor TiIPP didapatkan persentase degradasi rhodamin B sebesar 31,77

%; 40,75 % dan 43,12 % masing-masing untuk sampel TSA-500, TSA-600 dan TSA-700. Komposit TiO₂-SiO₂ yang menggunakan prekursor TiBu didapatkan persentase degradasi rhodamin B sebesar 35,81 %; 56,63 % dan 51,63 % masing-masing untuk sampel TSB-500, TSB-600 dan TSB-700. Pada Gambar 3 didapatkan persentase degradasi rhodamin B maksimal sebesar 56,63 % selama 3 jam yaitu pada komposit TSB-600.



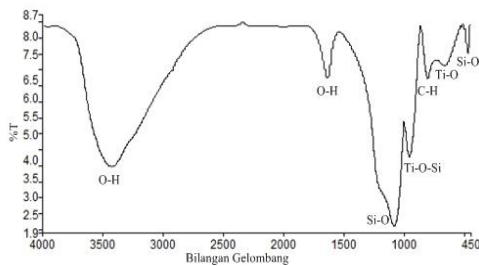
Gambar 4. Fotodegradasi rhodamin B menggunakan komposit TiO₂-SiO₂ (variasi pH larutan)

Berdasarkan hasil uji aktivitas selama 3 jam didapatkan persentase degradasi rhodamin B sebesar 34,07 % untuk pH 4; 42,71 % untuk pH 5; 45,72 % untuk pH 6; 47,10 % untuk pH 7; 54,54 % untuk pH 8; 60,92 % untuk pH 9 dan 57,77 % untuk pH 10. Dari uji aktivitas didapatkan besarnya persentase degradasi paling optimal dari rhodamin B sebesar 60,92 % pada pH 9, ini menunjukkan bahwa semakin besar pH maka proses fotokatalitik pada komposit TiO₂-SiO₂ semakin maksimal sesuai penelitian You-ji dan Wei (2011), yang menyatakan bahwa semakin besar nilai pH maka laju proses fotokatalitik TiO₂-SiO₂ semakin meningkat dalam mendegradasi rhodamin B. Nilai pH basa menyebabkan permukaan TiO₂ bermuatan negatif sedangkan rhodamin B membentuk zwitter ion, sehingga rhodamin B lebih mudah teradsorpsi pada permukaan TiO₂-SiO₂ karena adanya gaya tarik elektrostatis antara rhodamin B dengan permukaan TiO₂-SiO₂. Bentuk zwitter ion rhodamin B berdasarkan You-ji & Wei (2011) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Zwitter ion rhodamin B (RhB-Z) (Youji & Wei 2011)

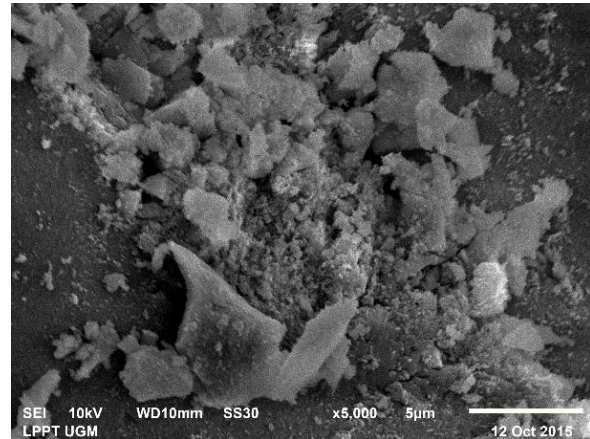
Efisiensi dari proses fotodegradasi rhodamin B akan lebih besar seiring dengan semakin mudahnya rhodamin B terikat pada permukaan $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ tersebut. Namun pada pH 10 menunjukkan hasil degradasi yang lebih kecil daripada pH 9. Hal ini terjadi karena keadaan dari komposit yang sudah jenuh (bermuatan negatif), sehingga proses fotodegradasi yang maksimal terjadi pada pH 9.



Gambar 6. Spektra FTIR komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ (TSB-600)

Berdasarkan Gambar 6 (hasil analisis FTIR pada sampel TSB-600), ikatan O-H terdapat pada bilangan gelombang $3435,94\text{cm}^{-1}$ yang merupakan vibrasi ulur (*stretching vibration*) akibat adanya ikatan hidrogen dari gugus silanol (Si-OH), ikatan O-H juga terdapat pada $1632,80\text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi tekuk (*bending vibration*) dari gugus hidroksil yang terbentuk karena tidak ada ikatan hidrogen. Gugus siloksan (Si-O-Si) terlihat jelas pada bilangan gelombang $1083,61\text{ cm}^{-1}$ yang menandakan bahwa ikatan Si-O sangat kuat dan paling dominan dalam komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$. Sementara pada bilangan gelombang $467,18\text{ cm}^{-1}$ terdapat *peak* vibrasi ulur Si-O pada gugus siloksan (Si-O-Si), vibrasi ulur dari ikatan Ti-O terdapat pada $660,62\text{ cm}^{-1}$ dengan *peak* yang cukup kuat yang berarti kandungan TiO_2 dominan kedua setelah SiO_2 . Ikatan Si-O-Ti terlihat cukup jelas pada bilangan gelombang $951,89\text{ cm}^{-1}$ yang

menempel pada *peak* Si-O. Ikatan C-H terdapat pada bilangan gelombang $800,04\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan vibrasi tekuk dari C-H. Sementara *peak* pada vibrasi ulur C-H tidak terlihat. Adanya ikatan C-H yang dihasilkan menjelaskan bahwa masih ada rantai prekursor yang belum terlepas secara keseluruhan pada saat proses hidrolisis.



Gambar 7. Citra SEM permukaan Sampel TSB-600 dengan perbesaran 5.000 kali

Berdasarkan penampang SEM yang dihasilkan Gambar 7 dapat diketahui bahwa morfologi dari komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ yang dihasilkan tidak bisa memisah tiap satuan partikel karena mengalami aglomerasi (penggumpalan) sehingga partikel-partikel terlihat dominan berkelompok seperti struktur raksasa silika. Penggumpalan terjadi karena kadar SiO_2 yang jauh lebih banyak jika dibandingkan dengan TiO_2 , sehingga morfologi permukaan komposit cenderung seperti silika. Gambar SEM juga menunjukkan bahwa partikel-partikel raksasa komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ berbentuk tidak beraturan. Citra morfologi dari SEM pada Gambar 7 memang tidak bisa menjelaskan distribusi partikel TiO_2 dalam struktur komposit, namun adanya TiO_2 dibuktikan dengan hasil analisis EDX.

Tabel 3. Komposisi unsur dan senyawa penyusun komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$

Unsur	(ke V)	Massa (%)	Senyawa	Massa (%)
	4,5			
Ti	08	23,13	TiO_2	38,60
	1,7			
Si	39	23,99	SiO_2	53,33
O		42		

Hasil analisis EDX pada Tabel 3. menunjukkan komposisi penyusun komposit TiO₂-SiO₂ adalah unsur Oksigen (O), Silikon (Si), dan Titanium (Ti) dan unsur lainnya (C) dengan persentase komposisi massa masing-masing sebesar 42,80%; 23,99%; 23,13% dan 10,07%. Dalam bentuk persenyawaan maka komposit TiO₂-SiO₂ mengandung SiO₂ 51,33%; TiO₂ 38,60% dan persenyawaan lainnya (karbon) 10,07%. Hasil spektrum EDX menunjukkan bahwa persentase kandungan SiO₂ lebih besar dibandingkan TiO₂, kandungan SiO₂ yang sangat besar menyebabkan komposit bersifat amorf. Persenyawaan lain yang terdapat pada komposit salah satunya adalah karbon yang berasal dari persenyawaan karbon sisa pelarut etanol atau prekursor yang tidak teroksidasi pada saat proses kalsinasi.

SIMPULAN

Jenis Prekursor TiO₂ dan suhu kalsinasi mempengaruhi karakteristik dari komposit TiO₂-SiO₂ yaitu sifat padatan amorf dan menurunkan celah pita energi SiO₂. Jenis prekursor dan suhu kalsinasi yang menghasilkan karakteristik terbaik terhadap aktivitas fotodegradasi rhodamin B adalah Titanium (IV) butoksida pada suhu 600°C yaitu sampel TSB-600. Derajat keasaman (pH) dari rhodamin B sangat mempengaruhi besarnya aktivitas fotodegradasi dari komposit TiO₂-SiO₂. Aktivitas fotodegradasi terhadap rhodamin B yang optimal terjadi pada pH 9.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh perbandingan TiO₂ dengan SiO₂ dan aktivitasnya terhadap degradasi rhodamin B. Selain itu juga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang aktivitas fotokatalis TiO₂-SiO₂ hasil regenerasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprilia NI, Sumarni W, & Susatyo EB. 2012. Sintesis Membran Padat Silika Abu Sekam Padi dan Aplikasinya Untuk Dekolorisasi Rhodamin B pada Limbah Cair. *Indo J Chem Sci* 1(2): 164-165.
- Balachandran K, Venckatesh R, & Rajiv R. 2014. TiO₂ nanoparticles versus TiO₂-SiO₂ nanocomposites: A comparative study photo catalysis on acid red 88. *Spectro A: Mol Biomol Spectro* 124: 468-474.
- Elnahrawy AM, & Ali AI. 2014. Influence of Reaction Conditions on Sol-Gel Proseses Producing SiO₂ and SiO₂-P₂O₅ Gel and Glass. *J Glass Cer* 4: 42-47.
- Gao X & Wachs IE. 1999. Titania-silica as catalysts:molecular structural characteristics and physico-chemical properties. *J Cat Today* 5: 233-254.
- Gustavsson A & Schuler E. 2010. Solar Photocatalytic Degradation of Rhodamine B by TiO₂ Nanoparticle Composites. *Thesis*. Physics of Materials and Biological Systems Radiation Physics, University of Gothenburg.
- Kumar DA, Xavier JA, Shyla JM, & Xavier FP. 2013. Synthesis and structural, optical and electrical properties of TiO₂/SiO₂ nanocomposites. *J Mater Sci* 48:3700-3707.
- Sellapan R. 2013. Mechanisms of Enhanced Activity of Model TiO₂/Carbon and TiO₂/Metal Nanocomposite Photocatalysts. Goteborg: Department of Applied Physics Chalmers University, Goteborg, Sweden
- Simonsen ME & Soogard EG. 2010. Sol-gel reactions of titanium alkoxides and water: influence of pH and alkoxy group on cluster formation and properties of the resulting products. *J Sol-Gel Sci* 53(3): 485-497
- Sirimahachai U, Ndiege N, Chandrasekharan R, Wongnawa S, & Shannon MA. 2010. Nanosized TiO₂ particles decorated on SiO₂ spheres: synthesis and photocatalytic activities. *J Sol-Gel Sci Technol* 56(5): 3-6.
- Zhang Y, Weidenkaff A, & Reller A. 2001. Mesoporous Structure and Phase Transition of Nanocrystalline TiO₂. *Mater Lett* 3429.
- You-ji L & Wei C. 2011. Photocatalytic degradation of Rhodamine B using nanocrystalline TiO₂-zeolite surface composite catalysts: effects of photocatalytic condition on degradation efficiency. *Catal Sci Technol* 1: 802-809.