

Submitted : 14 February

Revised : 15 February

Accepted : 20 February

REVIEW: FOTOKATALIS UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH CAIR

Transmissia Noviska Suchaya¹, Novie Permatasari¹, Asep Bayu Dani Nandiyanto^{1*}

¹Program Studi Kimia, Jurusan Pendidikan Kimia, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudhi No. 299, Bandung 40154, Jawa Barat, Indonesia

*Email: nandiyanto@upi.edu; Tel.: +62-22-2000579

Abstrak

Semikonduktor oksida (TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2) merupakan material yang memiliki berbagai keunggulan baik sifat fisika maupun kimia. Karena keunggulan sifatnya, semikonduktor oksida memiliki potensi sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair. Setiap semikonduktor memiliki kemampuan yang berbeda dalam performanya sebagai fotokatalis. Performa semikonduktor oksida tergantung pada metode sintesis yang berpengaruh pada ukuran partikel, kristalisasi, kemurnian, dan komposisi fasa. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan lebih lanjut tentang efektivitas macam – macam metode yang digunakan para peneliti dalam mensintesis nanopartikel semikonduktor oksida sebagai fotokatalis, serta bagaimana performanya dalam aplikasinya sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair. Namun, tidak semua review jurnal memberikan informasi yang detail dan menyeluruh tentang metode dan aplikasi materialnya. Dalam paper ini akan dikaji beberapa metode yang digunakan dalam sintesis nanopartikel semikonduktor oksida, diantaranya: metode sol-gel, metode *flame spray*, dan metode hidrothermal. Dalam paper ini juga dijabarkan informasi tentang aplikasi nanopartikel semikonduktor oksida sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair dan perbandingan performa semikonduktor oksida yang lebih unggul sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair.

Kata Kunci: fotokatalis, metode sintesis, nanopartikel, semikonduktor dioksida.

Abstract

Semiconductor oxides (TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2) are material that have variety of advantages in terms of both physical properties and chemical properties. Because of the advantages owned by semiconductor oxides, it has a potential as photocatalyst of water treatment. Each semiconductor has a different ability in performance as a photocatalyst. Performance of semiconductor oxides depends on the method of synthesis that affects the particle size, crystallinity, purity, and composition phase. So, it needs further approach to determine the effectiveness of various methods used by researchers in conducting the synthesis of semiconductor oxides nanoparticles as a photocatalyst, and how its performs in application as photocatalyst of wastewater treatment. However, not all existing review journals show detailed and comprehensive information both in terms of the translation method and application material. In this paper will be studied several methods that can be used in the synthesis of semiconductor oxides nanoparticle, including: sol-gel method, flame spray method, and hydrothermal method. In addition, this paper also gives information about semiconductor oxides nanoparticle applications as photocatalyst of wastewater treatment and comparison of the performance of the semiconductor oxides as photocatalyst of wastewater treatment.

Keywords: nanoparticle, photocatalyst, semiconductor oxides, synthesis methods.

1. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah merupakan teknologi yang penting untuk kehidupan manusia dan lingkungan secara global. Limbah cair adalah permasalahan yang

cukup besar, terutama limbah yang dihasilkan dari industri tekstil. Limbah cair industri tekstil mengandung senyawa organik dan anorganik dengan konsentrasi yang cukup tinggi pada hampir setiap unit

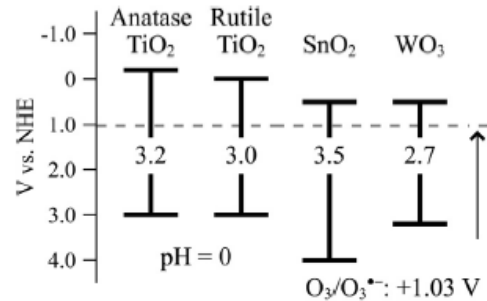
prosesnya. Akibatnya, kualitas air menurun karena tercampur dengan limbah cair tersebut. Untuk mengatasinya telah dilakukan beberapa penilitan tentang pengolahan limbah cair tersebut. Dari beberapa cara yang dapat dilakukan, penggunaan fotokatalis merupakan salah satu cara yang efektif dalam pengolahan limbah cair. Fotokatalis mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dan dalam prosesnya akan menghasilkan radikal hidroksil yang akan bereaksi redoks dengan senyawa organik (polutan), sehingga air akan kembali jernih karena terpisahkan dari limbah cair (Miyake dkk. 2015; Emin, S. dkk. 2015; Yuan dkk. 2015; Irieb dkk. 2015). Polutan ini diubah menjadi O_2 dan H_2 yang lebih ramah lingkungan (Miyake dkk. 2015; Emin, dkk. 2015; Yuan dkk. 2015; Irieb dkk. 2015; Ogi dkk. 2012).

Beberapa material digunakan sebagai fotokatalis pengolahan limbah yang umumnya merupakan semikonduktor, diantaranya TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2 . Ketiga fotokatalis tersebut memiliki bandgap yang berbeda, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 1**. Bandgap ini merupakan energi antara pita konduksi dengan pita valensi yang menghasilkan pembawa arus, pita valensi merupakan tingkat energi yang terisi elektron dengan keadaan energi yang rendah. Sedangkan, pita konduksi merupakan tingkat energi yang tidak terisi oleh elektron atau yang disebut *holes*, tetapi elektron dapat tereksitasi ke dalamnya sehingga diperoleh konduktivitas akibat dari perpindahan elektron yang mengisi *holes* dan menghasilkan arus ketika potensial elektrodanya tercukupi (Scaife dkk. 2005; Koppenol dkk. 2010). Potensial elektroda ini merupakan kuantitas bagaimana suatu senyawa mengalami oksidasi maupun reduksi (Koppenol dkk. 2010; Oller dkk. 2011). Besarnya bandgap bergantung pada banyaknya elektron membentuk sebuah kelompok pada suatu senyawa atau atom. Selain sifatnya yang semikonduktor, ukuran yang dibuat nano pun menjadi salah satu faktor efisiensi fotokatalis dalam pengolahan limbah cair (Sivakumar dkk. 2015; Neumann-Spallart dkk. 2007; Yuan dkk. 2015). Material tersebut memiliki keunggulannya masing - masing, bahkan ringkasan mengenai ketiga material tersebut sebagai fotokatalis telah banyak dilaporkan, salah satunya oleh P. Sivakumar dkk. pada tahun 2015.

Dalam paper ini, kami akan membahas mengenai berbagai macam fotokatalis nanopartikel pengolahan limbah. Review ini terdiri atas tiga bagian utama, yaitu: bagian pendahuluan yang berisi informasi mengenai berbagai keunggulan sifat dan aplikasi dari TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2 . Pada bagian kedua kami membahas berbagai metode yang digunakan para peneliti untuk sintesis TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2 nanopartikel yang dilengkapi bahan kimia, hasil, dan beberapa kelebihan serta kekurangan dari metode tersebut. Dan bagian akhir membahas aplikasi dan informasi terapan TiO_2 , WO_3 , dan SnO_2 nanopartikel dalam berbagai bidang yang disertai metode sintesis dan hasil yang diperolehnya.

Berbeda dengan *review* yang dilakukan oleh P. Sivakumar, dkk. pada tahun 2015 yang menganalisis

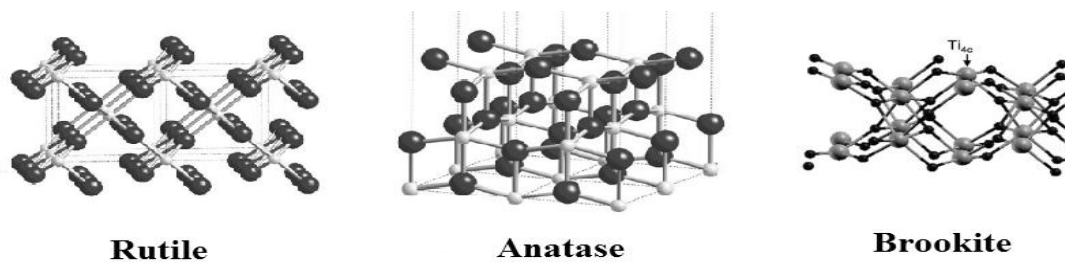
ketiga material tersebut sebagai fotokatalis, tetapi tidak menjabarkan metode sintesisnya secara rinci, keunggulan masing-masing material, dan aplikasinya dalam pengolahan limbah. Pada *review* ini akan dibahas mengenai keunggulan masing-masing material, beberapa metode sintesis nanopartikel yang umum digunakan para peneliti, dan aplikasinya sebagai fotokatalis dalam pengolahan limbah cair.



Gambar 1. Tingkat Energi Bandgap dari Semikonduktor Logam Oksida (Miyake dkk. 2015)

1.1 Fotokatalis TiO_2

Titanium dioksida atau dikenal dengan Titania, yang secara alami merupakan oksida dari titanium. Beberapa keunggulan yang dimiliki titania, diantaranya: memiliki sifat optik yang baik, tidak beracun, harganya murah, memiliki aktivitas fotokatalis yang baik (Smith dkk. 2010; Chen dkk. 2012; Pang dkk. 2012; Habib dkk. 2013), semikonduktor dengan bandgap yang lebar, ketersediaan yang melimpah (Smith dkk. 2010; Hema dkk. 2013; Shahini dkk. 2011; Habib dkk. 2013), tidak larut dalam air (Smith dkk. 2010), memiliki permukaan yang luas (Chen dkk. 2012; Pang dkk. 2012), stabilitas mekanik dan termal yang tinggi (Dastan dkk. 2014; Hema dkk. 2013), dan ramah lingkungan (P. Sivakumar dkk 2015). Titania memiliki tiga jenis bentuk kristal, diantaranya: rutile, anatase, dan brookite yang dapat dilihat pada **Gambar 2**. Ketiganya diaplikasikan dari mulai cat, *sunscreen*, sampai pewarna makanan (P. Sivakumar dkk 2015). Diantara ketiganya, umumnya titania berada dalam bentuk rutile dan anatase yang keduanya berstruktur tetragonal yang secara termodinamika anatase lebih stabil daripada rutile (Rahman dkk. 2014). Titania dalam bentuk anatase adalah titania yang paling baik digunakan sebagai fotokatalis UV, karena titania hanya dapat menyerap sinar UV yang kelimpahannya sedikit di alam (Miyake dkk. 2015). Oleh karena itu memerlukan suatu usaha untuk mengefisienkan titania sebagai fotokatalis dalam pengolahan limbah yang membutuhkan energi yang cukup tinggi ini. Selain berpotensi sebagai fotokatalis, titania juga berpotensi dalam sel surya, *sun block* (kosmetik), pewarna makanan, pemutih gigi, sensor gas, alat optik, aditif dalam berbagai aplikasi, adsorben, dan sebagainya (Dastan dkk. 2014; Hema dkk. 2013; Wang dkk. 2010; Chekina dkk. 2013; Bessekhoud dkk. 2003; Pawar dkk. 2012).



Gambar 2. Bentuk Kristal TiO_2 (Fujishima, dkk. 2008)

1.2 Fotokatalis WO_3

Tungsten trioksida yang secara alami berwarna kuning dan sering digunakan sebagai pigmen dalam cat dan keramik. Dalam bentuk nanopartikelnya, keberadaan tungsten trioksida berupa *nanofluids*, menyebar, terlapisi, transparan, dan memiliki kemurnian yang tinggi. Beberapa keunggulan yang dimilikinya, diantaranya: memiliki sifat optik yang baik (Ogi dkk. 2014), semikonduktor dengan bandgap yang kecil (Ogi dkk. 2014; Patil dkk. 2015; Zheng dkk. 2014; Rauch dkk. 2014; Emin dkk. 2014; Kusmierrek dkk. 2014), tidak beracun ramah lingkungan (Kusmierrek dkk. 2014), memiliki aktivitas fotokatalis yang baik, semikonduktor dengan bandgap yang kecil (Ogi dkk. 2014; Fakhri dkk. 2014; Patil dkk. 2014; Zheng dkk. 2014; Rauch dkk. 2014; Emin dkk. 2014; Kusmierrek dkk. 2014), memiliki permukaan yang luas, stabilitas mekanik dan termal yang tinggi, stabilitas fisikokimia yang tinggi, daya adsorpsi yang tinggi tinggi (Zheng dkk. 2014; Rauch dkk. 2014; Kusmierrek dkk. 2014), dan ramah lingkungan (Kusmierrek dkk. 2014). Secara umum, tungsten trioksida sering ditemui dalam bentuk struktur monoklinik. Tungsten trioksida berpotensi sebagai fotokatalis sinar tampak, karena dapat menyerap sinar UV sampai sinar tampak (biru) (Fakhri dkk. 2014; Ogi dkk. 2014; Zheng dkk. 2014; Vanderwiel dkk. 2014; Dai dkk. 2014; Chen; dkk. 2014; Emin, dkk. 2014; Kusmierrek dkk. 2014). Namun, harga material ini cukup mahal. Selain berpotensi sebagai fotokatalis, titania juga berpotensi dalam sel surya, pewarna makanan, fotoelektroda, sensor gas, *smart windows*, *fireproofing*, LED, *Field emission device*, adsorben, dan sebagainya (Patil dkk. 2015; Rauch dkk. 2014; Emin dkk. 2014; Vanderwiel dkk. 2014; Kusmierrek dkk. 2014).

1.3 Fotokatalis SnO_2

Tin dioksida yang secara alami berwarna putih dan berwujud cairan ionik dan sering digunakan sebagai pigmen dalam cat dan keramik. Beberapa keunggulan yang dimilikinya, diantaranya: memiliki sifat optik yang baik, tidak beracun, memiliki aktivitas fotokatalis yang baik, semikonduktor dengan bandgap

yang kecil, memiliki permukaan yang luas, stabilitas mekanik dan termal yang tinggi, stabilitas fisikokimia yang tinggi, daya adsorpsi yang tinggi, dan ramah lingkungan (Sivakumar dkk. 2015; Miyake dkk. 2015; Koppenol dkk. 2010). Secara umum, tin dioksida sering ditemui dalam bentuk struktur rutile. Tin dioksida berpotensi sebagai fotokatalis sinar UV, karena titania hanya dapat menyerap sinar UV yang kelimpahannya sedikit di alam. Sehingga memerlukan suatu usaha untuk mengefisiensikan tin dioksida sebagai fotokatalis dalam pengolahan limbah yang membutuhkan energi yang cukup tinggi ini. Selain berpotensi sebagai fotokatalis, tin dioksida juga berpotensi dalam sel surya, pewarna makanan, fotoelektroda, sensor gas, alat optik, LED, adsorben, dan sebagainya (Sivakumar dkk. 2015; Miyake dkk. 2015; Koppenol dkk. 2010).

2. METODE SINTESIS FOTOKATALIS NANOPARTIKEL

2.1 Metode Sol-Gel

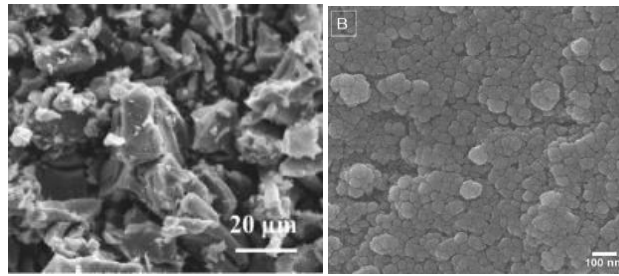
Secara umum sintesis komposit fotokatalis menggunakan metode sol-gel dengan cara ditambahkan asam yang kemudian dipanaskan pada suhu tertentu. Metode ini dapat membuat suatu partikel berukuran nano, seragam, tidak menggumpal, murni, homogen, dan dapat mengontrol distribusi massa. Beberapa penelitian yang dilakukan dalam mensintesis nanopartikel semikonduktor oksida dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Dari hasil sintesis nanopartikel semikonduktor dioksida dengan metode sol-gel yang dilakukan oleh beberapa peneliti tersebut, dilakukan uji morfologi dengan menggunakan instrument SEM dan TEM untuk masing - masing nanopartikel semikonduktor oksida. Hasil karakterisasi nanopartikel TiO_2 menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 3**. dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 4**. Untuk hasil karakterisasi nanopartikel WO_3 menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 5**. dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 6**. Kemudian, untuk hasil karakterisasi nanopartikel SnO_2 menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 7**.

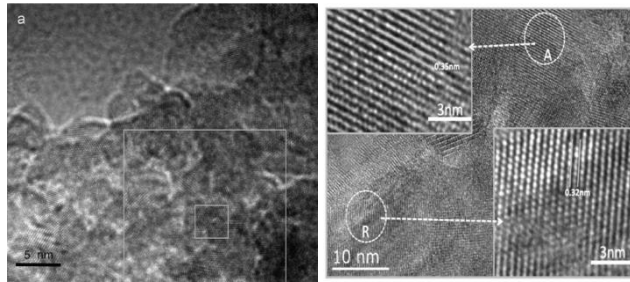
Tabel 1. Sintesis Nanopartikel Semikonduktor Oksida dengan Metode Sol-Gel

No	Peneliti	Bahan	Ringkasan	Hasil	Referensi
1	Ganesan	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ C ₄ H ₆ O ₂ CH ₃ COCH ₃ H ₂ O	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ dan C ₄ H ₆ O ₂ dicampurkan, ditambahkan CH ₃ COCH ₃ dan H ₂ O, kemudian diaduk selama 15 menit hingga berbentuk gelatin dan dipanaskan hingga suhu 125°C selama 30 menit. Dilakukan kalsinasi pada suhu 450°C selama 4 jam	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase. Ukuran kristalnya akan semakin besar ketika konsentrasinya meningkat.	Ganesan dkk., 2015
2	Portela	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ HNO ₃ H ₂ O	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ ditambahkan HNO ₃ yang sudah larut dalam H ₂ O, dipanaskan pada suhu 100°C dan diaduk selama 3 hari.	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase.	Portela dkk., 2015
3	Shao	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ C ₃ H ₈ O NaOH HNO ₃	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ dan C ₃ H ₈ O dicampurkan, ditambahkan NaOH dan HNO ₃ , kemudian diaduk selama dan dipanaskan hingga suhu 80°C selama 5 jam. Dilakukan kalsinasi pada suhu 200°C, 600°C, dan 800°C selama 2 jam	TiO₂ dengan bentuk kristal anatase dan brookite.	Shao dkk., 2015
4	Gan	TiCl ₄ H ₂ O NH ₃	TiCl ₄ , H ₂ O, dan NH ₃ dicampurkan, kemudian diaduk selama dan dipanaskan pada suhu ruang selama 24 jam.	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase. Ukuran kristalnya akan semakin besar ketika suhu kalsinasinya meningkat.	Gan dkk., 2014
5	Agartan	Ti(OC ₂ H ₅) ₄ CH ₃ COOH CH ₃ CH ₂ OH	Ti(OC ₂ H ₅) ₄ dan CH ₃ COOH dicampurkan, ditambahkan CH ₃ CH ₂ OH, kemudian diaduk selama dan dipanaskan hingga suhu 80°C selama 24 jam.	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase dan rutil. Ukuran kristalnya akan semakin besar ketika suhu kalsinasinya meningkat.	Agartan dkk., 2015
6	Khara- de	Na ₂ WO ₄ H ₂ O HCl H ₂ C ₂ O ₄ K ₂ SO ₄	Na ₂ WO ₄ dilarutkan dalam H ₂ O, diaduk dan ditambahkan HCl, diaduk dan dicuci, kemudian ditambahkan H ₂ C ₂ O ₄ dan K ₂ SO ₄ , kemudian dipanaskan hingga suhu 60°C	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal yang seluruh permukaannya memiliki daya absorpsi sinar UV tinggi.	Kharade dkk., 2012

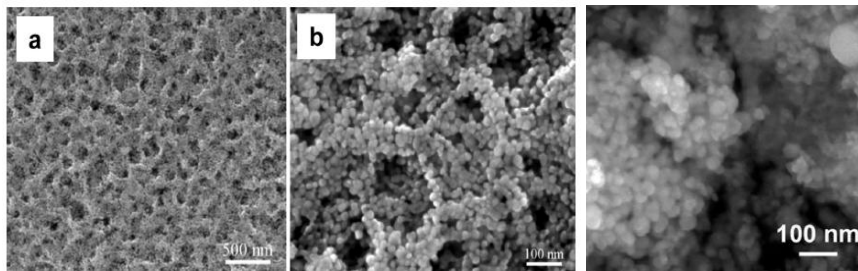
7	Emin	$W(CO)_6$ $H_2C_2O_4$ $CHCl_3:EtOH$	$W(CO)_6$ dan $H_2C_2O_4$ dicampurkan pada suhu $130^\circ C$, dipanaskan kembali pada suhu $230^\circ C$ selama 10 menit, didinginkan hingga suhu $80^\circ C$, ditambahkan $EtOH:CHCl_3$ disentrifugasi selama 15 menit.	WO_3 nanopartikel dengan bentuk kristal monoklinik. Suhu oksidasi yang rendah menghasilkan nanopartikel yang baik	Emin dkk., 2015
8	Epifani	WCl_6 $CH_2(CH_3CO)_2$ CH_3OH $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$	WCl_6 , $CH_2(CH_3CO)_2$, CH_3OH dicampurkan, ditambahkan $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$, diaduk dan dipanaskan pada suhu $100^\circ C$	WO_3 nanopartikel dengan bentuk kristal monoklinik dan triklinik	Epifani dkk., 2010
9	Li	WCl_6 C_7H_8 C_4H_8O	C_7H_8 dan C_4H_8O direfluks, ditambahkan WCl_6 dan H_2O , diaduk selama 1 jam pada suhu $100^\circ C$	WO_3 nanopartikel dengan bentuk kristal monoklinik	Li dkk., 2010
10	Wang	Bi_2WO_6 $C_6H_8O_7.H_2O$ $Bi(NO_3)_3.5H_2O$ HNO_3	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $80^\circ C$ sampai membentuk gelatin, kemudian dipanaskan pada suhu $120^\circ C$ selama 12 jam.	WO_3 dengan bentuk kristal ortorombik	Wang dkk., 2015
11	Uchiyama	$SnCl_4.5H_2O$, $CH_3COCH_2COCH_3$ $CH_3OC_2H_4OH$	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $700^\circ C$	SnO_2 nanopartikel yang dapat menyerap sinar UV	Uchiyama dkk., 2013
12	Wang	$SnCl_4$ CTAB Alkohol	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $200^\circ C$	SnO_2 nanopartikel dengan bentuk kristal cassiterite.	Wang dkk., 2010
13	Ohodnicki	$Sn[OCH(CH_3)_2]_4$ C_3H_8O C_7H_8	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $150^\circ C$	SnO_2 nanopartikel dengan bentuk kristal cassiterite.	Ohodnicki dkk., 2012
14	Aziz	$SnCl_2.2H_2O$ CH_3CH_2OH $CH_3COCH_2COCH_3$	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $80^\circ C$	SnO_2 nanopartikel dengan bentuk kristal tetragonal. Semakin tinggi suhu kalsinasi, semakin besar ukuran kristal	Aziz dkk., 2013
15	Abbas	$SnCl_2.2H_2O$ CH_3CH_2OH $CH_3COCH_2COCH_3$ PEG	Seluruh bahan dicampurkan dan dipanaskan pada suhu $80^\circ C$, ditambahkan PEG	SnO_2 nanopartikel dengan bentuk kristal rutile.	Abbas dkk., 2012



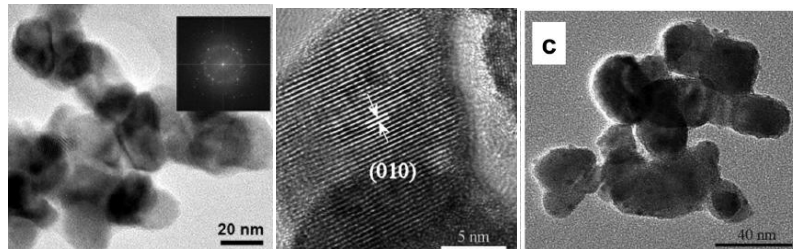
Gambar 3. Analisis SEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode sol-gel yang diperoleh dari: (a) Ganesan dkk., 2015, (b) Shao dkk., 2015.



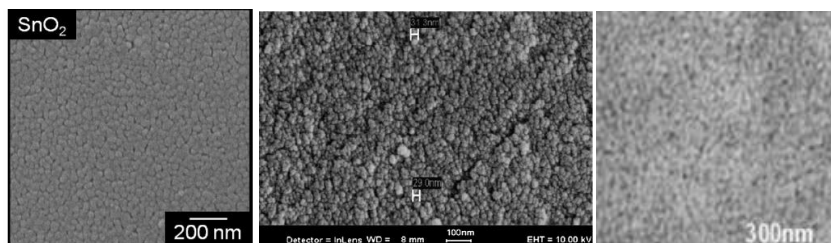
Gambar 4. Analisis TEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode sol-gel yang diperoleh dari: (a) Gan dkk., 2014, (b) Shao dkk., 2015.



Gambar 5. Analisis SEM dari produk WO_3 nanopartikel dengan metode sol-gel yang diperoleh dari: (a) dan (b) Emina dkk., 2015, (c) Wang dkk., 2015.



Gambar 6. Analisis TEM dari produk WO_3 nanopartikel dengan metode sol-gel yang diperoleh dari: (a) Wang dkk., 2015, (b) dan (c) Emina dkk., 2015.



Gambar 7. Analisis SEM dari produk SnO_2 nanopartikel dengan metode sol-gel yang diperoleh dari: (a) Uchiyama dkk., 2013, (b) Aziz dkk., 2013, (c) Abbas dkk., 2012.

2.2 Metode Flame Spray

Secara umum sintesis komposit fotokatalis nanopartikel menggunakan metode *flame spray* dengan cara penguapan dan nukleasi dari material yang mengenai *flame* yang kemudian

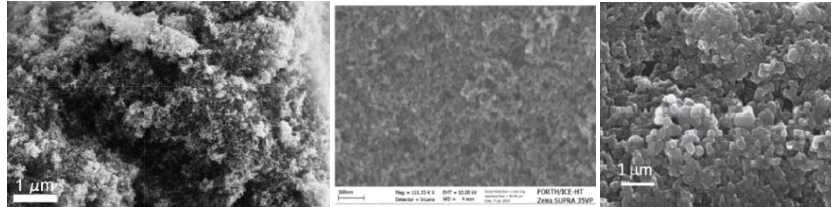
dikondensasikan. Metode ini menghasilkan nanopartikel yang baik dibandingkan metode sol-gel. Beberapa penelitian yang dilakukan dalam mensintesis nanopartikel semikonduktor oksida dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Sintesis Nanopartikel Semikonduktor Oksida dengan Metode *Flame Spray*

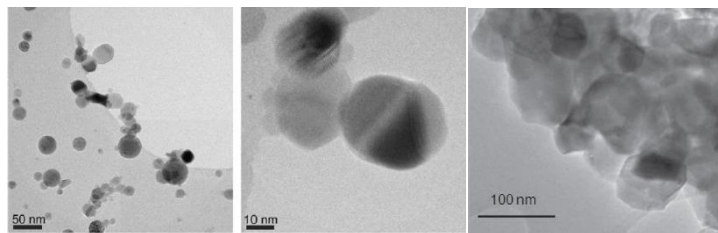
No	Peneliti	Bahan	Ringkasan	Hasil	Referensi
1	Aromaa	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ C ₃ H ₈ O C ₃ H ₆ H ₂ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 250°C dengan menggunakan gas H ₂ -O ₂	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase dan rutile.	Aromaa dkk., 2012
2	Selli	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ CH ₃ CH ₂ OH C ₈ H ₁₀ CH ₄ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas CH ₄ -O ₂	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase dan rutile. Suhu nyala yang tinggi menyebabkan kristal komposit lebih rutile	Selli dkk., 2014
3	Tantis	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ C ₈ H ₁₀ O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas O ₂	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase dan rutile.	Tanti dkk., 2015
4	Beliea	TBAB C ₃ H ₈ O H ₂ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas H ₂ -O ₂	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase dan rutile. Semakin tinggi suhu kalsinasi, semakin banyak kristal dalam bentuk rutile	Beliea dkk., 2014
5	Phanichpaht	Tungsten etoksida CH ₃ CH ₂ OH CH ₄ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas CH ₄ -O ₂	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal monoklinik.	Phanichpaht dkk., 2012
6	Ogi	AMT (CH ₃) ₂ -N-CHO N ₂ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 40°C dengan menggunakan gas N ₂ -O ₂	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal monoklinik.	Ogi dkk., 2014
7	Liewhira n	C ₁₆ H ₃₀ O ₄ Sn C ₈ H ₁₀ CH ₄ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas CH ₄ -O ₂	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal-cassiterate.	Liewhira n dkk., 2012
8	Tamaekong	C ₁₆ H ₃₀ O ₄ Sn CH ₃ CN CH ₄ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas CH ₄ -O ₂	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal-cassiterate.	Tamaekong dkk., 2013
9	Tuantranont	C ₁₆ H ₃₀ O ₄ Sn C ₈ H ₁₀ H ₂ -O ₂	Seluruh bahan dicampurkan dengan menggunakan gas H ₂ -O ₂	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal-cassiterate.	Tuantranont dkk., 2014

Dari hasil sintesis nanopartikel semikonduktor dioksida dengan metode *flame spray* yang dilakukan oleh beberapa peneliti tersebut, dilakukan uji morfologi dengan menggunakan instrument SEM dan TEM untuk masing - masing nanopartikel semikonduktor oksida. Hasil karakterisasi nanopartikel TiO₂ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 8**.

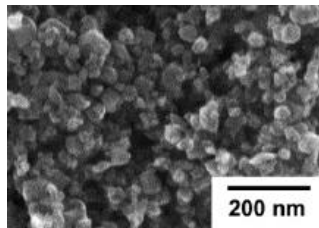
dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 9**. Untuk hasil karakterisasi nanopartikel WO₃ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 10**. dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 11**. Kemudian, untuk hasil karakterisasi nanopartikel SnO₂ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 12**. dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 13**.



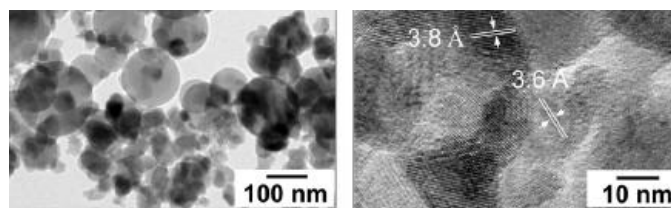
Gambar 8. Analisis SEM dari produk TiO₂ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) Selli dkk., 2014, (b) Tantis dkk., 2015, (c) Beliea dkk., 2014.



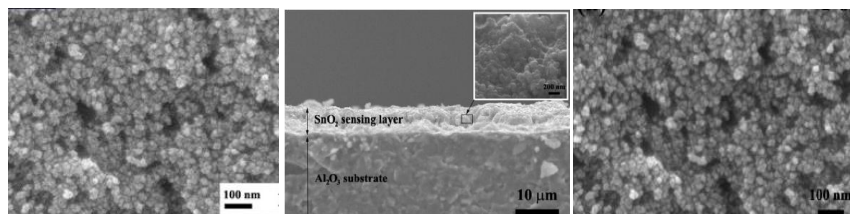
Gambar 9. Analisis TEM dari produk TiO₂ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) dan (b) Aromaa dkk., 2012, (c) Beliea dkk., 2014.



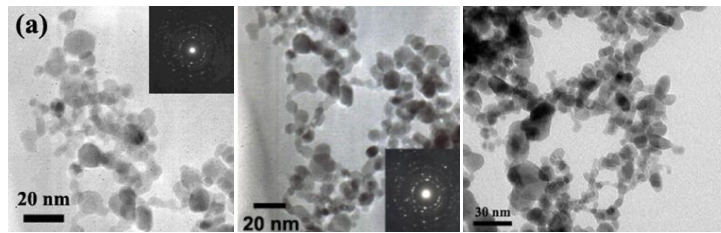
Gambar 10. Analisis SEM dari produk WO₃ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) Ogi dkk., 2014.



Gambar 11. Analisis TEM dari produk WO₃ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) Ogi dkk., 2014.



Gambar 12. Analisis SEM dari produk SnO₂ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) Tamaekong dkk., 2013, (b) Liewhiran dkk., 2012, (c) Tuantranont dkk., 2014.



Gambar 13. Analisis TEM dari produk SnO₂ nanopartikel dengan metode *flame spray* yang diperoleh dari: (a) Tamaekong dkk., 2013, (b) Liewhiran dkk., 2012, (c) Tuantranont dkk., 2014.

2.3 Metode Hidrothermal

Metode ini hanya mencampurkan bahan baku dengan memanaskannya pada suhu tertentu.

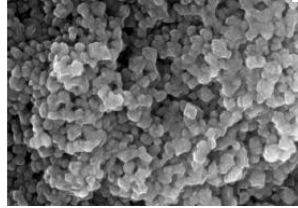
Beberapa penelitian yang dilakukan dalam mensintesis nanopartikel semikonduktor oksida dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Sintesis Nanopartikel Semikonduktor Oksida dengan Metode Hidrothermal

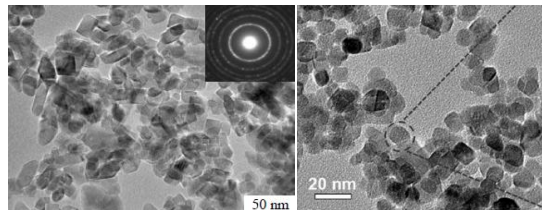
No	Peneliti	Bahan	Ringkasan	Hasil	Referensi
1	Xiao-ming	Ti(SO ₄) ₂ NH ₄	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 240°C	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase	Xiaoming dkk., 2015
2	Zhang	Ti(OC ₄ H ₉) ₄ CH ₃ CH ₂ OH NH ₄ Cl	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 110°C	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase	Zhang dkk., 2014
3	Chen	Ti[OCH(CH ₃) ₂] ₄ CH ₃ COOH	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 240°C	TiO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal anatase	Chen dkk., 2014
4	Zeng	Na ₂ WO ₄ .2H ₂ O H ₂ O ₂ HCl	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 160°C	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal	Zeng dkk., 2015
5	Bhosale	Na ₂ WO ₄ .2H ₂ O NaCl HCl	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 180°C	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal tetragonal	Bhosale dkk., 2014
6	Sanchez-Martinez	(NH ₄) ₂ WO ₄ NH ₄ OH HNO ₃	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 180°C	WO₃ nanopartikel dengan bentuk kristal heksagonal dan monoklinik	Sanchez-Martinez dkk., 2014
7	Umar	SnCl NH ₄ OH	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 180°C	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal tetragonal rutile	Umar dkk., 2015
8	Singh	SnCl ₄ .5H ₂ O HCl NH ₄ OH	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 100°C	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal tetragonal rutile	Singh, dkk., 2015
9	Chu	SnCl ₄ .5H ₂ O NH ₄ OH HCl	Seluruh bahan dicampurkan pada suhu 160°C	SnO₂ nanopartikel dengan bentuk kristal tetragonal rutile	Chu dkk., 2014

Dari hasil sintesis nanopartikel semikonduktor dioksida dengan metode hidrotermal yang dilakukan oleh beberapa peneliti tersebut, dilakukan uji morfologi dengan menggunakan instrument SEM dan TEM untuk masing - masing nanopartikel semikonduktor oksida. Hasil karakterisasi nanopartikel TiO₂ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar**

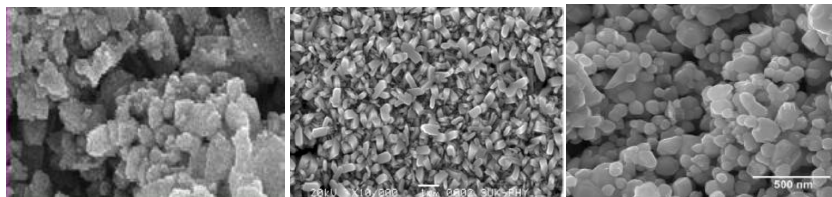
14. dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 15.** Untuk hasil karakterisasi nanopartikel WO₃ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 16.** dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 17.** Kemudian, untuk hasil karakterisasi nanopartikel SnO₂ menggunakan SEM ditunjukkan pada **Gambar 18.** dan TEM ditunjukkan pada **Gambar 19.**



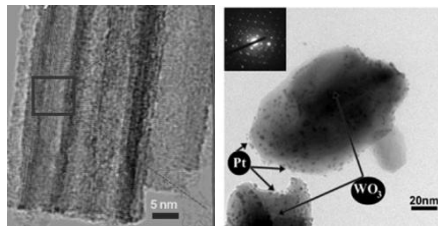
Gambar 14. Analisis SEM dari produk TiO₂ nanopartikel dengan metode hidrotermal yang diperoleh dari: (a) Xiaoming, 2014.



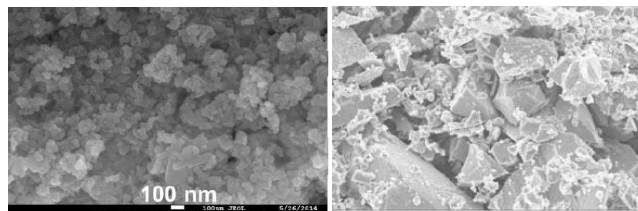
Gambar 15. Analisis TEM dari produk TiO₂ nanopartikel dengan metode hidrotermal yang diperoleh dari: (a) Xiaoming, 2014, (b) Chen dkk., 2014.



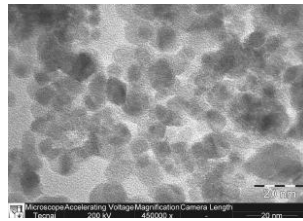
Gambar 16. Analisis SEM dari produk WO₃ nanopartikel dengan metode hidrotermal yang diperoleh dari: (a) Phanichphant dkk., 2014, (b) Bhosale dkk., 2014, (c) Sanchez-Martinez dkk., 2014.



Gambar 17. Analisis TEM dari produk WO₃ nanopartikel dengan metode hidrotermal yang diperoleh dari: (a) Zeng dkk., 2015, (b) Phanichphant dkk., 2014.



Gambar 18. Analisis SEM dari produk SnO₂ nanopartikel dengan metode hidrotermal yang diperoleh dari: (a) Umar dkk., 2015, (b) Singh dkk., 2015.



Gambar 19. Analisis TEM dari produk SnO₂ nanopartikel dengan metode hidrothermal yang diperoleh dari: (a) Chu dkk., 2014.

3. APLIKASI SEBAGAI FOTOKATALIS PENGOLAHAN LIMBAH CAIR

Banyak paper yang mengkaji semikonduktor sebagai fotokatalis yang didasarkan pada karakteristik dari semikonduktor tersebut seperti yang dilakukan oleh Miyake dkk., pada tahun 2015 yang dapat dilihat pada **Tabel 4**. Suatu semikonduktor logam oksida dipilih sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair karena kemampuannya dalam proses generasi

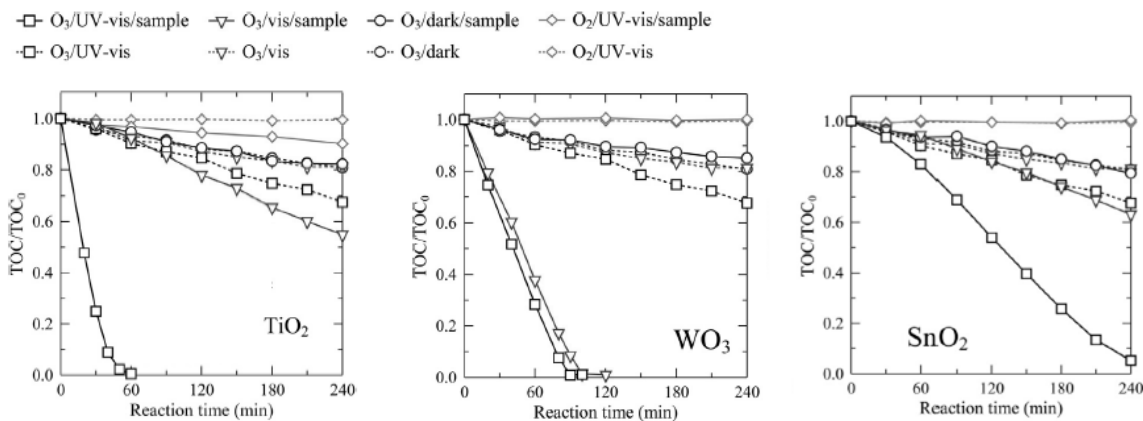
elektron-hole pada permukaannya yang akan bereaksi dengan ion hidroksil dan oksida pada senyawa organik (polutan) dan mengubahnya menjadi O₂ dan H₂. (Madras dkk., 2013). Metode ini dipilih sebagai metode yang efektif karena waktu yang dibutuhkan dalam mendegradasi polutan yang sedikit, rendahnya resiko toksikan baru yang dihasilkan, dan ketersediaan material yang melimpah.

Tabel 4. Karakteristik dari Semikonduktor Logam Oksida (Miyake dkk., 2015)

Sampel	Crystal system	Band gap energy (eV)	Specific surface area (m ² /g)
TiO ₂	Tetragonal (Anatase + Rutile)	3.1	52.3
SnO ₂	Tetragonal	3.6	54.1
WO ₃	Monoclinic + Triclinic	2.7	3.6

Miyake dkk., pada tahun 2015 melakukan penelitian terhadap TiO₂, WO₃, dan SnO₂ sebagai fotokatalis pengolahan limbah cair dengan bantuan ozon melalui radiasi sinar UV dan sinar tampak yang kemudian membandingkan kemampuan ketiga

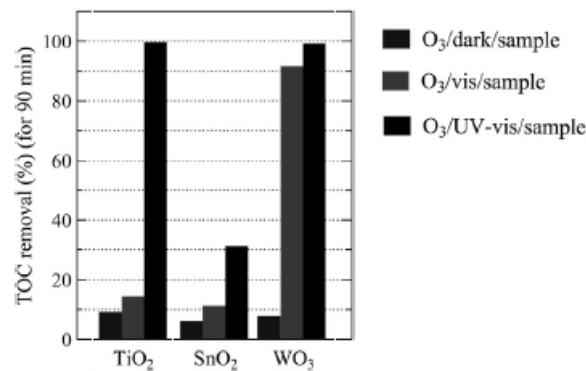
fotokatalis tersebut. Untuk menguji kemampuan ketiga fotokatalis mendegradasi senyawa organik, Miyake, dkk melakukan percobaan terhadap larutan asam oksalat yang hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 20**.



Gambar 20. HasilFotokatalis Degradasi Senyawa Organik dalam Larutan Asam Oksalat (Miyake dkk., 2015)

Dari **Gambar 20**. Dapat diketahui bahwa ketiga fotokatalis mampu mendegradasi senyawa organik yang prosesnya akan semakin cepat ketika ditambahkan ozon dan diradiasi oleh sinar UV. Kemudian, percobaan dilakukan terhadap sampel limbah cair yang hasilnya memperlihatkan bahwa

WO₃ merupakan fotokatalis yang efisien karena kemampuannya sebagai fotokatalis pendegradasi senyawa organik yang dapat menyerap sinar UV maupun sinar tampak. Hasil percobaan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 21**.



Gambar 21. Hasil Fotokatalis Degradasi Senyawa Organik dalam Limbah Cair (Miyake dkk., 2015)

Selain itu, banyaknya radikal OH yang terbentuk merupakan salah satu faktor efektivitas suatu material sebagai fotokatalis, karena semakin banyaknya radikal OH yang terbentuk, semakin banyak pula senyawa organik sebagai polutan yang akan bereaksi redoks dengan material tersebut, sehingga semakin cepat proses degradasi yang terjadi pada senyawa organik tersebut. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Nosaka dkk., pada tahun 2015 membandingkan pembentukan radikal OH pada WO₃ dan BiVO₄ yang juga dikombinasi dengan Cu. Dari hasil penelitian tersebut, diketahui bahwa WO₃ mampu menghasilkan OH radikal lebih banyak sehingga lebih efektif sebagai fotokatalis.

4. KESIMPULAN

Semikonduktor dioksida, seperti TiO₂, WO₃, dan SnO₂, dapat berfungsi sebagai fotokatalis pengolahan limbah yang efisien dengan berbagai metode sintesis fotokatalis nanopartikel yang menyebabkan permukaan komposit tersebut lebih luas sehingga dapat lebih efisien dalam mendegradasi senyawa organik (polutan), diantaranya metode sol-gel, metode *flame spray*, dan metode hidrotermal. Diantara ketiga fotokatalis nanopartikel tersebut, WO₃ merupakan fotokatalis yang paling efektif karena dapat bekerja di bawah radiasi sinar UV dan sinar tampak.

5. DAFTAR PUSTAKA

Abbas, Saad Saber; Madzlan Aziz; Wan Rosemaria Wan Baharom; Wan Zuraidah Wan Mahmud, Structure of SnO₂ nanoparticles by sol-gel method. *Materials Letters*, 2012, 74, 62-64.

Agartan, Lutfi; Derya Kapusuz; Jongee Park; Abdullah Ozturk, Effect of initial water content and calcinations temperature on photocatalytic properties of TiO₂ nanopowders synthesized by the sol-gel process. *Ceramics International*, 2015.

Aromaa, Mikko; Anssi Arffman; Heikki Suhonen; Janne Haapanen; Jorma Keskinen; Mari Honkanen; Juha-Pekka Nikkanen; Erkki Levanen; Maria E. Messing; Knut Deppert; Hannu Teisala; Mikko Tuominen; Jurkka Kuusipalo; Milena Stepien; Jarkko J. Saarinen; Martti Toivakka; Jyrki M. Makela, Atmospheric synthesis of superhydrophobic TiO₂ nanoparticle deposits in a

single step using Liquid Flame Spray. *Journal of Aerosol Science*, 2012, 52, 57-68.

Aziz, Madzlan; Saad Saber Abbas; Wan Rosemaria Wan Baharom, Size-controlled synthesis of SnO₂ nanoparticles by sol-gel method. *Materials Letters*, 2013, 91, 31-34.

Beliea, Nele De; Anibal Maury-Ramirez; Juha-Pekka Nikkanen; Mari Honkanen; Kristof Demeestere; Erkki Levänen, TiO₂ coatings synthesized by liquid flame spray and low temperature sol-gel technologies on autoclaved aerated concrete for air-purifying purposes. *Material Scharacterization*, 2014, 87, 74 - 85.

Bessekhouad Y.; D. Robert; J. V. Weber, Preparation of TiO₂ nanoparticles by Sol-Gel route: a article, *Hindawi International Journal of Photoenergy*, 2003, 5, 153-157.

Bhosale1, P.N.;V.V. Kondalkar; R.R. Kharade; S.S. Mali; R.M. Mane; P.B. Patil; P.S. Patil; S. Choudhury, Nanobrick-like WO₃ Thin Films: Hydrothermal Synthesis and Electrochromic Application. *Superlattices and Microstructures*, 2014.

Chekina, Fereshteh; Samira Bagherib; Sharifah Bee Abd Hamid, Synthesis of Pt doped TiO₂ nanoparticles: Characterization and application for electrocatalytic oxidation of l-methionine: a article, *Elsevier, Sensors and Actuators B*, 2013, 177, 898-903.

Chen, Daimei; Qian Zhu; Fengsan Zhou; Xutao Deng; Fatang Li, Synthesis and photocatalytic performances of the TiO₂ pillared montmorillonite: a article, *Elsivier, Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235-236, 186- 193.

Chen,Yunxia; Tao Zeng; Xiaoli Su; Yueming Li; Qing Feng, Hydrothermal steam induced crystallization synthesis of anatase TiO₂ nanoparticles with high photovoltaic response. *MaterialsLetters*, 2014, 119, 43-46.

Chu, Guang-wen; Qiu-hua Zeng; Zhi-gang Shen; Hai-kui Zou; Jian-feng Chen, Preparation of SnO₂ nanoparticles using a helical tube reactor via continuous hydrothermal route. *Chemical Engineering Journal*, 2014.

Dai, Wei-Lin; Jing Ding; Qianqian Liu; Zhaoyan Zhang; Xin Liu; Junqi Zhao; Shibiao Cheng; Baoning Zong, Carbon nitride nanosheets decorated with WO₃

- nanorods: Ultrasonic-assisted facile synthesis and catalytic application in the green manufacture of dialdehydes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 165, 511–518.
- Dastan, Davoud; N. B. Chaure, Influence of Surfactants on TiO₂ Nanoparticles Grown by Sol-Gel Technique: a article, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2014, 2(1), 21-24.
- Emin S.; M.de Respinis; M. Fanettia; W. Smith; M. Valanta; B. Damb, A simple route for preparation of textured WO₃ thin films from colloidal W nanoparticles and their photoelectron chemical water splitting properties. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 166–167, 406–412.
- Epifani, Mauro; Jordi Arbiol; Raúl Díaz; Teresa Andreu; Pietro Siciliano; Joan R. Morante, Morphological and structural characterization of WO₃ and Cr-WO₃ thin films synthesized by sol-gel process. *Thin Solid Films*, 2010, 518, 4512–4514.
- Fakhri, Ali dan Sajjad Behrouz, Photocatalytic properties of tungsten trioxide (WO₃) nanoparticles for degradation of Lidocaine under visible and sunlight irradiation. *Solar Energy*, 2015, 112, 163–168.
- Fujishima, Akira; Xintong Zhang; Donald A. Tryk, TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 2008, 63, 515–582.
- Gan, Dershin; Cheng-Ling Laia; Hsing-Lu Huang; Jung-Hsiung Shena; Kuang-Kuo Wang, The formation of anatase TiO₂ from TiO nanocrystals in sol-gel process. *Ceramics International*, 2014.
- Ganesan, Ramakrishnan; Ravikiran Nagarjuna; Sounak Roy, Polymerizable sol-gel precursor mediated synthesis of TiO₂ supported zeolite-4A and its photodegradation of methylene blue. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2015, 211, 1-8.
- Habib, Md Ahsan; Md Tusan Shahadat; Newaz Mohammed Bahadur; Iqbal M I Ismail; Abu Jafar Mahmood, Synthesis and characterization of ZnO-TiO₂ nanocomposites and their application as photocatalysts: a article, Open access, Springer, *International Nano Letters*, 2013, 3(5), 1-8.
- Hema, M.; A.Yelil Arasi; P.Tamilselvi; R.Anbarasan, Titania Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Technique: a article, *Chemical Science Transactions*, 2013, 2(1), 239-245.
- Irieb, Hiroshi dan Satoshi Tanigawa, Visible-light-sensitive two-step overall water-splitting based on band structure control of titanium dioxide. *Applied Catalysis B: Environmental Catalysis*, 2015.
- Kharade, Rohini R.; K.R. Patil; P.S. Patil; P.N. Bhosale, Novel microwave assisted sol-gel synthesis (MW-SGS) and electrochromic performance of petal like h-WO₃ thin films. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47, 1787–1793.
- Koppenol, Willem. H.; Stanbury, David. M.; Bounds, Patricia L, Electrode Potential of partially reduced oxygen species, from dioxygen to water. *Free Radical Biology and Medicine*, 2010, 49, 317-322.
- Kusmierek, Elzbieta dan Ewa Chrzescijanska, Application of TiO₂-RuO₂/Ti electrodes modified with WO₃ in electro- and photoelectrochemical oxidation of Acid Orange 7 dye. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2015, 302, 59–68.
- Li, Lei; Jian Li; Qiao-Ling Zhao; Guo-Yi Zhang; Jian-Zhuang Chen; Liang Zhong; Jin Huang; Zhi Ma, Synthesis of monoclinic WO₃ nanosphere hydrogen gasochromic film via a sol-gel approach using PS-b-PAA diblock copolymer as template. *Solid State Sciences*, 2010, 12, 1393-1398.
- Liewhiran, C.; N. Tamaekong; A. Wisitsoraat; S. Phanichphant, Highly selective environmental sensors based on flame-spray-made SnO₂ Nanoparticles. *Sensors and Actuators B*, 2012, 163, 51– 60.
- Madras, Giridhar dan Satyapaul A. Singh, Photocatalytic degradation with combustion synthesized WO₃ and WO₃/TiO₂ mixed oxides under UV and visible light. *Separation and Purification Technology*, 2013, 105, 79–89.
- Miyake, Michihiro; Takayuki Mano; Shunsuke Nishimoto; Yoshikazu Kameshima, Water treatment efficacy of various metal oxide semiconductors for photocatalytic ozonation under UV and visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 264, 221–229.
- Neumann-Spallart, M.; G. Waldner, A. Bruger; N.S. Gaikwad, WO₃ thin films for photoelectrochemical purification of water. *Chemosphere*, 2007, 67, 779–784.
- Ogi, Takashi, Hendri Widiyandari; Agus Purwanto; Ratna Balgis; Kikuo Okuyama, CuO/WO₃ and Pt/WO₃ nanocatalysts for efficient pollutant degradation using visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 180, 323–329.
- Ogi, Takashi; Osi Arutanti; Asep Bayu Dani Nandiyanto; Ferry Iskandar; Tae Oh Kim; Kikuo Okuyama, Synthesis of composite WO₃/TiO₂ nanoparticles by flame-assisted spray pyrolysis and their photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 591, 121–126.
- Ohodnicki Jr., Paul R.; Sittichai Natesakhawat; John P. Baltrus; Bret Howard; Thomas D. Brown, Characterization of optical, chemical, and structural changes upon reduction of sol-gel deposited SnO₂ thin films for optical gas sensing at high temperatures. *Thin Solid Films*, 2012, 520, 6243–6249.
- Oller, I.; Malato, S.; Sanchez-Perez, J.A., Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Wastewater Decontamination-A. *Science of The Total Environment*, 2011, 409, 4141-4166.
- Phanichphant, Sukon; Thanittha Samerjai; Nittaya Tamaekong; Khatcharin Wetchakuna; Viruntachar Kruefu, Chaikarn Liewhiran; Chawarat Siri Wong; Anurat Wisitsoraat, Flame-spray-made metal-loaded semiconducting metal

- oxides thick films for flammable gas sensing. *Sensors and Actuators B*, 2012, 171– 172, 43– 61.
- Pang, Suh Cem; Sze Yun Kho; Suk Fun Chin, Fabrication of Magnetite/Silica/Titania Core-Shell Nanoparticles: a article, Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-6.
- Patil, Kashinath R.; Aarti H. Jadhav; Sagar H. Patil; Shivaram D. Sathaye, A method to form semiconductor quantum dot (QD) thin films by igniting a flame at air–liquid interface: CdS and WO₃. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 439, 121–128.
- Pawar, M.J.; P. B. Kaware; R. V. Bijewar, Ce³⁺ Doped TiO₂ Nanoparticles; Synthesis and Photocatalytic Activity: a article, *Int. J. Emerg. Sci*, 2012, 2(1), 149-160.
- Phanichphant, Sukon; Thanittha Samerjai; Chaikarn Liewhiran; Anurat Wisitsoraat; Adisorn Tuantranont; Chanitpa Khanta, Highly selective hydrogen sensing of Pt-loaded WO₃ synthesized by hydrothermal/impregnation methods. *International journal of hydrogen energy*, 2014, 39, 6120-6128.
- Portela, R.; R.M. Camara; F. Gutierrez-Martin; B. Sanchez, Photocatalytic activity of TiO₂ films prepared by surfactant-mediated sol–gel methods over commercial polymer substrates. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 283, 535–543.
- Rahman, Taufik; Muhammad A. Fadhlulloh; Asep Bayu D. Nandiyanto; Ahmad Mudzakir, *Review: Sintesis Titanium Diokasida Nanopartikel*. *Jurnal Integrasi Proses*, 2014, 1(5), 15 - 29.
- Rauch, Dieter; Gaby Albrecht; David Kubinski; Ralf Moos, A microwave-based method to monitor the ammonia loading of vanadia-based SCR catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 165, 36–42.
- Sánchez-Martínez, D.; Diana B.Hernandez-Urestia; A.Martínez-dela Cruz; S. Sepúlveda-Guzmána; Leticia M. Torres-Martínez, Characterization and photocatalytic properties of hexagonal and monoclinic WO₃ prepared via microwave-assisted hydrothermal synthesis. *Ceramics International*, 2014, 40, 4767–4775.
- Scaife, D. E. Oxide Semiconductor in Photoelectrochemical Conversion of Solar Energy. *Solar Energy*, 2005, (25), 41-54.
- Selli, Elena; Luca Giacomo Bettina; Maria Vittoria Dozzic; Flavio Della Fogliaa; Gian Luca Chiarelloc; Cristina Lenardia; Paolo Piseria; Paolo Milania, Mixed-phase nanocrystalline TiO₂ photocatalysts produced by flame spray pyrolysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014.
- Shahini, Sharif; Masoud Askari; S K sadrnezhaad, Gel-sol synthesis and aging effect on highly crystalline anatase nanopowder: a article, *Bull. Mater. Sci*, 2011, 34(6), 1189–1195.
- Shao, Godlisten N.; Bridget K. Mutuma; Won Duck Kim; Hee Taik Kim, Sol–gel synthesis of mesoporous anatase–brookite and anatase– brookite–rutile TiO₂ nanoparticles and their photocatalytic properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 442, 1–7.
- Singh, Davender; Virender Singh Kundu; A.S. Maan, Structural, morphological and gas sensing study of palladium doped tin oxide nanoparticles synthesized via hydrothermal technique. *Journal of Molecular Structure*, 2015, 1100, 562-569.
- Sivakumar, P. dan D.Sudha, Review on the photocatalytic activity of various composite catalysts. *Chemical Engineering and Processing*, 2015.
- Smith, Wilson; Shun Mao; Ganhua Lu; Alexis Catlett; Junhong Chen; Yiping Zhao, The effect of Ag nanoparticle loading on the photocatalytic activity of TiO₂ nanorod arrays: a article, Elsevier, *Chemical Physics Letters*, 2010, 485, 171–175.
- Tamaekong, N.; C. Liewhiran; A. Wisitsoraat; A. Tuantranont; S. Phanichphant, Ultra-sensitive H₂ sensors based on flame-spray-made Pd-loaded SnO₂ sensing films. *Sensors and Actuators B*, 2013, 176, 893– 905.
- Tantis, Iosif; Maria Vittoria Dozzi; Luca Giacomo Bettini; Gian Luca Chiarello; Vassilios Dracopoulos; Elena Selli; Panagiotis Lianos, Highly functional titania nanoparticles produced by flame spray pyrolysis. *Photoelectrochemical and solar cell applications*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015.
- Tuantranont, Adisorn; Chaikarn Liewhiran; Nittaya Tamaekong; Anurat Wisitsoraat; Sukon Phanichphant, The effect of Pt nanoparticles loading on H₂ sensing properties of flame-spray-made SnO₂ sensing films. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 147, 661-672.
- Uchiyama, Hiroaki; Ryosuke Nagao; Hiromitsu Kozuka, Photoelectrochemical properties of ZnO–SnO₂ films prepared by sol–gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 554, 122–126.
- Umar, Ahmad; Randeep Lamba; S.K.Mehta; Sushil Kumar Kansal, ZnO doped SnO₂ nanoparticles heterojunction photo-catalyst for environmental remediation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015.
- Vanderwiel, David dan Ambareesh D. Murkute, Active Sites Evaluation of Vanadia Based Powdered and Extruded SCR Catalysts Prepared on Commercial Titania. *Catal Lett*, 2015, 145, 1224–1236.
- Wang, Fan; Xuetang Xua; Yuanxing Gea; Hong Wang; Bin Lia; Liuhui Yu; Yanyan Liang; Kun Chen, Sol–gel synthesis and enhanced photocatalytic activity of doped bismuth tungsten oxide composite. *Materials Research Bulletin*, 2015, 73, 385–393.
- Wang, Junjing; Shuiqing Li; Wen Yan; Stephen D. Tse; Qiang Yao, Synthesis of TiO₂ nanoparticles by premixed stagnation swirl flames: a article, Elsevier, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2010.
- Wang, Yude; Qiuying Mu; Guofeng Wang; Zhenlai Zhou, Sensing characterization to NH₃ of nanocrystalline Sb-doped SnO₂ synthesized by a

- nonaqueous sol-gel route. *Sensors and Actuators B*, 2010, 145, 847-853.
- Xiaoming, Fu, Synthesis and Optical Absorption Properties of Anatase TiO₂ Nanoparticles via a Hydrothermal Hydrolysis Method. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(5), 1067-1070.
- Yoshio, Nosaka dan Zhang, Jie, Generation of OH Radical and Oxidation Mechanism in Photocatalyst of WO₃ and BiVO₄ powders. *Journal of Photochemistry and Photobiology: A Chemistry*, 2015, 303-304, 53-58.
- Yuan, Wenxia; Da Wang; Zhongnan Guo; Yuan Peng, Visible light induced photocatalytic overall water splitting over micro-SiC driven by the Z-scheme system. *Catalysis Communications*, 2015, 61, 53-56.
- Zeng, Wen; Bin Miao; Shahid Hussain; Qiuping Mei; Sibao Xu; He Zhang; Yanqiong Li; Tianming Li, Large scale hydrothermal synthesis of monodisperse hexagonal WO₃ nanowire and the growth mechanism. *Materials Letters*, 2015, 147, 12-15.
- Zhang, Hui; Zhenwei Yang; Xingtao Zhang; Ningtao Mao, Photocatalytic effects of wool fibers modified with solely TiO₂ nanoparticles and N-doped TiO₂ nanoparticles by using hydrothermal method. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 254, 106-114.
- Zheng, Yuhong; Li Fu; Wen Cai; Aiwu Wang, Photocatalytic hydrogenation of nitrobenzene to aniline over tungsten oxide-silver nanowires. *Materials Letters*, 2014, 142, 201-203.