

REVIEW: SINTESIS TITANIUM DIOKSIDA NANOPARTIKEL

Taufik Rahman¹, Muhammad A. Fadhlulloh¹, Asep Bayu D. Nandiyanto^{1*}, Ahmad Mudzakir¹

¹Program Studi Kimia, Jurusan Pendidikan Kimia, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudhi no. 229, Bandung 40154, Jawa Barat, Indonesia

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

Abstrak

Titanium dioksida (TiO₂) merupakan suatu material yang memiliki berbagai keunggulan baik dari segi sifat fisika maupun sifat kimia. Keunggulan sifat yang dimiliki TiO₂ ini menjadikannya memiliki aplikasi yang sangat luas dalam berbagai bidang. Performa TiO₂ tergantung pada metode sintesis yang berpengaruh terhadap ukuran partikel, kristalinitas, kemurnian, dan komposisi fasa (anatase, brookite, dan rutile). Sehingga perlu pendekatan lebih lanjut untuk mengetahui efektifitas berbagai metode yang digunakan para peneliti dalam melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel. Namun, tidak semua rangkuman jurnal yang ada menunjukkan informasi yang detail dan menyeluruh baik dari segi penjabaran metode maupun aplikasi materialnya. Dalam paper ini akan dikaji beberapa metode yang dapat digunakan dalam proses sintesis TiO₂ nanopartikel, diantaranya: metode sol gel, metode hidrotermal, metode hidrolisis, metode *supercritical-drying*, metode pemrosesan dengan larutan basa, *stagnation swirl flame* (SSF), teknik *Solvothermal*, metode biomassa bakteri, dan teknik termolisis. Selain itu, akan dijabarkan juga informasi terkait aplikasi TiO₂ nanopartikel dalam berbagai bidang seperti: *dye sensitized solar cell* (DSSC), fotodegradasi zat warna, antibakterial, komposit logam, komposit polimer, dan degradasi senyawa organik.

Kata kunci: titanium dioksida nanopartikel, metode sintesis, aplikasi

Abstract

Titanium dioxide (TiO₂) is a material that has a variety of advantages in terms of both physical properties and chemical properties. Because of the advantages owned by TiO₂, it has a very wide application in many fields. Performance of TiO₂ depends on the method of synthesis that affects the particle size, crystallinity, purity, and composition phase (anatase, brookite, and rutile). So, it needs further approach to determine the effectiveness of various methods used by researchers in conducting the synthesis of TiO₂ nanoparticles. 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 TiO₂ nanopartikel, including: sol-gel method, hydrothermal method, hydrolysis method, the method of supercritical-drying, processing method with an alkaline solution, swirl stagnation flame (SSF), the technique Solvothermal, bacterial biomass methods, and techniques thermolysis. In addition, this paper also gives information about TiO₂ nanoparticle applications in various fields such as: dye-sensitized solar cell (DSSC), photodegradation of the dye, antibacterial, metal composites, polymer composites, and the degradation of organic compounds.

Keywords: titanium dioxide nanoparticles, methods of synthesis, application

1. PENDAHULUAN

Titanium dioksida (TiO₂) merupakan suatu material yang memiliki beberapa keunggulan diantaranya memiliki sifat optik yang baik [Wei, dkk.

(2013)], tidak beracun [Chen, dkk. (2012), Wei, dkk. (2013), Smith, dkk. (2010), Pandi, dkk. (2013), Dastan, dkk. (2014), Hema, dkk. (2013), Zhou, dkk. (2009), Habib, dkk. (2013)], inert [Wei, dkk. (2013), Zhou, dkk.

(2009)], memiliki aktivitas fotokatalis yang baik [Smith, dkk. (2010), Chen, dkk. (2012), Pang, dkk. (2012), Ahmad, dkk. (2007), Habib, dkk. (2013)], harganya murah [Smith, dkk. (2010), Kim, dkk. (2005), Hema, dkk. (2013), Shahini, dkk. (2011), Zhou, dkk. (2009), Habib, dkk. (2013)], berlimpah [Smith, dkk. (2010)], tidak larut dalam air [Smith, dkk. (2010)], semikonduktor dengan *band gap* yang lebar [Chen, dkk. (2012), Hsu, dkk. (2010), Vijayalaxmi, dkk. (2012)], memiliki luas permukaan yang besar [Chen, dkk. (2012), Pang, dkk. (2012)], fotosensitif [Kim, dkk. (2005), Hsu, dkk. (2010), Hema, dkk. (2013)], sifat optik yang baik [Chen, dkk. (2009), Ahmad, dkk. (2007), Dastan, dkk. (2014)], ramah lingkungan [Hsu, dkk. (2010)], stabilitas mekanik tinggi [Hsu, dkk. (2010), Hema, dkk. (2013)], sifat dielektrik [Ahmad, dkk. (2007), Hema, dkk. (2013)], *biocompatible* [Ahmad, dkk. (2007), Dastan, dkk. (2014)], stabilitas termal tinggi [Dastan, dkk. (2014), Hema, dkk. (2013)], dan stabilitas kimia tinggi [Kim, dkk. (2005), Pang, dkk. (2012), Dastan, dkk. (2014), Hema, dkk. (2013), Habib, dkk. (2013)]. Keunikan sifat ini juga dapat ditingkatkan dengan mendesain TiO₂ dengan berbagai macam ukuran partikel [Sagadevan (2013), Wang, dkk. (2010), Venckatesh, dkk. (2012), Abbad, dkk. (2012)], kristalinitas [Sagadevan (2013), Abbad, dkk. (2012)], morfologi kristal [Sagadevan (2013), Wang, dkk. (2010), Abbad, dkk. (2012)], kemurnian [Wang, dkk. (2010)], komposisi fasa [Venckatesh, dkk. (2012)], dan dispersitas [Venckatesh, dkk. (2012)]. Dengan berbagai keunggulan tersebut, TiO₂ banyak diaplikasikan sebagai:

- (1) Pewarna [Shahini, dkk. (2011), Pawar, dkk. (2012)] dalam industri cat [Wei, dkk. (2013), Chen dkk. (2009)], kertas [Wei, dkk. (2013), Chen, dkk. (2009)] dan plastik [Wei, dkk. (2013), Chen, dkk. (2009)].
- (2) Penjernih air [Smith, dkk. (2010), Chen, dkk. (2012), Hema, dkk. (2013), Wang, dkk. (2010), Pawar, dkk. (2012)].
- (3) Penghasil hidrogen dari pemutusan ikatan air [Smith, dkk. (2010)].
- (4) Material yang dapat meregenerasi diri [Smith, dkk. (2010), Pandi, dkk. (2013), Venckatesh, dkk. (2012), Pawar, dkk. (2012)].
- (5) Digunakan dalam degradasi senyawa organik [Chen, dkk. (2012), Chen, dkk. (2009), Dastan, dkk. (2014), Pawar, dkk. (2012)].
- (6) Digunakan dalam degradasi senyawa beracun [Hsu, dkk. (2010), Ahmad, dkk. (2007), Dastan, dkk. (2014), Zhou, dkk. (2009)].
- (7) Pembersih dan desinfektan pada permukaan material [Ahmad, dkk. (2007)].
- (8) Aditif pada banyak aplikasi senyawa [Ahmad, dkk. (2007)].
- (9) Sensor [Sagadevan (2013), Dastan, dkk. (2014), Venckatesh, dkk. (2012), Chekina, dkk. (2013), Abbad, dkk. (2013), Pawar, dkk. (2012)].

- (10) Alat optik [Sagadevan (2013), Dastan, dkk. (2014), Shahini, dkk. (2011), Chekina, dkk. (2013), Abbad, dkk. (2013)].
- (11) Penghalau dan penghalang ultraviolet (UV) [Pandi, dkk. (2013)].
- (12) Antibakteri [Pandi, dkk. (2013)].
- (13) Fotokatalis [Chien, dkk. (2008), Bessekhoud, dkk. (2003), Sagadevan (2013), Pandi, dkk. (2013), Shahini, dkk. (2011), Venckatesh, dkk. (2012), Abbad, dkk. (2013)].
- (14) Sel surya [Pandi, dkk. (2013), Dastan, dkk. (2014), Hema, dkk. (2013), Wang, dkk. (2010), Chekina, dkk. (2013), Bessekhoud, dkk. (2003), Pawar, dkk. (2012)].
- (15) *Biological coating* [Dastan, dkk. (2014)].
- (16) Pembuatan dielektrik tipis *dynamic random access memory* (DRAM) [Dastan, dkk. (2014), Shahini, dkk. (2011)].
- (17) Penguat sifat-sifat polimer [Hema, dkk. (2013), Zhou, dkk. (2009)].
- (18) Adsorben [Vijayalaxmi, dkk. (2012)].

TiO₂ mempunyai tiga jenis bentuk kristal diantaranya: rutil (tetragonal), anatase (tetragonal), dan brookite (ortorombik) [Kim, dkk. (2005), Dastan, dkk. (2014), Shahini, dkk. (2011), Chekina, dkk. (2013)]. Diantara ketiganya, TiO₂ kebanyakan berada dalam bentuk rutil dan anatase yang keduanya mempunyai struktur tetragonal. Secara termodinamik kristal anatase lebih stabil dibandingkan rutil [Dastan, dkk. (2014)]. Berdasarkan ukurannya, anatase secara termodinamika stabil pada ukuran kristal kurang dari 11 nm, brookite antara 11 dan 35 nm, dan rutil lebih dari 35 nm [Wang, dkk. (2010)]. Rutil mempunyai stabilitas fasa pada suhu tinggi dan mempunyai *band gap* sebesar 3.0 eV (415 nm), sedangkan anatase yang terbentuk pada suhu yang rendah memiliki *band gap* sebesar 3.2 eV (380 nm) [Kim, dkk. (2005)].

Oleh karena TiO₂ banyak memiliki keunggulan, banyak penelitian telah dilakukan. Bahkan, ringkasan mengenai pembuatan TiO₂ telah banyak dilaporkan, contohnya oleh Zhang, dkk (2011).

Dalam paper ini, kami akan membahas mengenai berbagai macam cara untuk membuat TiO₂ nanopartikel. *Review* ini terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu: bagian pendahuluan berisi informasi terkait berbagai keunggulan sifat, aplikasi dan jenis TiO₂ nanopartikel. Pada bagian kedua, kami akan membahas mengenai metode yang berisi informasi tentang berbagai metode yang digunakan para peneliti dalam melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel yang dilengkapi bahan kimia, hasil, dan beberapa keunggulan serta kekurangan metode tersebut. Pada bagian terakhir dibahas mengenai aplikasi dan informasi penerapan TiO₂ nanopartikel dalam berbagai bidang yang disertai metode sintesis dan hasil yang diperoleh.

Berbeda dengan *review* oleh Zhang, dkk. (2011), yang menganalisis bentuk permukaan fotoanoda berbahan dasar TiO₂ yang dikompositkan dengan logam oksida, pengaruh bentuk permukaan terhadap

efisiensi sel surya, metode sintesis tidak dijabarkan secara rinci dan hanya mengkaji aplikasi komposit TiO₂/logam oksida sebagai fotoanoda pada sel surya. Pada *review* ini akan dibahas mengenai beberapa metode umum yang digunakan para peneliti dalam sintesis TiO₂ nanopartikel secara terperinci dan pemanfaatan TiO₂ baik sebagai komposit maupun nanopartikel dalam berbagai bidang yang dikaji secara menyeluruh.

2. METODE

2.1 Metode Sol Gel

Pada metode sol gel, secara garis besar TiO₂ disintesis dari sumber titanium yang dipanaskan pada suhu tertentu. Metode sol gel dapat membuat suatu partikel berukuran nano, ukuran seragam, tidak menggumpal, murni, homogen, dilakukan pada suhu rendah, dan dapat mengontrol distribusi massa. Contoh hasil penelitian dengan berbagai macam cara dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Kim, dkk. (2005) mensintesis TiO₂ nanopartikel dari titanium tetraisopropoksida dengan larutan asam nitrat pada suhu 80°C. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ nanopartikel yang dihasilkan berbentuk anatase. Konsentrasi TiO₂ menjadi semakin banyak ketika suhu pemanasan ditingkatkan.

Mirip dengan Kim, dkk. Rahim, dkk. (2012) juga membuat TiO₂ nanopartikel dari titanium isopropoksida. Namun Rahim, dkk menambahkan isopropil alkohol 99% dengan mengatur pH pada rentang 2.0-2.5 (dengan HNO₃). TiO₂ nanopartikel dengan metode Rahim, dkk berbentuk kotak pada fasa anatase dan ukuran partikel 5 nm.

Sagadevan (2013) melakukan sintesis nanopartikel TiO₂ dengan mencampurkan larutan H₂O₂ dengan titanium tetraisopropoksida (TTIP) dalam air. Gambar 2 merupakan produk TiO₂ kristal yang dihasilkan berupa anatase, berbentuk aglomerasi bola dan kotak, berukuran 13 nm.

Dastan, dkk. (2014) melakukan sintesis TiO₂ dengan penambahan berbagai jenis surfaktan. Bahan yang digunakan diantaranya: Titanium Isopropoksida, CH₃COOH, asam oleat, *Oley amine*, etanol, aquades, aseton. Ukuran partikel TiO₂ berdasarkan XRD hasil kalsinasi dengan variasi surfaktan adalah (a) asam asetat T: 550°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 27,44 nm, T: 950°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 40,50 nm (b) *Oley amine* T: 550°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 23,10 nm, T: 950°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 42-60 nm (c) asam oleat T: 550°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 23,80 nm, T: 950°C menghasilkan TiO₂ dengan ukuran 37,50 nm.

Hema, dkk. (2013) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel dengan metode sol gel pada suhu ruang tanpa kalsinasi. Bahan yang digunakan adalah TiO₂ dan trinitrat sitrat. Produk titania yang diperoleh adalah anatase, berbentuk bulat homogen, ukuran 86 nm, dan tidak ada agregat.

Shahini, dkk. (2011) melakukan sintesis TiO₂ nanopowder dengan variasi pemanasan. Bahan yang

digunakan adalah trietanolamin dan titanium (IV) isopropoksida dengan rasio 2:1. Variasi suhu yang digunakan adalah dari 130-160°C. Hasil menunjukkan bahwa meskipun suhu pemanasan berubah jenis TiO₂ tidak berubah yaitu anatase bentuk bulat homogen dengan ukuran 12-25 nm. Kristalinitas dan ukuran partikel pada suhu 130°C (12% dan 10 nm), 140°C (14% dan 15 nm), 150°C (19% dan 18 nm), 160°C (21% dan 24 nm). Karakterisasi TiO₂ nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 2.

Lee, dkk. (2012) membuat TiO₂ dari titanium (IV) isopropoksida ditambah etanol dan aquades. Hasil menunjukkan TiO₂ nanopartikel berukuran 25 nm.

Vijayalakshmi, dkk. (2012) menggunakan campuran titanium (IV) isopropoksida, etanol, dan aquades rasio Ti: H₂O = 1:4 untuk membuat TiO₂, untuk mengatur pH digunakan HNO₃. Hasil TiO₂ nanopartikel via sol-gel lebih kristalin dengan ukuran 7 nm, bentuk bulat sempurna, dan band gap 3.54 eV. Karakterisasi TiO₂ nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Abbad, dkk. (2012) membuat TiO₂ nanopartikel dari tetraisopropoksida 97%, Ti (OC₃H₇)₄, Etanol, HNO₃, aquades, 2-klorofenol, 2,4,6-trichlorophenol, 2,4-didiklorofenol. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ nanopartikel berbentuk bulat, dan ukuran menjadi semakin besar dengan peningkatan suhu kalsinasi. Karakterisasi TiO₂ nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 1.

Shabab, dkk. (2013) membuat TiO₂ nanopartikel dengan memasukan TiCl₄ 98% pada etanol. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ nanopartikel memiliki absorbansi maksimum pada panjang gelombang 325 nm, TiO₂ setelah kalsinasi 500°C memiliki ukuran ±45 nm, sedangkan sebelum kalsinasi memiliki ukuran ± 100 mikron.

Pan, dkk. (2013) melakukan sintesis nanopartikel TiO₂ dari campuran CH₃COOH, etanol anhidrat, dan tetrabutyl titanate pada suhu ruang. TiO₂ nanopartikel dimodifikasi dengan mencampurkan surfaktan, CH₃COOH glasial, etanol anhidrat dan tetrabutyl titanate. Hasil menunjukkan TiO₂ nanopartikel tanpa kalsinasi berbentuk amorph dengan ukuran 10-15 nm, 200°C berbentuk amorf, 400°C jenis anatase, 600°C jenis rutile dan anatase.

Thangavelu, dkk. (2013) melakukan sintesis TiO₂ dari titanium tetraisopropoksida, etanol, dan aquades dengan rasio Ti: H₂O = 1:4. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ adalah jenis anatase berukuran 6 nm.

2.2 Hidrotermal

Beberapa contoh hasil penelitian dengan cara hidrotermal dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada gambar ini dibahas tentang beberapa ukuran dan morfologi yang dihasilkan.

Liu, dkk. (2014) telah membuat TiO₂ nanopartikel dari asam asetat, tetrabutyl titanate, dan butanol. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ nanopartikel berbentuk bulat dengan ukuran 0.318 nm. Karakterisasi TiO₂

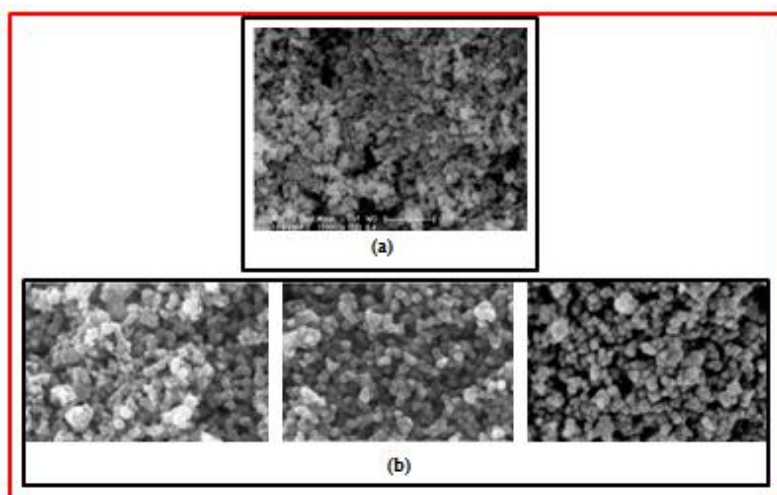
nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Lee, dkk. (2012) melakukan sintesis TiO_2 *nanotube* dari TiO_2 dalam NaOH pada suhu kalsinasi 500°C . Hasil menunjukkan TiO_2 *nanotube* berbentuk tabung dengan diameter 50–100 nm. Karakterisasi TiO_2 nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 3.

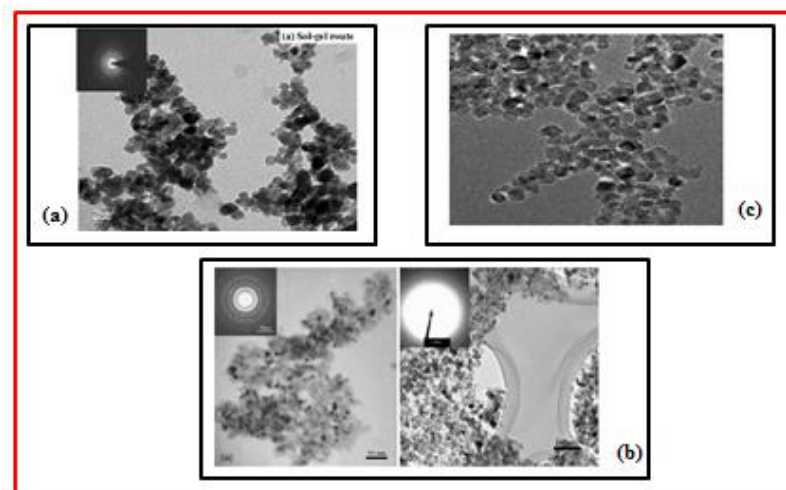
Mirip dengan Lee, dkk. (2012), Vijayalakshmi, dkk. (2012) juga membuat TiO_2 nanopartikel dari TTIP dalam NaOH pada suhu kalsinasi 450°C . Hasil

menunjukkan TiO_2 nanopartikel lebih amorph dengan ukuran ± 17 nm. Karakterisasi TiO_2 nanopartikel dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

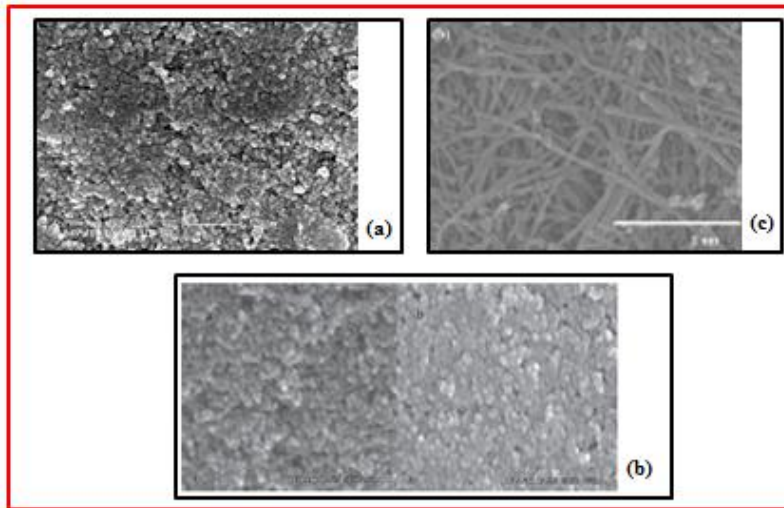
Akarsu, dkk. (2006) melakukan sintesis TiO_2 nanopartikel dari tetrabutylortotitanat, HCl, dan aquades. Rasio H_2O /tetrabutylortotitanat = 2.06, HCl/tetrabutylortotitanat = 0.295. Hasil menunjukkan nanopartikel TiO_2 merupakan anatase dengan ukuran partikel 3–7 nm, luas permukaan $40.84 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, dan ukuran mikropori 16 \AA .



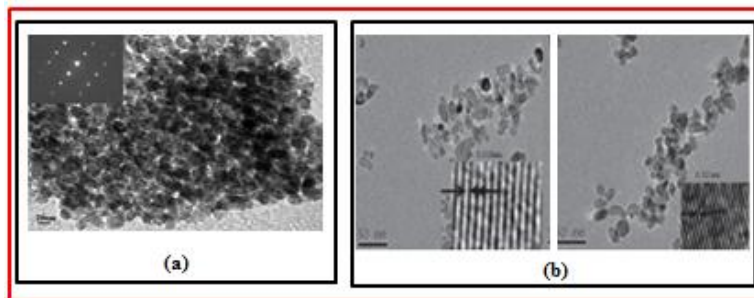
Gambar 1. Analisis SEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode sol gel yang didapat dari: (a) Vijayalakshmi, dkk. (2012), dan (b) Abbad, dkk. (2012).



Gambar 2. Analisis TEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode sol gel yang didapat dari: (a) Vijayalakshmi, dkk. (2012), (b) Shahini, dkk. (2011), dan (c) Sagadevan, dkk. (2013).



Gambar 3. Analisis SEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode hidrotermal yang didapat dari: (a) Vijayalakshmi, dkk. (2012), (b) Liu, dkk. (2014), dan (c) Lee, dkk. (2012).

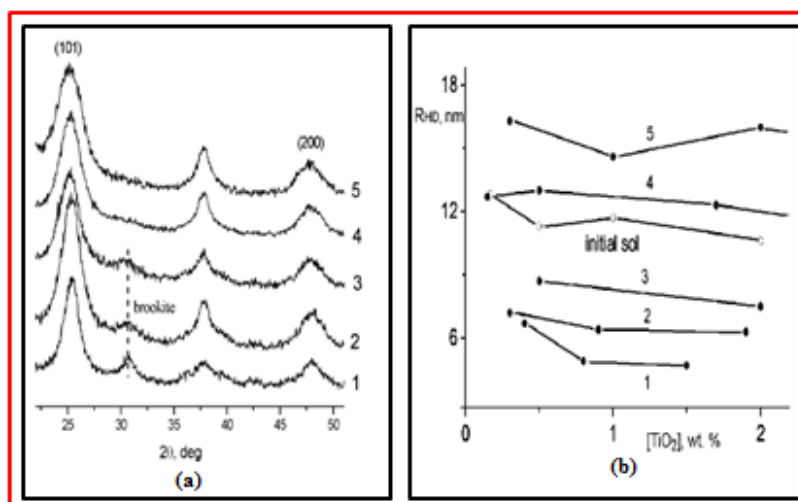


Gambar 4. Analisis TEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan metode hidrotermal yang didapat dari: (a) Vijayalakshmi, dkk. (2012), dan (b) Liu, dkk. (2014).

2.3 Hidrolisis

Verevkina, dkk. (2007) melakukan isolasi nanokristal TiO_2 dengan asam kuat. Bahan yang

digunakan adalah titania alkoksida, titania tetraklorida, HCl dan HNO_3 . Gambar 5 menunjukkan TiO_2 adalah anatase berukuran 2.9–5.6 nm.



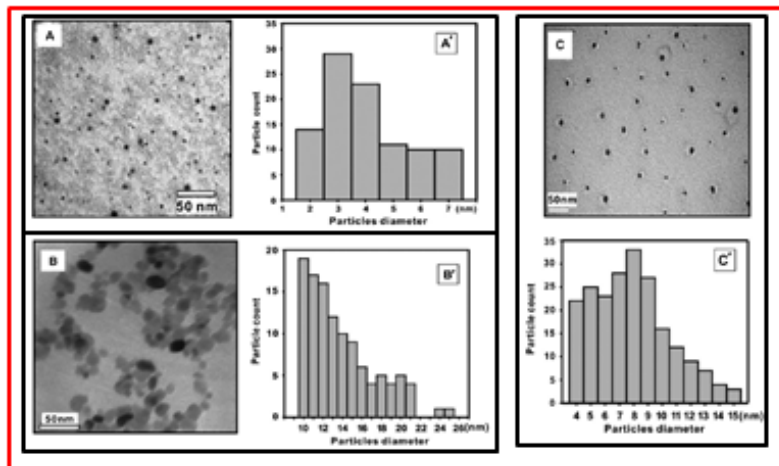
Gambar 5. Analisis produk TiO_2 nanopartikel dengan metode hidrolisis yang didapat dari Verevkina, dkk. (2007) dengan (a) XRD TiO_2 nanopartikel, dan (b) Distribusi jari jari TiO_2 nanopartikel.

2.4 Supercritical-drying

Metode ini memiliki keunggulan mampu menghasilkan TiO₂ powder berukuran kurang dari 10 nm, namun masih terdapat partikel TiO₂ berbentuk amorf dengan ukuran 2–7 nm.

Chien, dkk. (2008) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel dari campuran titanium (IV)

isopropoksida (TTIP) dan surfaktan dalam CO₂ liquid bertekanan 30. Hasil (Gambar 6) menunjukkan TiO₂ nanopartikel sebelum kalsinasi memiliki ukuran partikel 2–7 nm dan bentuk bulat. TiO₂ nanopartikel setelah kalsinasi memiliki ukuran 10–26 nm dan bentuk bulat. TiO₂ nanopartikel dengan penggunaan surfaktan memiliki ukuran 4–15 nm dan bentuk bulat.

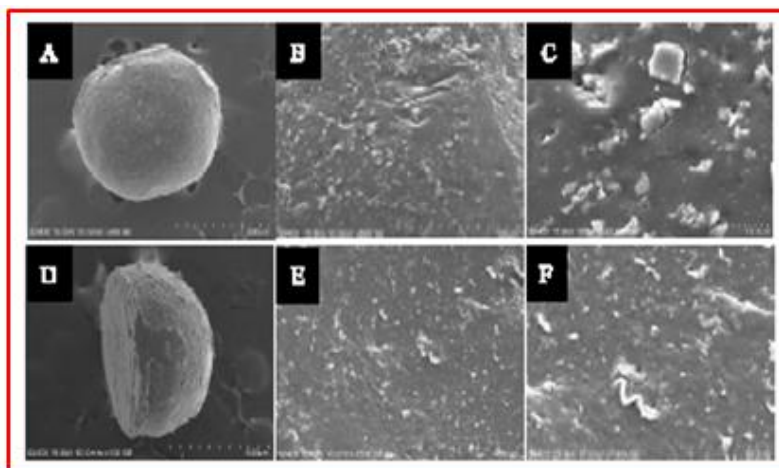


Gambar 6. Analisis produk TiO₂ nanopartikel dengan metode *supercritical-drying* yang didapat dari Chien, dkk. (2008) dengan (a) TEM TiO₂ nanopartikel tanpa kalsinasi, (b) TEM TiO₂ nanopartikel setelah kalsinasi, (c) TEM TiO₂ nanopartikel turunan sampel induk, (a') Distribusi jari jari TiO₂ nanopartikel sebelum kalsinasi, (b') distribusi jari jari TiO₂ nanopartikel setelah kalsinasi, dan (c') Distribusi jari jari TiO₂ nanopartikel turunan sampel induk.

2.5 Pemrosesan Dalam Alkali

Kelebihan metode ini adalah tidak diperlukan surfaktan yang memungkinkan menjadi pengotor produk TiO₂ nanopartikel.

Shiang, dkk. (2014) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel dari TiCl₄ dan NH₄OH. Hasil menunjukkan TiO₂ nanopartikel yang dihasilkan berbentuk bulat dan setengah bola seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Analisis produk TiO₂ nanopartikel dengan metode pemrosesan dengan larutan basa yang didapat dari Shiang, dkk. (2014) dengan (a) SEM TiO₂ nanopartikel dan chitosan bentuk bola, (b) (c) Perbesaran daerah permukaan (a), (d) SEM TiO₂ nanopartikel dan chitosan setengah bola, (e) (f) Perbesaran daerah permukaan (d).

2.6 Stagnation Swirl Flame (SSF)

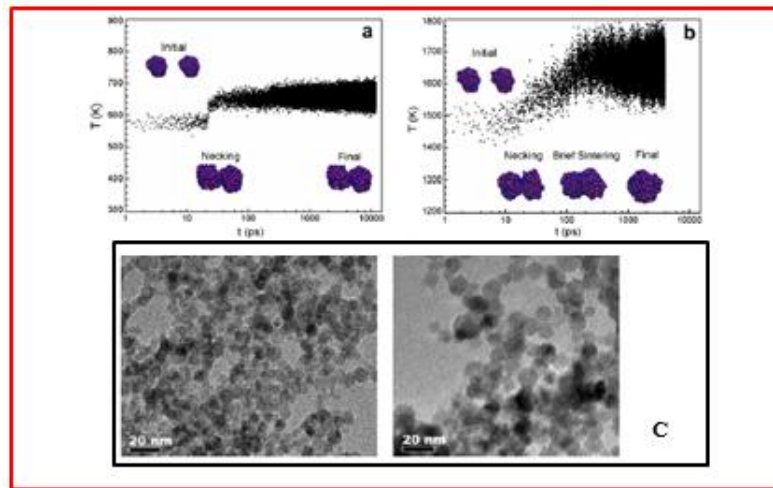
Keunggulan metode ini diantaranya: (1) kemurnian anatase sangat tinggi, (2) ukuran, kristalinitas, dan

kemurnian dapat dikontrol (3) suhu dapat dikontrol (4) pengumpulan TiO₂ lebih mudah. Kekurang metode

ini adalah dengan bertambahnya jarak antara burner dengan substrat dapat memperbesar ukuran partikel.

Wang, dkk (2010) membuat TiO₂ nanopowder dari tetraisopropoksida dengan menggunakan instrumen *stagnation swirl flame* (SSF). Parameter yang diatur diantaranya 1.0 L/menit untuk gas pembawa, 0.025

g/menit untuk titania, Metana 2,25 L/menit, Oksigen 6.60 L/menit, Nitrogen 20.0 - 27.15 L/menit. Hasil menunjukkan bahwa TiO₂ nanopartikel semakin besar seiring bertambah besarnya jarak *burner* dan substrat. Karakterisasi TiO₂ nanopartikel dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Analisis produk TiO₂ nanopartikel dengan metode *Stagnation Swirl Flame* (SSF) yang didapat dari Wang, dkk. (2010) dengan (a) Skema pembentukan TiO₂ nanopartikel pada suhu 573 K, (b) Skema pembentukan TiO₂ nanopartikel pada suhu 1473 K, dan (c) SEM TiO₂ nanopartikel.

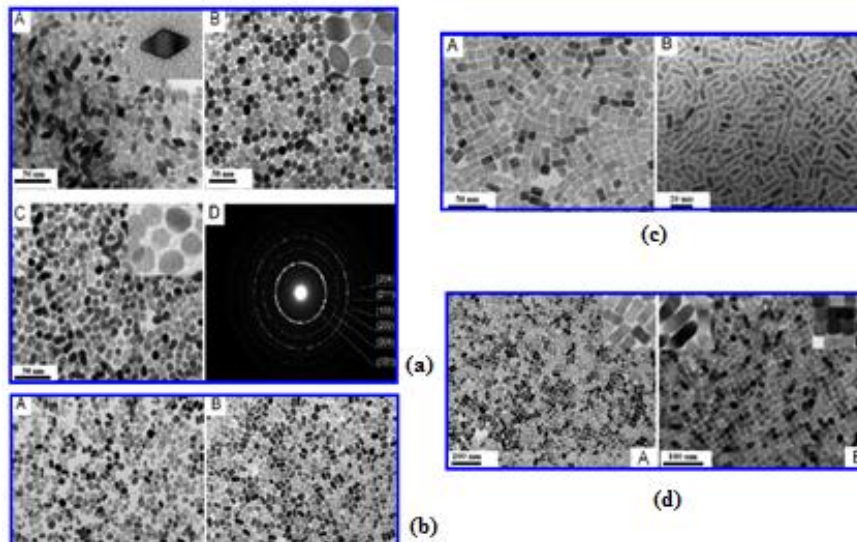
2.7 Teknik *Solvothermal*

Danh, dkk (2009) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel berbagai bentuk dari campuran titania

butoksida (TB), asam oleat (AO), oley amida (OM) dalam etanol. Hasil TiO₂ yang diperoleh dapat dilihat di Tabel 1 dan Gambar 9.

Tabel 1. Produk TiO₂ nanokristal dari Danh, dkk. (2009) dengan rasio komposisi titania butoksida, asam oleat dan oley amida berbeda.

| No | Rasio komposisi | | | Ukuran Kristal TiO ₂ | Morfologi |
|----|-----------------|----|----|---------------------------------|--|
| | TB | AO | OM | | |
| 1 | 1 | 4 | 6 | 10 - 20 nm | <i>Rhombic</i> |
| 2 | 1 | 5 | 5 | 10 -15 nm | <i>Truncated rhombic</i> |
| 3 | 1 | 6 | 4 | 8 nm | Bulat |
| 4 | 2 | 6 | 4 | 20 -25 nm | <i>Dog bone</i> |
| 5 | 2 | 5 | 5 | 20 -25 nm | <i>truncated dan elongated rhombic</i> |
| 6 | 1.3 | 6 | 4 | 15 nm | <i>Elongated spherical</i> |
| 7 | 1.6 | 6 | 4 | 20 nm | <i>Dumbell</i> |
| 8 | 1 | 6 | 4 | - | <i>Nanobar</i> |
| 9 | 1 | 7 | 3 | - | <i>Nanodot</i> |



Gambar 9. Analisis TEM bentuk morfologi TiO_2 nanopartikel dengan teknik *solvothermal* yang didapat dari Dinh, dkk. (2009) dengan (a,A) *rhombic*, (a,B) *truncated rhombic*, (a,C) *bulat* (a,D) SAED TiO_2 nanopartikel *truncated rhombic*, (b,A) *dog bone*, (b,B) *truncated* dan *elongated rhombic*, (c,A) *elongated spherical*, (c,B) *dumbbell*, (d,A) *nanobar*, (d,B) *nanodot*.

Baek, dkk. (2005) membuat TiO_2 nanopartikel dari titanium isopropoksida menggunakan asam oleat dan oktil eter dengan rasio 1 : 1. Hasil menunjukkan bahwa TiO_2 nanopartikel yang dihasilkan berbentuk bulat dengan ukuran ± 5 nm.

2.8 Biomassa Bakteri

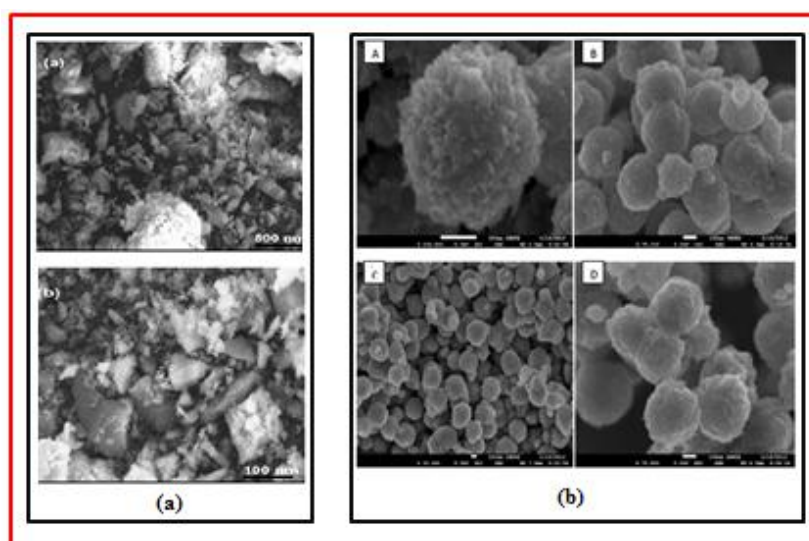
Keunggulan metode ini adalah tidak menggunakan bahan bahan yang mahal, berbahaya, beracun, tidak perlu suhu, tekanan dan pemanasan tertentu. Namun metode ini memerlukan waktu relatif lama, bakteri dapat mencemari tubuh dan kemungkinan

menimbulkan penyakit, adanya protein yang dapat mengikat logam sehingga terjadi aglomerasi.

Malarkodi, dkk. (2013) melakukan sintesis TiO_2 nanopartikel dengan menggunakan *Planomicrobium sp.* Gambar 10 menunjukkan TiO_2 yang diperoleh memiliki kristalinitas tinggi dengan ukuran 8.89 nm.

2.9 Teknik Termolisis

Bhakat, dkk. (2012) melakukan sintesis nanopartikel TiO_2 dari TiCl_4 dengan HCl pada pH 4-5 dan suhu 80°C - 90°C . Gambar 10 menunjukkan bahwa TiO_2 hasil sintesis merupakan jenis anatase dan rutil, berbentuk bulat dengan ukuran 100-300 nm.



Gambar 10. Analisis SEM dari produk TiO_2 nanopartikel dengan (a) metode biomassa bakteri yang didapat dari Malarkodi, dkk. (2013), dan (b) teknik termolisis yang didapat dari Bhakat, dkk. (2012).

3. Aplikasi

3.1 Dye Sensitized Solar Sel (DSSC)

Moon, dkk. (2013) telah membuat komposit fotoanoda berbahan dasar stainless steel/ TiO_2 nanopartikel dengan metode *Dip Coating*, *Sputtering* dan *Sol Gel*. Efisiensi DSSC dari TiO_2 murni adalah 2,48%, metode *sol gel* adalah 2,89%, metode *dip coating* adalah 2,99% dan metode *sputtering* adalah 3,11%. Gambar 11 menunjukkan produk komposit Stainless Steel/ TiO_2 .

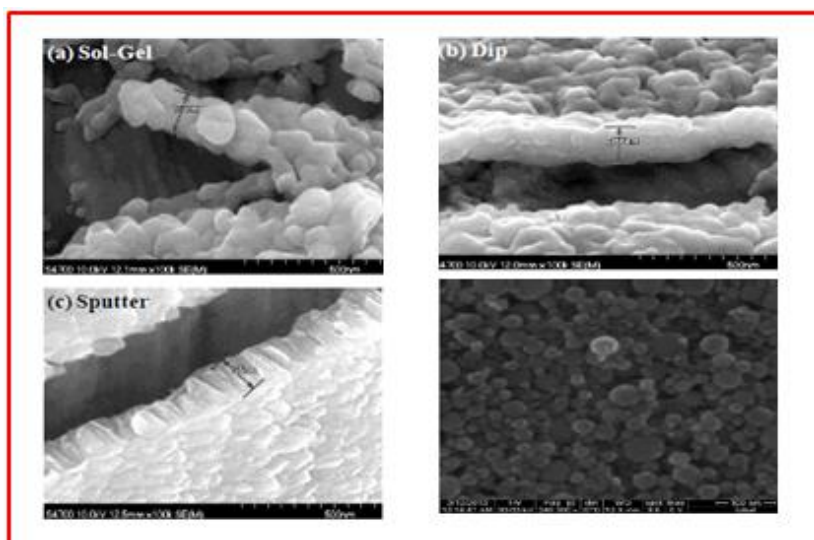
Pandi, dkk. (2013) telah melakukan modifikasi permukaan komposit TiO_2 dengan Hesperidin (zat warna flavanon) yang digunakan untuk DSSC. Bahan yang digunakan adalah serbuk titanium (IV) oksida, hesperidin, kloroform. Hasil komposit yang diperoleh berbentuk bulat dengan ukuran 20 - 30 nm dan efisiensi konversi energi sebesar 70% lebih besar daripada TiO_2 murni. Gambar 11 menunjukkan produk komposit TiO_2 / Hesperidin.

Xuhui, dkk. (2014) telah membuat fotoanoda DSSC dengan menggunakan komposit TiO_2 yang didoping

logam oksida Al_2O_3 , CaO , ZnO , MgO , Fe_2O_3 dan Bi_2O_3 . Efisiensi fotoanoda DSSC yang dihasilkan diantaranya: TiO_2 sebesar 5.08 %, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 6.80 % dalam waktu 90 detik , TiO_2/ZnO sebesar 5.56 % dalam waktu 30 detik , TiO_2/CaO sebesar 6.76 % dalam waktu 90 detik, TiO_2/MgO sebesar 5.44% dalam waktu 60 detik, $\text{TiO}_2/\text{Bi}_2\text{O}_3$ sebesar 1.73 % dalam waktu 30 detik dan $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 1.26% dalam waktu 30 detik.

Liu (2014) membuat komposit Fe/TiO_2 nanopartikel dengan menggunakan $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, TiO_2 , asam asetat, tetrabutyl titanat, dan butanol sebagai bahan utama. Karakteristik komposit TiO_2/Fe berbentuk bulat dengan ukuran 0,321 nm, dengan efisiensi DSSC yang dihasilkan sebesar 7.46%.

Lee, dkk. (2013) membuat komposit fotoanoda TiO_2 nanotubes [TNT] dan TiO_2 nanopartikel. Hasil komposit TiO_2/TNT yang diperoleh memiliki pori, ketebalan 12- 15- μm dan efisiensi dari solar sel sebesar 53.3%.



Gambar 11. Analisis SEM dari komposit stainless stell/ TiO_2 nanopartikel dari Moon, dkk. (2013) dengan (a) metode sol gel (b) metode *dip coating*, (c) metode *sputtering* (d) SEM Hesperidin TiO_2 dari Pandi, dkk. (2013)

3.2 Fotodegradasi Zat Warna

Wei, dkk. (2013) melakukan sintesis fotoanoda TiO_2 berlapis logam oksida menggunakan metode sol gel untuk fotodegradasi Rhodamine B. Bahan yang digunakan adalah TiO_2 , $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$, $\text{Ce}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan NaOH . Hasil untuk degradasi Rhodamine B dari yang terkuat setelah radiasi sinar tampak selama 2 jam adalah berturut-turut TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$, TiO_2/NiO , TiO_2/CoO , $\text{TiO}_2/\text{CeO}_2$, RhB tanpa logam. Analisis fotodegradasi Rhodamine B dapat dilihat pada Gambar 12.

Pang, dkk. (2012) melakukan sintesis nanopartikel *core shell* $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ dengan metode sol gel untuk fotodegradasi methylene blue (MB). Hasil yang diperoleh adalah $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ *core-shell* nanopartikel memiliki aktivitas *photocatalytic* yang

baik untuk fotodegradasi MB. Gambar 12 menunjukkan produk komposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$.

Chen, dkk. (2009) melakukan sintesis titanium dioksida yang dilapisi oleh magnetik poli(metil metakrilat) untuk fotodegradasi *p*-phenylenediamine. Bahan yang digunakan adalah $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, NH_4OH , asam oleat, metil metakrilat, dan TiO_2 . Hasil menunjukkan bahwa komposit $\text{TiO}_2/\text{mPMMA}$ *microspheres* memiliki performa fotokatalisis yang baik dan bersifat insulator.

Hsu, dkk. (2010) melakukan sintesis $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ *core-shell* nanopartikel dengan metode *hydrothermal* sebagai fotokatalisis zat trikloroetilen. Hasil menunjukkan TiO_2 berukuran 10 nm dan Fe_3O_4 berukuran 49 nm. Komposit memiliki sifat fotokatalisis yang dapat diregenerasi.

Stengl, dkk. (2013) membuat komposit grapen oksida/TiO₂ dengan metode hidrolisis termal untuk aktivitas fotokatalis. Bahan yang digunakan adalah H₂SO₄, H₃PO₄, grapen, H₂O₂, TiO₂ dan NH₄OH. Hasil menunjukkan grapen oksida berbentuk lapisan halus besar 5 x 5 mikron dan TiO₂-Grapen Oksida nanokomposit diameter 25-35 nm, spesifik area 200 m².g.

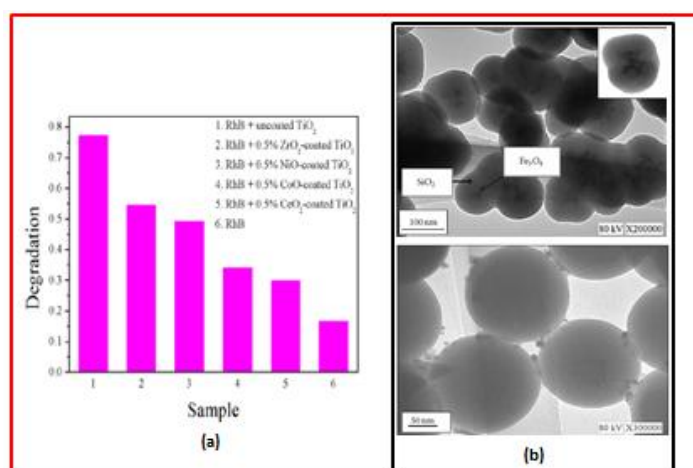
Habib, dkk. (2013) membuat komposit ZnO/TiO₂ dengan teknik *spray-dried* untuk aktivitas fotokatalis. Bahan yang digunakan adalah asam metatitania, NH₃, dan zinc karbonat. Hasil menunjukkan ZnO/TiO₂ bentuk bulat berukuran 500 nm. Komposit ZnO/TiO₂ efektif mendegradasi zat warna pada pH 7.5 dengan rasio 3:1 dan 1:1.

Chekina, dkk. (2013) membuat nanokomposit Pt-TiO₂ dengan metode sol gel. Bahan yang digunakan adalah titanium tetra isopropoksida, asam asetat glasial, H₂O dengan rasio 1:10:200 dan platinum

klorida. Hasil menunjukkan TiO₂ berukuran 12.52 nm dan Pt-TiO₂ berukuran 16.7 nm.

Pawar, dkk. (2012) melakukan sintesis TiO₂ dan Ce/TiO₂ dengan metode sol gel untuk fotokatalitik zat warna. Bahan yang digunakan adalah Ti(OC₂H₅)₄, Ce(NO₃)₃ sebagai sumber Ti dan Ce, HNO₃ untuk mengatur pH pada 2.5 - 3. Hasil menunjukkan komposit Ce/TiO₂ dengan ukuran partikel 16-60 nm berbentuk bulat. Untuk aktivitas fotokatalitik TiO₂ dari yang terendah sampai yang tertinggi dengan berbagai komposisi Ce adalah tanpa Ce, 75% Ce, 25% Ce, 50% Ce.

Hagos (2014) melakukan sintesis komposit TiO₂/WO₃ didoping nitrogen sebagai agent fotokatalis *fenol red*. Bahan yang digunakan adalah titanium dioksida (TiO₂), tungsten trioksida (WO₃), *fenol red*, etanol, dan urea. Hasil menunjukkan aktivitas fotokatalitik komposit N-TiO₂/WO₃ terhadap *fenol red* dibawah radiasi UV sebesar 93.87%.

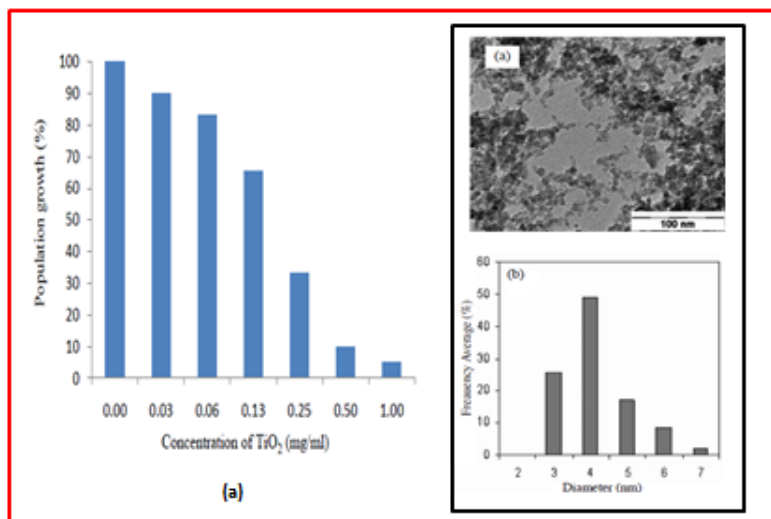


Gambar 12. (a) Analisis fotodegradasi Rhodamine B dari Wei, dkk. (2013) dan (b) analisis TEM Fe₃O₄/SiO₂ dan Fe₂O₃/SiO₂/TiO₂ dari Pang, dkk. (2013).

3.3 Antibakterial

Ahmad, dkk. (2007) membuat TiO₂ nanopartikel dengan proses sonikasi sebagai antibakteri *E. coli*. Bahan yang digunakan adalah TiO₂, *E. Coli* dan medium Luria broth. Gambar 13 menunjukkan bahwa bertambahnya konsentrasi TiO₂ akan menurunkan jumlah bakteri *E. Coli* yang tumbuh dalam medium agar.

Rahim, dkk (2012) membuat TiO₂ nanopartikel dengan metode sol gel sebagai antibakteri *E. Coli*. Pada percobaannya peneliti mengevaluasi pengaruh jumlah konsentrasi TiO₂ nanopartikel terhadap jumlah *E. coli* yang bertahan selama proses fotokatalisis. Gambar 13 menunjukkan jumlah bakteri yang bertahan dari yang paling banyak sampai paling sedikit pada *treatment* dengan UV adalah TiO₂, 0.1 g TiO₂, 2.5 g TiO₂, 1 g TiO₂.



Gambar 13. (a) Analisis pengurangan *E. Coli* oleh TiO_2 dari Ahmad, dkk. (2013) dan (b) analisis TEM dan distribusi ukuran TiO_2 dari Rahim, dkk. (2012).

3.4 Komposit Logam

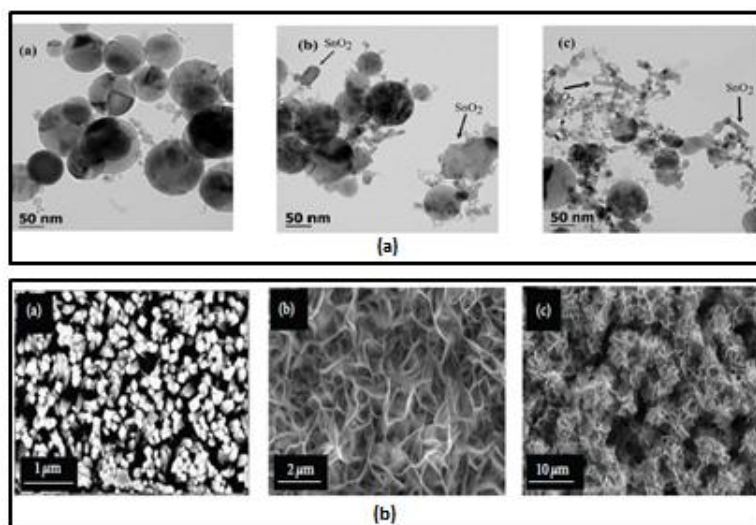
Moon, dkk. (2013) telah membuat suatu komposit stainless steel/ TiO_2 nanopartikel dengan metode *dip coating*, *sputtering*, dan sol gel. Bahan yang digunakan adalah stainless steel, titanium isopropoksida. Komposit yang dihasilkan dari metode *dip coating* berbentuk bulat tidak teratur dengan ukuran 150 nm, dari metode *sputtering* berbentuk selinder beraturan dengan ukuran 150 nm, dan dari metode sol gel berbentuk bulat tidak beraturan ukuran 150 nm.

Yeon, dkk (2004) melakukan sintesis Au/ TiO_2 *core-shell* nanopartikel berasal dari hidrolisis TOAA (titanium oksida asetilasetonat) pada larutan sol emas etanol dalam air. Hasil menunjukkan bahwa semakin banyak konsentrasi TOAA yang ditambahkan maka TiO_2 yang mendoping Au semakin banyak. Produk TiO_2 berukuran 10 nm dengan bentuk bulat.

Akurati, dkk (2005) membuat komposit $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ dengan alat *atmospheric pressure diffusion flame*. Bahan yang digunakan adalah CH_4 99.95%, O_2 99.95%,

$\text{Ti}(\text{C}_3\text{H}_7\text{O})_4$ 99%, dan $\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$ 99%. Parameter alat yang diatur adalah prekursor total 46 g/jam, 120 L/jam untuk N_2 sebagai gas pembawa, 120 L/jam untuk CH_4 sebagai bahan bakar, 720 - 1200 L/jam untuk O_2 sebagai pembakar. Gambar 14 menunjukkan komposit yang dihasilkan adalah (a) Ti/Sn rasio 28.3/1, titania bulat berukuran 50-100 nm dan selenium bulat berukuran 10-20nm (b) Ti/Sn rasio 9/1, titania bulat berukuran 50-100 nm dan selenium kotak berukuran 30 nm (c) Ti/Sn rasio 7/1 titania bulat berukuran 50-100 nm dan Selenium persegi panjang berukuran 40 nm.

Ibupoto, dkk (2014) melakukan sintesis komposit NiO/ TiO_2 heterostruktur sebagai doping pada FTO (*Fluorine Doped Tin Oxida*) dengan menggunakan metode hidrotermal. Bahan dasar yang digunakan adalah titania tetra isopropoksida dan nikel klorideheksahidrat. Gambar 14 menunjukkan bahwa TiO_2 berbentuk *nanorod* berukuran 100-500 nm dan NiO berbentuk rambut.



Gambar 14. (a) Analisis TEM $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ dari Akurati, dkk. (2005) dan (b) analisis SEM (b.a) TiO_2 (b.b) NiO dan (b.c) TiO_2/NiO dari Ibupoto, dkk. (2014).

3.5 Komposit polimer

Shiang, dkk. (2014) melakukan kombinasi polimer chitosan dan TiO₂ nanopartikel menjadi hidrogel yang yang bersifat *reusable, non-agregat, dan recyclable*. Percobaan dilakukan dengan mencampurkan chitosan, CH₃COOH, dan TiO₂ nanopartikel dengan agent pengendap NaOH. Gambar 15 menunjukkan komposit yang dihasilkan berbentuk bulat, berwarna putih dengan ukuran 10, 100, dan 300 mikrometer.

Zhuo, dkk. (2009) membuat lapisan yang *biodegradable, antimikroba, dan sifat mekanik tinggi* dari protein *whey* dengan cara menyisipkan TiO₂ nanopartikel. Bahan dasar yang digunakan adalah *whey*, gliserol, TiO₂, dan silikon. Hasil menunjukkan komposit TiO₂/WPI berukuran 200 nm, tidak ada agregasi, ukuran granul 50-100 nm. Penambahan TiO₂ mengubah modulus elastisitas, *tensile strength*, dan kemampuan perpanjangan.

Gaber, dkk. (2013) membuat membran hidrofobik dari campuran titania/alumina dan polimer dengan metode sol gel. Percobaan meliputi: Preparasi kopolimer *acrylic-acrylamide*, preparasi membran alumina dari α -alumina dan poli (vinil alkohol), preparasi suspensi α -alumina dari Al(OH)₃ yang dicampur ammonia, *acrylic-acrylamide copolymer*, poli vinil alkohol, dan *dispersing agent*, preparasi lapisan membran dari AlCl₃ dan TiCl₄ dengan rasio 75% : 25%, 50% : 50%, dan 25% : 75% yang dimasukkan kedalam *acrylic-acrylamide* dan larutan silane. Produk yang dihasilkan adalah gama alumina berbentuk bulat dengan ukuran 65-95 nm sedangkan titania jenis anatase berbentuk heksagonal dengan ukuran 55-108 nm.

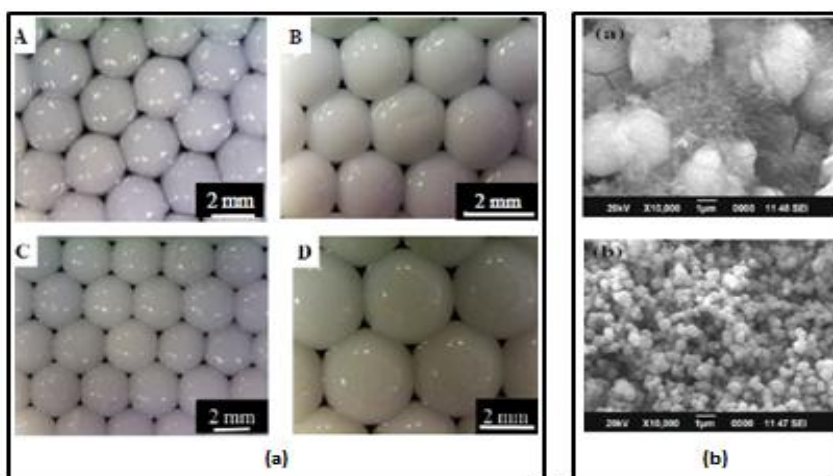
Venckatesh, dkk. (2012) melakukan sintesis komposit nano titania silika dengan poli (vinyl alkohol). Dengan cara mencampurkan titanium tetraklorida, etanol, HCl, aquades dengan rasio 1:2:2:2, kemudian ditambah PVA. Hasil menunjukkan bahwa ukuran komposit Titania/Silika 10-15 nm berbentuk bulat, sedangkan komposit Titania/Silika/PVA berukuran 20-25 nm dengan bentuk bulat.

Sung, dkk. (2003) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel sebagai *filler* polimer dengan cara mencampurkan TiO₂ (P-25, ukuran 25 nm) dan *acrylic-urethane* pada suhu ruang. Gambar 15 menunjukkan bahwa komposit memiliki permukaan kasar dan TiO₂ terdispersi acak dengan ukuran 8 mikron.

Tao, dkk. (2011) membuat komposit polimer berbahan TiO₂ nanopartikel dan poli(glisidil metakrilat). TiO₂ nanopartikel berasal dari Ti(OC₄H₉)₄ yang direaksikan dengan asam asetat dan oleyl amina. Poli (glisidil metakrilat) berasal dari monomer glisidil metakrilat dengan cara polimerisasi dalam air. Hasil menunjukkan TiO₂ nanopartikel berukuran 5-5.3 nm terdistribusi dalam poli (glisidil metakrilat). Komposit berwarna kekuningan, dengan refraktif indeks bertambah seiring bertambahnya TiO₂.

Balachandaran, dkk. (2011) melakukan sintesis komposit polimer Poli (Etilen Glikol)/TiO₂ nanopartikel. Komposit dihasilkan dari pencampuran titanium tetra chloride dengan monomer PEG dalam H₂O. Hasil menunjukkan bentuk TiO₂ tak beraturan dengan ukuran 15-20 nm. Komposit berbentuk teratur dengan aglomerasi antara 25-30 nm.

Tolstov, dkk. (2008) melakukan sintesis mikrokomposit poli (uretan akrilat)/ titania (TiO₂) menggunakan metode *novel*. Bahan yang digunakan adalah Oligooksipropilen bifungsional (OOP2000-2), trifungsional (OOP5000-3), toluen diisosianat (TDI), heksametilen diisosianat (HMDI), etilen glikol (EG), asam asetat, metil metakrilat (MMA), dan tertaisopropoksitanat. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan komposisi berbeda adalah sebagai berikut: PEUA-1 (OOP2000-2/TDI/MEG dengan rasio: 1/2/2 hasil Mr: 2500 g/mol, bentuk linear), PEUA-2 (OOP2000-2/TDI/MEG dengan rasio: 3/4/2, Mr: 7000 g/mol, bentuk linear), PEUA-3 (OOP5000-3/HMDI/MEG dengan rasio: 4/9/6 bentuk bercabang).



Gambar 15. (a.a) Bentuk 2% chitosan, (a.b) komposit TiO₂/ 2% chitosan, (a.c) 3% chitosan, dan (a.d) komposit TiO₂/ 3% chitosan dari Shiang, dkk. (2014) dan (b.a) analisis SEM TiO₂ / SiO₂ (b.b) SEM TiO₂ / SiO₂ / PVA dari Sung, dkk. (2003).

3.6 Degradasi Senyawa Organik

Lin, dkk. (2010) melakukan sintesis TiO₂ nanopartikel dari tetrabutyl titanat dengan metode sol gel dengan variasi suhu 328-358 K, variasi ukuran stirer 1.5 - 3.5 cm, variasi kecepatan pengadukan 500 - 1250 rpm, dan variasi suhu kalsinasi 373 - 773 K. Aktivitas fotokatalitiknya dievaluasi dengan asam asetat. Hasil menunjukkan produk TiO₂ nanopartikel adalah anatase, bentuk tak beraturan, diameter 30-40 nm. Bertambahnya suhu kalsinasi, ukuran stirer, dan kecepatan stirer maka ukuran kristal semakin berkurang. Kemampuan degradasi asam asetat oleh P-25 nanopowder dan anatase TiO₂ nanokristal didoping dengan logam oksida berturut-turut dari yang paling besar sampai yang paling rendah adalah TiO₂/Cu, TiO₂/Fe, TiO₂/Zn, anatase, P-25 TiO₂ nanokristal.

4 KESIMPULAN

TiO₂ nanopartikel dapat disintesis dengan berbagai macam metode, diantaranya: metode sol gel, metode hidrotermal, metode hidrolisis, metode *supercritical-drying*, metode pemrosesan dengan larutan basa, *Stagnation Swirl Flame* (SSF), teknik *Solvothermal*, metode biomassa bakteri, dan teknik termolisis. Keunggulan sifat TiO₂ nanopartikel dimanfaatkan kedalam beberapa aplikasi seperti: Dye Sensitized Solar Cell (DSSC), fotodegradasi zat warna, antibakterial, komposit logam, komposit polimer, dan degradasi senyawa organik.

5 DAFTAR PUSTAKA

Abbad, Muneer M. Ba.; Abdul Amir H. Kadhum; Abu Bakar Mohamad; Mohd S. Takriff; Kamaruzzaman Sopian, Synthesis and Catalytic Activity of TiO₂ Nanoparticles for Photochemical Oxidation of Concentrated Chlorophenols under Direct Solar Radiation: a article, International Journal of Electrochemical Science, 2012, 7, 4871-4888.

Ahmad, Razi; Meryam Sardar, TiO₂ nanoparticles as an antibacterial agents against E. Coli: a article, IJIRSET, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2013, 2(8), 3569-3574.

Akarsu, Murat; Meltem As Ilt Urk; Funda Sayilkan; Nadir K Iraz; Ertu Grul Arpac; Hikmet Sayilkan, A Novel Approach to the Hydrothermal Synthesis of Anatase Titania Nanoparticles and the Photocatalytic Degradation of Rhodamine B: a article, Turk J Chem, 2006, 30, 333-343.

Akurati, Kranthi K.; Andri Vital; Roland Hany; Bastian Bommer; Thomas Graule; Markus Winterer, One-step flame synthesis of SnO₂/TiO₂ composite nanoparticles for photocatalytic applications: a article, Hindawi International Journal of Photoenergy, 2005, 7, 153-161.

Baek, Seong Yong; Seung Yong Chai; Kap Soo Hur; Wan In Lee, Synthesis of Highly Soluble TiO₂ Nanoparticle with Narrow Size Distribution: a

article, Bull Korean Chem. Soc, 2005, 26(9), 1333-1334.

Balachandaran, K.; Dr.R.Venckatesh; Dr.Rajeshwari Sivaraj, Synthesis and Characterization of nano TiO₂ - PEG composite: a article, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2011, 3(5), 4200-4203.

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.

Bhakat, Chittaranjan; Prasoorn Pal Singh; Debashree Bhakat, Uniform TiO₂ nanoparticles synthesis and characterization by thermolysis process: a article, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2012, 4(7), 3081-3085.

C. P.Pandi; Gopinathan; R.Sakthivadivel; M. Kavitha; M.Karuppuchamy, Dye Sensitized Solar cell materials -TiO₂ with Hesperidin: a article, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2013, 2(7), 3237-3244.

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, Elsevier, Journal of Hazardous Materials, 2012, 235-236, 186-193.

Chen, Yi Hung; Yi You Liu; Rong Hsien Lin; Fu Shan Yen, Photocatalytic degradation of p-phenylenediamine with TiO₂-coated magnetic PMMA microspheres in an aqueous solution: a article, Elsevier, Journal of Hazardous Materials, 2009, 163, 973-981.

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.

Dinh, Cao Thang; Thanh-Dinh Nguyen; Freddy Kleitz; Trong On Do, Shape-Controlled Synthesis of Highly Crystalline Titania Nanocrystals: a article, ACSNANO, 2009, 3(11), 3737-3743.

Gaber, Amany Abd Al Azem; Doreya Mohamed Ibrahim; Fawzia Fahm Abd-Aimohsen; Elham Mohamed El-Zanati, Synthesis of alumina, titania, and alumina-titania hydrophobic membranes via sol-gel polymeric route: a article, open access, springer, Journal of Analytical Science and Technology, 2013, 4(18), 1-20.

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.
- Hagos, Tesfaye Teka, Synthesis and Characterization of Nitrogen-Doped TiO₂/WO₃ Nano-Composite Material and its Photocatalytic Activity for Photo-degradation of Phenol Red in Aqueous Solution: a article, International Journal of Innovation and Scientific Research, 2014, 9(2), 357-362.
- 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.
- Hsu, T.F.; T.L. Hsiung; James Wang; C.H. Huang; H. Paul Wang, In situ XANES studies of TiO₂/Fe₃O₄@C during photocatalytic degradation of trichloroethylene: a article, Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2010, 619, 98-101.
- Huang, Keng Shiang; Alexandru Mihai Grumezescu; Ching Yun Chang; Chih Hui Yang; Chih Yu Wang, Immobilization and stabilization of TiO₂ nanoparticles in alkalinesolidificated chitosan spheres without cross linking agent: a article, International Journal of Latest Research in Science and Technology, 2014, 3(2), 174-178.
- Ibupoto, Zafar Hussain; Mazhar Ali Abbasi; Xianjie Liu; M. S. AlSalhi; Magnus Willander, The Synthesis of NiO/TiO₂ Heterostructures and Their Valence Band Offset Determination: a article, Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials, 2014, 1-6.
- Kim, T.K.; M.N. Lee; S.H. Lee; Y.C. Park; C.K. Jung; J.H. Boo, Development of surface coating technology of TiO₂ powder and improvement of photocatalytic activity by surface modification: a article, Elsevier, Thin Solid Films, 2005, 475, 171-177.
- Lee, Chang Hyo; Seung Woo Rhee; Hyung Wook Choi, Preparation of TiO₂ nanotube/nanoparticle composite particles and their applications in dye-sensitized solar cells: a article, Springer, Open Access, Nanoscale Research Letters, 2012, 7(48), 1-5.
- Lin, Kuen Song; Hao Wei Cheng; Wun Ru Chen; Jiang Fu Wu, Synthesis, Characterization and Application of Anatase Typed Titania Nanoparticles: a article, J. Environ. Eng. Manage, 2010, 20(2), 69-76.
- Liu, Qiu Ping, Analysis on dye sensitized solar cells based on Fe-doped TiO₂ by intensity-modulated photocurrent spectroscopy and Mott-Schottky: a article, Elsevier, Chinese Chemical Letters, 2014, 25(3), 953-956.
- Malarkodi C.; K Chitra; S Rajeshkumar; G Gnanajobitha; K Paulkumar; M Vanaja; G Annadurai, Novel Eco Friendly Synthesis of Titanium Oxide Nanoparticles By Using Planomicrobium Sp. And Its Antimicrobial Evaluation: a article, Pelagia Research Library Der Pharmacia Sinica, 2013, 4(3), 59-66.
- Moon, Byung Ho; Youl Moon Sung; Chi-Hwan Han, Titanium oxide Films Prepared by Sputtering, Sol Gel and Dip Coating Methods for Photovoltaic Application: a article, Elsevier, Energy Procedia, 2013, 34, 589 - 596.
- Pan, Hui; Xiao Dong Wang; Shasha Xiao; Lai Gui Yu; Zhijun Zhang, Preparation and characterization of TiO₂ nanoparticles surface modified by octadesyltrimetoxysilane: a article, Indian journal of engineering and materials sciences, 2013, 20, 561-567.
- 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.
- 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.
- Rahim, Sapizah; Shahidan Radiman; Ainon Hamzah, Inactivation of E coli Under Fluorescent Lamp using TiO₂ Nanoparticles Synthesized Via Sol Gel Method: a article, Sains Malaysiana, 2012, 41(2), 219-224.
- Sagadevan, Suresh, Synthesis and electrical properties of TiO₂ nanoparticles using a wet chemical technique: a article, American Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 1(1), 27-30.
- Shahab, M.U.; T.A. Tabish; B. Zaman, Zahra Tariq; M. Kamran, Characterization and synthesis of nanosized TiO₂ particles: a article, Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering Tome, 2013, 9(3), 313-316.
- Shahini, Sharif; Masoud Askari; S K sadrnezhad, Gel-sol synthesis and aging effect on highly crystalline anatase nanopowder: a article, Bull. Mater. Sci, 2011, 34(6), 1189-1195.
- 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.
- Štengl Václav; Snejana Bakardjieva; Tomáš Matys Grygar; Jana Bludská; Martin Kormunda, TiO₂-graphene oxide nanocomposite as advanced photocatalytic materials: a article, Springer, Open access, Chemistry Central Journal, 2013, 7(41), 1-12.
- Sung, Li Piin; Stephanie Scierka; Mana Baghai Anaraki; Derek L. Ho, Characterization of Metal-Oxide Nanoparticles: Synthesis and Dispersion in Polymeric Coatings: a article, Materials Research Society, 2013, 740, 1-6.
- Tao, Peng; Yu Li; Atri Rungta; Anand Viswanath; Jianing Gao; Brian C. Benicewicz; Richard W;

- Siegel; Linda S. Schadler, TiO₂ nanocomposites with high refractive index and transparency: a article, *Journal Materials Chemistry*, 2011, 21, 18623-18629.
- Thangavelu, Kavitha; Rajendran Annamalai; Durairajan Arulnandhi, Preparation and Characterization of Nanosized TiO₂ Powder by Sol-Gel Precipitation Route: a article, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, 3(1), 636-638.
- Tolstov, A.L.; V. F. Matyushov; D. O. Klymchuk, Synthesis And Characterization Of Hybrid Cured Poly (Ether Urethane) Acrylate / Titania Microcomposites Formed From Tetraalkoxytitanate Precursor: a article, *EXPRESS Polymer Letters*, 2008, 2(6), 449-459.
- Venckatesh, Rajendran; Kartha Balachandaran; Rajeshwari Sivaraj, Synthesis and characterization of nano TiO₂-SiO₂:PVA composite a novel route: a article, *Springer, Open access, International Nano Letters*, 2012, 2(15), 1-5.
- Verevkina, O.B. Pavlova; S.N. Chvalun; Yu. A. Shevchuk ozerin; A.n. ozerin, Preparation and structure of stable dispersions of uniform TiO₂ nanoparticles: a article, *Materials Science Poland*, 2007, 25(3), 825-834.
- Vijayalakshmi, R.; V. Rajendran, Synthesis and Characterization of nano-TiO₂ Via Different Methods: a article, *Scholars Research Library Archives of Applied Science Research*, 2012, 4(2), 1183-1190.
- 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.
- Wei, Bing Xin; Lin Zhao; Ting-Jie Wang; Han Gao; Hai-Xia Wu; Yong Jin, Photo-stability of TiO₂ particles coated with several transition metal oxides and its measurement by rhodamine-B degradation: a article, Elsevier, *Advanced Powder Technology*, 2013.
- Wu, Chien I; Jiann Wen Huang; Ya Lan Wen; Shaw Bing Wen; Yun Hwei Shen; Mou Yung Yeh, Preparation of TiO₂ nanoparticles by supercritical carbon dioxide: a article, Elsevier, *Materials Letters*, 2008, 62, 1923-1926.
- Xuhui, Sun; Chang Xinglan; Tuo Wanquan; Wang Dong; Li Kefei, Performance comparison of dye-sensitized solar cells by using different metal oxidecoated TiO₂ as the photoanode: a article, *AIP ADVANCES*, 2014, 4(3), 1-7.
- Yu, Yeon Tae; Paul Mulvaney, Synthesis of Au/TiO₂ Core-shell Structure Nanoparticles and the Crystallinity of TiO₂ Shell: a article, *The Japan Institute of Metals, Rapid Publication, Materials Transactions*, 2004, 45(3), 964-967.
- Zhang, Qifeng; Guozhong Cao, Nanostructured photoelectrodes for dye-sensitized solar cells: a review, Elsevier, *Nano Today*, 2011, 6, 91-109.
- Zhou, J.J.; S.Y. Wang; S. Gunasekaran, Preparation and Characterization of Whey Protein Film Incorporated with TiO₂ Nanoparticles: a article, *JFSN: Nanoscale Food Science, Engineering, and Technology, Journal Of Food Science*, 2009, 74(7), 50-56.