

การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนโดยใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมใน  
กระบวนการโซล-เจล เพื่อย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก  
Preparation of Titanium Dioxide Nanoparticles via Ultrasonic and  
Ultraviolet-Assisted Sol-Gel Methods for Photocatalytic  
Degradation of Methylene Blue

ณัฐญา คุ่มทรัพย์

สาขาวิชาปิโตรเคมีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน  
E-mail: palawatcom@gmail.com

**บทคัดย่อ**

ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการโซล-เจล ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง XRD, Nitrogen adsorption – desorption และ ESR เมทิลีนบลูเป็นสารมลพิษอินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบการย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัลตราโซนิกควบคู่กับอัลตราไวโอเลตในกระบวนการโซล-เจล ( $\text{TiO}_2\text{-US/UV}$ ) มีความว่องไวในปฏิกิริยาการย่อยสลายเมทิลีนบลูสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโซล-เจลแบบเดิม ( $\text{TiO}_2\text{-S}$ ) แต่มีความว่องไวต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยการใช้อัลตราโซนิกช่วยในกระบวนการโซล-เจล ( $\text{TiO}_2\text{-US}$ ) ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2\text{-US/UV}$  มีปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกสูงที่สุด Oxygen vacancy ที่เกิดขึ้นในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งส่งผลให้ความว่องไวในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง

**คำสำคัญ:** โฟโตคะตะไลติก, ไทเทเนียมไดออกไซด์, อัลตราโซนิก, อัลตราไวโอเลต, ที่ว่างออกซิเจน

**Abstract**

The  $\text{TiO}_2$  photocatalysts were synthesized by using ultrasonic and ultraviolet assisted sol-gel methods. The obtained  $\text{TiO}_2$  nanoparticles were characterized by X-ray diffraction (XRD), Nitrogen adsorption – desorption and Electron spin resonance spectroscopy (ESR). Methylene blue (MB) was used as the organic pollutant to observe the photocatalytic degradation ability of the  $\text{TiO}_2$  catalysts. The  $\text{TiO}_2$  prepared by ultrasonic coupled with ultraviolet assisted sol-gel method ( $\text{TiO}_2\text{-US/UV}$ ) showed higher activity in photodegradation of MB than  $\text{TiO}_2$  prepared by conventional sol-gel method ( $\text{TiO}_2\text{-S}$ ), but lower activity than  $\text{TiO}_2$  prepared by ultrasonic-assisted sol-gel methods ( $\text{TiO}_2\text{-US}$ ). This is because the  $\text{TiO}_2\text{-US/UV}$  possessed the highest amount of bulk oxygen vacancies. The formation of these oxygen vacancies in bulk  $\text{TiO}_2$  could act as recombination center of photogenerated electron and hole pairs, leading to decreased photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2$  for the degradation of methylene blue.

**Keywords:** Photocatalytic, Titanium dioxide, Ultrasonic, Ultraviolet, Oxygen vacancy

**1. บทนำ**

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เนื่องจากมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาสูง ไม่เป็นพิษ หาได้ง่ายและราคาถูก ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นกับพื้นที่ผิว องค์ประกอบของเฟส ความเป็นผลึก และลักษณะทางเคมีของพื้นผิว กระบวนการที่ใช้ในการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำมาพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ

พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการที่ถูกนำมาพัฒนา มากที่สุด คือ กระบวนการโซล-เจล เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมโครงสร้างและสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ง่าย โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการ หรือการใช้เทคนิคอื่น ๆ ร่วมในกระบวนการ เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟ รังสีอัลตราไวโอเลต และการใช้คลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น Gao และคณะ [1] ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต

ร่วมในกระบวนการโซล-เจล โดยพบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในกระบวนการโซล-เจล และช่วยส่งเสริมการเกิดเฟสออสเทอไรต์ การเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งปัจจัยต่างๆเหล่านี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ประเภทนาโนคอมโพสิต [2,3] โดยพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้โมเลกุลของโลหะแตกออก กลายเป็นอะตอมอิสระและกระจายตัวในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ [4] ซึ่งส่งผลดีต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์มลพิษในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้

นอกเหนือจากการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกร่วมในการสังเคราะห์ก็ได้รับความสนใจมากเช่นกัน โดยจากการศึกษาการใช้อัลตราโซนิกร่วมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจล ของ Neppolian และคณะ [5] พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจลแบบเดิม และเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลาย 4-Chlorophenol ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการโซล-เจล มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีโซล-เจลแบบเดิม ทั้งนี้ การใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้ของเหลวถูกบีบอัด และคลายตัวซ้ำไปซ้ำมาหลายรอบ ทำให้เกิดเป็นฟองอากาศ โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะปะทะกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราโซนิกทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและแตกออกในที่สุด การแตกของฟองอากาศทำให้เกิดบริเวณเล็กๆที่มี อุณหภูมิสูงถึง 5000°C และความดันสูงถึงประมาณ 500 บรรยากาศ [6] ซึ่งปรากฏการณ์นี้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานเพื่อใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างไปจากปฏิกิริยาในสภาวะปกติ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยหลายกลุ่มจึงพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดย การใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการเตรียมได้แก่ การใช้อัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อสังเคราะห์นาโนคอมโพสิต  $WO_3/TiO_2$  สำหรับใช้ในการย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B [7], การใช้อัลตราโซนิกร่วมในการสังเคราะห์นาโนคอมโพสิต  $TiO_2/In_2O_3$  เพื่อย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดยใช้แสงวิสิเบิล [8] และการใช้อัลตราโซนิกร่วมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือด้วยโลหะออกไซด์ เพื่อย่อยสลายสีย้อมชนิดต่างๆในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดยใช้แสงจากธรรมชาติ [9] เป็นต้น

การใช้อัลตราไวโอเล็ต และการใช้อัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการโซล-เจล หรือกระบวนการเตรียมด้วยวิธีอื่นๆ ต่างให้ผลตอบสนองที่ดีต่อคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม

ได้ ดังนั้น การใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตควบคู่กันระหว่างเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล จึงอาจส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตควบคู่กันระหว่างกระบวนการโซล-เจล เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพื่อย่อยสลายเมทิลีนบลู

## 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

### 2.1 สารเคมีและอุปกรณ์/เครื่องมือ

#### 2.1.1 สารเคมี

- (1) Titanium isopropoxide ( $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ , Sigma-Aldrich)
- (2) Absolute Ethanol ( $C_2H_6O$ , BDH Chemicals)
- (3) Methelene Blue ( $C_{16}H_{18}N_3SCl_2 \cdot 2H_2O$ , Sigma-Aldrich)

#### 2.1.2 อุปกรณ์/เครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 224S
- (2) เครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก ยี่ห้อ Schott-Geräte
- (3) เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ยี่ห้อ Cencom รุ่น 041209P
- (4) อ่างอัลตราโซนิก ยี่ห้อ Crest รุ่น 690DAE
- (5) หลอด UV ขนาด 500 วัตต์ จากบริษัท ริช อินเตอร์โปรดักส์ จำกัด
- (6) หลอด UV ขนาด 11 วัตต์ ยี่ห้อ Pure รุ่น G11T5
- (7) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV-Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1800

### 2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้อัลตราไวโอเล็ตควบคู่กับอัลตราโซนิกในระหว่างกระบวนการโซล-เจล

Titanium tetra-isopropoxide (TTIP) ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ และใช้เอทานอลบริสุทธิ์ (Anhydrous ethanol) เป็นตัวทำละลายในกระบวนการโซล-เจล โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อไทเทเนียม ( $H_2O:Ti$ ) ถูกกำหนดไว้เท่ากับ 4 ในกระบวนการสังเคราะห์ให้หยุดสารละลาย TTIP ลงในสารละลายที่เป็นของผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล โดยในขณะที่หยุดให้ใช้อัลตราโซนิกร่วมด้วย จากนั้นเปิดหลอดไฟชนิดไอปรอทความดันสูง (High-pressure mercury lamp) ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ขนาด 500 วัตต์ และปล่อยให้สารละลาย

อยู่ในสภาวะที่มีอัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 30-35°C โดยใช้ น้ำหล่อเย็น เมื่อครบเวลาแยกตะกอนสีขาวที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงและล้างด้วยเอทานอลจำนวน 5 ครั้ง ปล่อยตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำตะกอนที่แห้งแล้วไปเผาภายใต้บรรยากาศของอากาศ ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 K/min ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ใช้สัญลักษณ์เป็น TiO<sub>2</sub>-US/UV

ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้การกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ใช้สัญลักษณ์เป็น TiO<sub>2</sub>-S และการใช้อัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียว ใช้สัญลักษณ์เป็น TiO<sub>2</sub>-US ถูกเตรียมขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-US/UV

### 2.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.1 โครงสร้างผลึกและขนาดของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยใช้เครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Discover และ radiation เป็น Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), step size = 0.02 องศาต่อวินาที โดยเก็บข้อมูลในช่วง 2 $\theta$  เท่ากับ 10° ถึง 80°

2.3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Nitrogen adsorption – desorption ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยเครื่อง Micromeritics รุ่น 3Flex ก่อนวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งโดยไล่ความชื้นและแก๊สต่างๆ ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างคำนวณโดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

2.3.3 ปริมาณที่ว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Electron Spin Resonance (ESR) ด้วยเครื่อง ESR spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น EMXmicro ที่อุณหภูมิห้อง ในย่านความถี่ X-Band โดยใช้ความถี่คลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 9.82 GHz กำลัง 0.6 mW

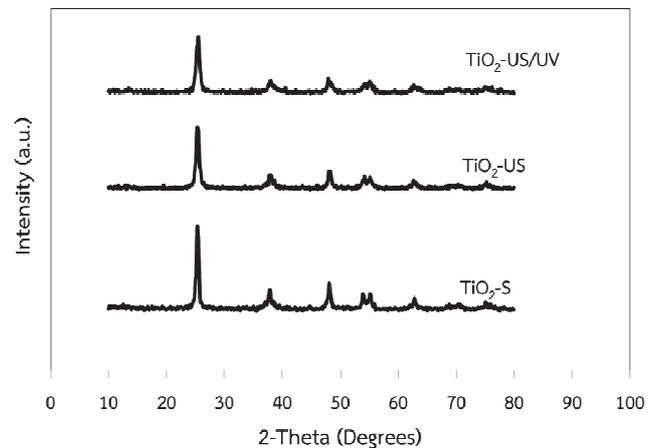
### 2.4 การทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว ซึ่งจะถูกนำมาทดสอบความว่องไวในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 100 มิลลิกรัม เติลงในสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm จำนวน 100 มิลลิลิตร กวนผสมโดยใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในที่มืด เพื่อให้การดูดซับและคายซับเมทิลีนบลูโดยไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าสู่สภาวะสมดุล เมื่อครบเวลาเปิดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ขนาด 11 วัตต์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

เก็บตัวอย่างครั้งละ 2 มิลลิลิตร ทุก 15 นาที แล้วนำไปปั่นแยกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกและใส่กลับเข้าไปในปฏิกิริยาดังเดิม สารละลายส่วนใสจะถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ด้วย UV-Vis spectrophotometer โดยวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 664 nm และเก็บตัวอย่างจนครบเวลา 1 ชั่วโมง จึงหยุดปฏิกิริยา

### 3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ ถูกนำมาวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง XRD ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตร่วมในระหว่างกระบวนการโซล-เจล

จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-S, TiO<sub>2</sub>-US และ TiO<sub>2</sub>-US/UV ต่างแสดงโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส โดยปรากฏพีคของเฟสอนาเทสชัดเจนที่ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 25° 38° 48° 54° 55° 63° 71° และ 75° ขนาดผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งคำนวณจาก Scherrer's equation แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าการใช้อัลตราโซนิกแทนการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กจะให้น้ำหนักผลึกที่เล็กลงจาก 17.2 nm เป็น 14.6 nm และเมื่อใช้อัลตราไวโอเล็ตควบคู่กับอัลตราโซนิก ขนาดผลึกที่ได้จะเล็กลงจนมีขนาดเท่ากับ 12.7 nm เนื่องจากการใช้อัลตราโซนิกร่วมในระหว่างการเตรียมโดยวิธีโซล-เจล จะช่วยให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง การชนกันของอนุภาคจะทำให้อนุภาคแตกออก ผลึกจึงมีขนาดเล็กลง [10]

เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) ถูกใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาตรรูพรุนและขนาด

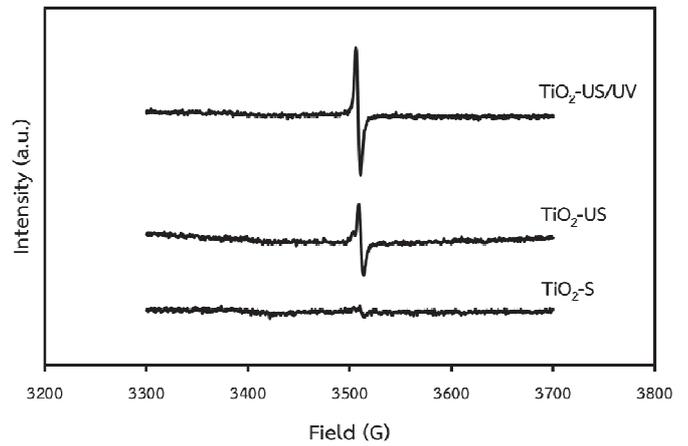
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆกัน

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค*	พื้นที่ผิวจำเพาะ	ปริมาตรรูพรุน	ขนาดรูพรุน
	(nm) (±1.2 nm)	(m <sup>2</sup> /g) (±2.1 m <sup>2</sup> /g)	(cm <sup>3</sup> /g) (±0.01 cm <sup>3</sup> /g)	(Å) (±3.5 Å)
TiO <sub>2</sub> -S	17.2	50.3	0.09	75.2
TiO <sub>2</sub> -US	14.6	46.9	0.06	55.4
TiO <sub>2</sub> -US/UV	12.7	53.2	0.06	47.1

\*คำนวณจาก Scherrer's equation

รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-US และ TiO<sub>2</sub>-US/UV มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-S ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้ง อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตมีผลต่อกลไกการเกิดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในปฏิกิริยาโซล-เจล อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตจะส่งผลให้ขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ TiO<sub>2</sub>-S แต่กลับพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 50 m<sup>2</sup>/g ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ไม่ได้ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองของ Neppolian และคณะ [5] ได้รายงานว่าการใช้อัลตราโซนิกส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ Power density ของอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้นกลับพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะลดลงอย่างมากเช่นกัน และในทำนองเดียวกัน Gao และคณะ [1] ซึ่งใช้อัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการโซล-เจลเป็นเวลา 15 ชั่วโมง รายงานว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่ใช้อัลตราโซนิก (เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 8) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตในการทดลองนี้ ให้ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยด้าน Power density และระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่แตกต่างกันมากนั่นเอง

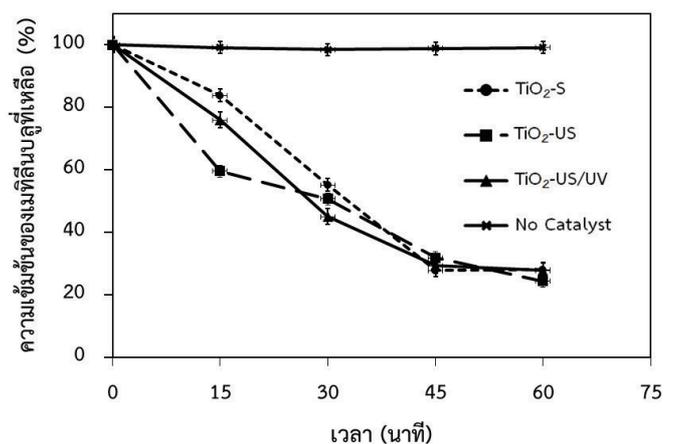
การใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์แบบโซล-เจล นั้น นอกจากจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างไปจากการเตรียมโดยวิธีดั้งเดิมแล้ว ยังส่งผลต่อสมบัติทางเคมีด้วย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Electron Spin Resonance ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-US และ TiO<sub>2</sub>-US/UV



รูปที่ 2 สัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วย Electron spin resonance (ESR)

ปรากฏชัดเจนที่ความแรงสนามแม่เหล็กประมาณ 3512 G และ ค่า g value เท่ากับ 2.001 ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจน หรือ Oxygen vacancy ที่เกิดขึ้นในผลึก [11] ความเข้มของสัญญาณแสดงถึงปริมาณการเกิด Oxygen vacancy ในผลึก จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการโซล-เจล ส่งผลให้จำนวน Oxygen vacancy ในผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมโดยใช้การกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ซึ่งปรากฏสัญญาณของ Oxygen vacancy ในผลึกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-S, TiO<sub>2</sub>-US และ TiO<sub>2</sub>-US/UV มาทดสอบความว่องไวในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าตัวเร่ง

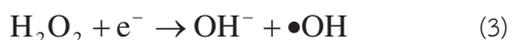
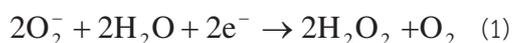


รูปที่ 3 การย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเลตร่วมในกระบวนการโซล-เจล

ปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  และ  $TiO_2-US/UV$  มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-S$  โดยตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  และ  $TiO_2-US/UV$  มีอัตราเริ่มต้นของการย่อยสลายเมทิลีนบลู (15 นาทีแรก) เท่ากับ 0.2 และ 0.12 ppm/min. ตามลำดับ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-S$  มีอัตราเริ่มต้นของการย่อยสลายเมทิลีนบลูเพียง 0.09 ppm/min. เท่านั้น นอกจากนี้ เมื่อทดสอบการย่อยสลายเมทิลีนบลูในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยายังพบว่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก นั้นแสดงให้เห็นว่า เมทิลีนบลูไม่สามารถย่อยสลายได้เลยภายในเวลา 1 ชั่วโมง หากปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามเป็นผลมาจากการปรับปรุงวิธีการเตรียมด้วยการใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตร่วมในกระบวนการโซล-เจล และแม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะไม่ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  และ  $TiO_2-US/UV$  เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีอย่างเด่นชัด ซึ่งยืนยันได้จากผลวิเคราะห์ ESR ที่พบจำนวน Oxygen vacancy ในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมากเมื่อใช้อัลตราโซนิกแทนการกวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก และเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อใช้อัลตราโซนิกควบคู่กับอัลตราไวโอเล็ตในระหว่างการเตรียม

ในกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกนั้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) เพื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ ในขณะที่แถบวาเลนซ์จะเกิดเป็นโฮลที่มีประจุบวก และสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ อิเล็กตรอนและโฮลที่แยกจากกันด้วยแสงสามารถกลับมารวมตัวกันได้อีกครั้งและส่งผลให้การอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง การกระตุ้นด้วยอัลตราไวโอเล็ตและอัลตราโซนิกในระหว่างกระบวนการโซล-เจลนั้นสามารถทำให้เกิด Oxygen vacancy ได้ทั้งที่ผิวผลึกและในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [12-14] Oxygen vacancy แต่ละแบบจะส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกแตกต่างกัน โดย Oxygen vacancy ที่ผิวผลึกจะทำหน้าที่จับอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น จึงช่วยยับยั้งการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ [15,16] นอกจากนี้ Oxygen vacancy ที่ผิวผลึกยังสามารถรวมตัวกับออกซิเจนเป็น Superoxide radicals ( $O_2^-$ ) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความว่องไว และสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นหมู่ที่ว่องไวอีกหลายชนิด [17] ดังนี้



หมู่ว่องไวที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างต้นประกอบด้วย Superoxide radicals ( $O_2^-$ ), Hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) และ Hydroxyl radicals ( $\bullet OH$ ) ซึ่งไอออนของอนุมูลอิสระและเปอร์ออกไซด์เหล่านี้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ ดังนั้น การมี Oxygen vacancy ที่ผิวผลึกจึงช่วยให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ดียิ่งขึ้น [18]

ส่วนการเกิด Oxygen vacancy ในผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา หากเกิดขึ้นในปริมาณมาก จะให้ผลในเชิงลบต่อการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดย Kong และคณะ [19] ซึ่งศึกษาอัตราส่วนความเข้มข้นของความบกพร่องในผลึก (Bulk defect) ต่อความบกพร่องที่ผิวผลึก (Surface defect) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ รายงานว่าเมื่ออัตราส่วนของ Bulk defect: Surface defect ลดลง ประสิทธิภาพการแยกระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลจะเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นด้วย ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกมากขึ้น จึงมีความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง [18,20]

การใช้อัลตราโซนิกในระหว่างการเตรียมโดยวิธีโซล-เจลนั้น พลังงานจากคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) และทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง พื้นผิวของอนุภาคจะถูกทำลายและเป็นผลให้เกิด Oxygen vacancy ที่ผิวผลึก [14,21] แต่อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ ESR ในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  ซึ่งเตรียมจากการใช้อัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้เกิด Oxygen vacancy ขึ้นในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้เช่นกัน ในทำนองเดียวกัน พลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในระหว่างกระบวนการโซล-เจล จะทำให้เกิด Oxygen vacancy ในอนุภาคคอลลอยด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และส่งผลให้มีความบกพร่องแบบจุด (Point defects) เกิดขึ้นในผลึก หรือเกิดเป็น Oxygen vacancy ในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์นั่นเอง [22]

ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นในสภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยอัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ต จึงมีแนวโน้มที่จะเกิด Oxygen vacancy ได้ทั้งที่ผิวและในผลึกมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมในสภาวะที่ไม่มีกระตุ้น ด้วยเหตุนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  จึงมีความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-S$  แม้ว่าผลการวิเคราะห์ ESR จะแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  มีปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-S$  ก็ตาม แต่ปริมาณ Oxygen vacancy ที่เกิดขึ้นในผลึกเหล่านี้ไม่มากพอที่จะส่งผลให้ความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง ดังนั้น ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US$  จึงยังคงสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-S$

เมื่อเพิ่มการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการใช้อัลตราโซนิกเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2-US/UV$  พบว่า

ปริมาณของ Oxygen vacancy ในผลึกเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-US จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยอัลตราไวโอเล็ตในระหว่างการสังเคราะห์ และปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>-US

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การใช้อัลตราโซนิกและอัลตราไวโอเล็ตร่วมในกระบวนการโซล-เจล จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีคุณลักษณะเฉพาะทางกายภาพและทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป ปริมาณ Oxygen vacancy ที่เกิดขึ้นในผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวในการย่อยสลายเมทิลีนบลูในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกแตกต่างกัน สภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวกำหนดปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึก การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้อัลตราโซนิกเพียงอย่างเดียว พบว่ามีปริมาณ Oxygen vacancy ในผลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเตรียมโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวนผสม แต่ปริมาณดังกล่าวไม่มากพอที่จะส่งผลให้ความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยใช้อัลตราโซนิกแสดงประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่เหนือกว่าการเตรียมโดยใช้แท่งแม่เหล็กในการกวน ในขณะที่การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ อัลตราโซนิกควบคู่กับอัลตราไวโอเล็ตในระหว่างการสังเคราะห์ ทำให้เกิด Oxygen vacancy ในผลึกปริมาณมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งปริมาณดังกล่าวมากพอที่จะทำให้อัตราการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลสูงขึ้น จนกระทั่งส่งผลให้ความว่องไวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Gao, Y. Ma, Y. Cao, J. Zhao and J. Yao, Effect of ultraviolet irradiation on crystallization behavior and surface microstructure of titania in the sol-gel process, *J. Solid State Chem.* 179 (2006): 41-48.
- [2] S. B. Atlaa, C.-C. Chenb, C.-Y. Chena, P.-Y. Lina, W. Panc, K.-C. Chenga, Y. M. Huangd, Y.-F. Changa and J.-S. Jeane, Visible light response of Ag<sup>+</sup>/TiO<sub>2</sub>-Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prepared

- by photodeposition under foam fractionation, *J. Photoch. Photobio. A* 236 (2012): 1– 8.
- [3] H. Eskandarloo, A. Badieli, M. A. Behnajady and G. M. Ziarani, UV-LEDs assisted preparation of silver deposited TiO<sub>2</sub> catalyst bed inside microchannels as a high efficiency microphotoreactor for cleaning polluted water, *Chem. Eng. J.* 270 (2015): 158–167.
- [4] R. Camposecoa, S. Castilloa, I. M.-Centenoa, J. Navarrete and J. Marina, Characterization of physicochemical properties of Pd/TiO<sub>2</sub> nanostructured catalysts prepared by the photodeposition method, *Mater. Charact.* 95 (2014): 201–210.
- [5] B. Neppolian, Q. Wang, H. Jung and H. Choi, Ultrasonic-assisted sol-gel method of preparation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles: characterization, properties and 4-chlorophenol removal application, *Ultrason. Sonochem.* 15 (2008): 649-658.
- [6] S. Koda, K. Tanaka, H. Sakamoto, T. Matsuoka and H. Nomura, Sonochemical efficiency during single-bubble cavitation in water, *J. Phys. Chem. A* 108 (2004): 11609-11612.
- [7] X. Luo, F. Liu, X. Li, H. Gao and G. Liu, WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposites: Salt-ultrasonic assisted Hydrothermal synthesis and enhanced photocatalytic activity, *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 16 (2013): 1613–1618.
- [8] C. Li, T. Ming, J. Wang, J. Wang, J. C. Yu and S.-h. Yu, Ultrasonic aerosol spray-assisted preparation of TiO<sub>2</sub>/In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for visible-light-driven photocatalysis, *J. Catal.* 310 (2014): 84–90.
- [9] P. Magesan, P. Ganesan and M.J. Umamathy, Ultrasonic-assisted synthesis of doped TiO<sub>2</sub> nanocomposites: Characterization and evaluation of photocatalytic and antimicrobial activity, *Optik* 127 (2016): 5171–5180.
- [10] K.S. Suslick and G.J. Price, Applications of ultrasound to materials chemistry, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 29 (1999): 295-326.
- [11] I. Nakamura, N. Negishi, S. Kutsuna, T. Ihara, S. Sugihara and K. Takeuchi, Role of oxygen vacancy in the plasma-treated TiO<sub>2</sub> photocatalyst with visible light activity for NO removal, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 161 (2000): 205-212.
- [12] H.M. Liu, W.S. Yang, Y. Ma, Y.A. Cao and J.N. Yao, Promoted phase transition of titania nanoparticles prepared by a photo-assisted sol-gel method, *New J. Chem.* 26 (2002): 975-977.
- [13] H.M. Liu, W.S. Yang, Y. Ma, Y.A. Cao, J.N. Yao, J. Zhang and T.D. Hu, Synthesis and characterization of titania prepared by using a photoassisted sol-gel method, *Langmuir* 19 (2003): 3001-3005.
- [14] Y. Huo, J. Zhu, J. Li, G. Li and H. Li, An active La/TiO<sub>2</sub> photocatalyst prepared by ultrasonication-assisted sol-gel method followed by treatment under supercritical conditions, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 278 (2007): 237-243.

- [15] R. Schaub, P. Thstrup, N. Lopez, E. Laegsgaard, I. Stengsgaard, J. K. Nørskov and F. Besenbacher, Oxygen vacancies as active sites for water dissociation on rutile TiO<sub>2</sub>(110), Phys. Rev. Lett. 87 (2001): 266104/1-266104/4.
- [16] G. Yanga, T. Wanga, B. Yanga, Z. Yanc, S. Dingb and T. Xiaod, Enhanced visible-light activity of F-N co-doped TiO<sub>2</sub> nanocrystals via nonmetal impurity, Ti<sup>3+</sup> ions and oxygen vacancies, Appl. Surf. Sci. 287 (2013): 135-142.
- [17] F. Liu, L. Lu, P. Xiao, H. He, L. Qiao and Y. Zhang, Effect of oxygen vacancies on photocatalytic efficiency of TiO<sub>2</sub> nanotubes aggregation, Bull. Korean Chem. Soc. 33 (2012): 2255–2259.
- [18] C. Wang, D. Wu, P. Wang, Y. Ao, J. Hou and J. Qian, Effect of oxygen vacancy on enhanced photocatalytic activity of reduced ZnO nanorod arrays, Appl. Surf. Sci. 325 (2015): 112-116.
- [19] M. Kong, Y. Li, X. Chen, T. Tian, P. Fang, F. Zheng and X. Zhao, Tuning the relative concentration ratio of bulk defects to surface defects in TiO<sub>2</sub> nanocrystals leads to high photocatalytic efficiency, J. Am. Chem. Soc. 133 (2011): 16414-16417.
- [20] Y. Lv, W. Yao, X. Ma, C. Pan, R. Zong and Y. Zhu, The surface oxygen vacancy induced visible activity and enhanced UV activity of a ZnO<sub>1-x</sub> photocatalyst, Catal. Sci. Technol. 3 (2013): 3136-3146.
- [21] P. A. Osorio-Vargas, C. Pulgarin, A. Sienkiewicz, L. R. Pizzio, M. N. Blanco, R. A. Torres-Palma, C. Pétrier and J. A. Rengifo-Herrera, Low-frequency ultrasound induces oxygen vacancies formation and visible light absorption in TiO<sub>2</sub> P-25 nanoparticles, Ultrason. Sonochem. 19 (2012): 383–386.
- [22] H. Liu, W. Yang, Y. Ma, Y. Cao, J. Yao, J. Zhang and T. Hu, Synthesis and Characterization of Titania Prepared by Using a Photoassisted Sol-Gel Method, Langmuir 19 (2003): 3001-3005.

## 7. ประวัติผู้วิจัย



ดร.ณัฐญา คุ่มทรัพย์  
 อาจารย์ประจำสาขาปิโตรเคมีและ  
 การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน