

## การสลายด้วยแสงของเมทิลีนบลูด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และ ไทเทเนียมไดออกไซด์/ซิลิกอนไดออกไซด์

### Photodegradation of Methylene Blue with $\text{TiO}_2$ and $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

อุไรวรรณ วีระพันธ์ \* นภาพร ขวัญทองยิ้ม โคจิรัตน์ คงประสิทธิ์ และวาริช วีระพันธ์  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี  
อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100  
\*Email : uraiwan.c@psu.ac.th

#### บทคัดย่อ

เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้วิธีโซล-เจล ใช้ Tetraisopropylorthotitanate (TIPT) เป็นสารตั้งต้นเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตรวจสอบสมบัติของสารโดยใช้เทคนิค XRD, FT-IR และ SEM รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีเพียงเฟสอนาเทสเกิดขึ้นเพียงเฟสเดียว FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนแสดงแถบการสั่นแบบยืดของพันธะ Ti-O และ Si-O และ Ti-O-Si นั้นแสดงให้เห็นว่า Si เกิดพันธะกับ  $\text{TiO}_2$  ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์มีการสลายของเมทิลีนบลูสูงที่สุด ที่ 72.0 เปอร์เซ็นต์ มีค่าคงที่อัตราและครึ่งชีวิตเป็น 0.0154 นาที<sup>-1</sup> และ 45 นาทีตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ไทเทเนียมไดออกไซด์ เมทิลีนบลู ซิลิกอนไดออกไซด์ โฟโตแคตตาลิสต์

#### Abstract

The experiment studied photodegradation of Methylene Blue using  $\text{TiO}_2$  and  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ . Titanium dioxide was prepared by sol-gel method. Tetraisopropylorthotitanate (TIPT) was the precursor. They were calcined at 400 °C for 3 hours. The properties of compound were investigated by XRD, FT-IR and SEM. The XRD pattern of titanium dioxide which was calcined at 400 °C showed only anatase phase. FT-IR spectrum of this nanoparticles exhibited Ti-O stretching and Si-O stretching and Ti-O-Si stretching. The results showed bond between Si with  $\text{TiO}_2$ .  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  and the highest methylene blue degradation at 72.0%. The rate constant and half-life of  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  were 0.0137 min<sup>-1</sup> and 45 min, respectively.

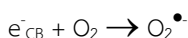
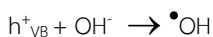
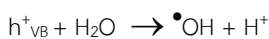
**Keywords :** Titanium dioxide; methylene blue; silicon dioxide; photocatalyst

#### บทนำ

สารอินทรีย์ที่เป็นพิษที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมออกสู่สิ่งแวดล้อม มีหลายชนิดด้วยกันเช่น ฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล ยูเรีย และลีสัยอมสังเคราะห์ สารดังกล่าวเป็นสารพิษส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้สนใจศึกษาการสลายสารพิษดังกล่าวโดยใช้วัสดุที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุนาโนที่ใช้กัน

อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนผสมในสีทาบ้าน ส่วนผสมในเครื่องสำอาง เป็นต้น โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความเป็นผลึก ขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร ราคาถูก ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียร จึงนิยมนำมาใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ มี 3 เฟส คือ อนาเทส รูไทน์ และ บรูไคล์ โดยมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 , 3.02 และ 2.96 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [1]

ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเฟส ขนาดผลึก พื้นที่ผิว และ รูพรุนในโครงสร้าง ได้มีงานวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่อง เกี่ยวกับการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2-4] ไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอนาเทสเป็นเฟสที่สามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการสลายสารอินทรีย์ได้ดี เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนและกลุ่มอิเล็กตรอนได้น้อยและในขณะเดียวกันไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอนาเทสยังมีแถบช่องว่างพลังงานที่สูงกว่าเฟสอื่นๆ [5] โดยเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสง อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดหลุมประจุบวกและอิเล็กตรอนขึ้นบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกซิล (OH<sup>-</sup>) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH<sup>•</sup>) และอิเล็กตรอนที่ขึ้นแถบการนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ขึ้นแถบการนำไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O<sub>2</sub><sup>•-</sup>) จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงเกิดที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนรูป โดยการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้ตั้งสมการ [6]



เนื่องจากข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อิเล็กตรอนสามารถกลับมารวมกับหลุมอิเล็กตรอนได้ดี จึงมีนักวิจัยได้พยายามลดข้อจำกัดดังกล่าว โดยการปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเติมโลหะ เช่น ซีลีเนียม เหล็ก และเงิน โดยโลหะที่เติมส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น ความเป็นผลึก ขนาดของอนุภาค และพื้นที่ผิว นอกจากนี้โลหะที่เติมไปเป็นตัวช่วยลดการเกิดการรวมตัวของหลุมประจุบวกและอิเล็กตรอน และยังทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนที่ดี ทำให้เพิ่ม

ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง [7-10] นอกจากนี้โลหะที่ได้กล่าวไปตอนต้น ยังมีการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์และนำมาประยุกต์ใช้ในการสลายสารอินทรีย์ โดยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสลายสารอินทรีย์ เช่น ฟีนอลได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ [11-12]

ดังนั้นในงานชิ้นนี้จึงสนใจเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ และนำไปศึกษาการสลายสีย้อมเมททิลีนบลูทั้งในแสงช่วงยูวีและที่มืดโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

#### 1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เมทานอล เอทานอล เตตระไอโซโพรพิล ออโทไททานาต (Tetraisopropylorthotitanate, TIPT) และ เตตระเอทิล ออโทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, TEOS) จากบริษัท Merck แอมโมเนีย (Ammonia, NH<sub>3</sub>) จากบริษัท LOBA Chemie เมททิลีน บลู (Methylene Blue, MB) จากบริษัท Omega

#### 2. การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์

ผสมสารละลายเตตระไอโซโพรพิลออโรไททานาต 20.0 มิลลิลิตร กับเมทานอล 2.6 มิลลิลิตร และเอทานอล 38.5 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราส่วน TIPT: เมทานอล :เอทานอล เป็น 1:1:10 โดยโมล กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เติมน้ำกลั่น 1.5 มิลลิลิตร นำสารแขวนลอยที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 8,000 รอบต่อ 10 นาที ทำการล้างตะกอนด้วยน้ำอุ่น เมทานอลและเอทานอลตามลำดับ จากนั้นนำของแข็งสีขาวที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสีขาว

### 3. การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์

นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ 1.0 กรัม ผสมกับเอทานอล 10.0 มิลลิลิตร และแอมโมเนีย 1.5 มิลลิลิตร เติมนเตรอะเทิลออร์โทซิลิเกต 1.5 มิลลิลิตร กวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5000 รอบต่อ 10 นาที ล้างตะกอนด้วยเอทานอล นำตะกอนสีขาวอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

### 4. การตรวจสอบคุณลักษณะ

4.1 เครื่อง X-ray powder diffraction (XRD) (รุ่น X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands)

เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและคำนวณหาขนาดผลึกของเฟสออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการ Scherer

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

เมื่อ  $t$  คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\text{CuK}\alpha = 0.15406$  นาโนเมตร)

$\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของกราฟระฆัง (เรเดียน)

$\theta$  คือ มุมสะท้อน (องศา)

คำนวณหาสัดส่วนน้ำหนักของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ [13] โดยเทคนิค XRD โดยใช้สมการ

$$W_A = \frac{1}{1 + 1.265 \frac{I_R}{I_A}}$$

เมื่อ  $W_A$  คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟสออกไซด์

$I_A, I_R$  คือ ความเข้มของพีคออกไซด์ (101) และรูไทล์ (110)

4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy (SEM) (รุ่น Quanta-001, WI-RES-SEM-001)

เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของผงไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์

4.3 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) (รุ่น Vertex 70, Bruker, Germany)

เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญโดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  โดยใช้ เทคนิคการอัดเม็ด (Pellet KBr)

### 5. การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกของการสลายสีย้อมเมทิลีน-นบลูภายใต้แสงยูวี จากหลอดยูวี ขนาด 15 วัตต์ จำนวน 2 หลอดโดยใช้สารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 5 พีพีเอ็ม ปริมาตร 80 มิลลิลิตร ใช้ตัวเร่ง 0.15 กรัม และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูทุกๆ 30 นาที คำนวณเปอร์เซ็นต์ในการสลายเมทิลีนบลูโดยใช้สมการ

$$\%D = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\%$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ

โดยไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ที่สลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีให้สัญลักษณ์เป็น  $\text{TiO}_2$ -ยูวี และ  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -ยูวี ตามลำดับ ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ที่สลายเมทิลีน-นบลูในที่มีดให้สัญลักษณ์เป็น  $\text{TiO}_2$ -มีด และ  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ -มีด ตามลำดับ

### ผลการวิจัย

#### 1. ผลการศึกษาลักษณะ

ศึกษาความเป็นผลึกและเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค XRD ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $25.23^\circ$  (JCPDS;01-073-1764) และ  $25.18^\circ$  (JCPDS;01-075-2546) ตามลำดับ (Figure1) ซึ่งเป็นเฟสออกไซด์เพียงเฟสเดียว การเปลี่ยนแปลงเฟสจาก

อนาเทสไปเป็นเฟสรูไทน์ขึ้นกับอุณหภูมิในการเผา ถ้าอุณหภูมิในการเผาเป็น 400 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟสอนาเทสไปเป็นรูไทน์ [14] ทั้งนี้สามารถคำนวณองค์ประกอบของเฟสและคำนวณ

ขนาดผลึกตามสมการของ Scherer พบว่าขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย (Table 1)

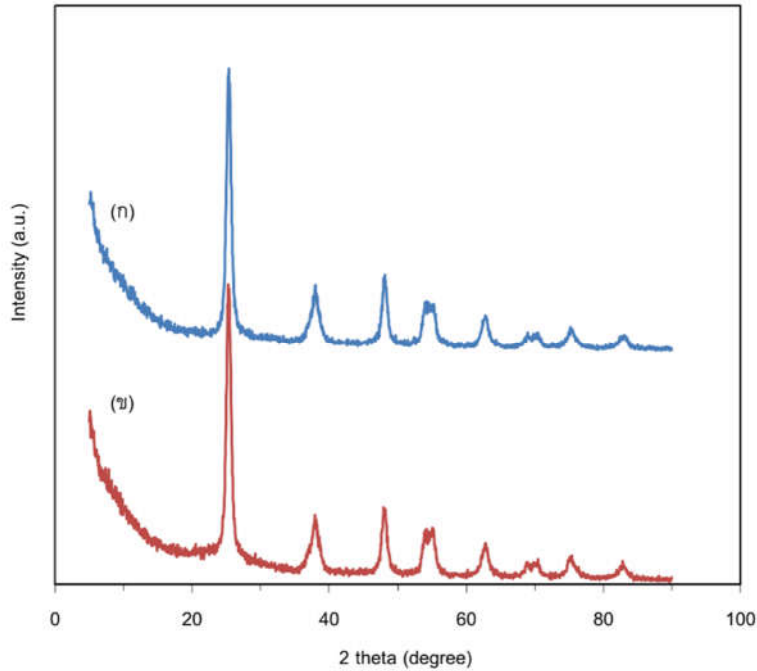


Figure 1 XRD-pattern ของ  $\text{TiO}_2$  (ก) และ  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  (ข)

Table 1 แสดงส่วนประกอบของเฟสและขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ส่วนประกอบของเฟส (เปอร์เซ็นต์)		ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	
	อนาเทส	รูไทน์	อนาเทส	รูไทน์
$\text{TiO}_2$	100	-	23.04	-
$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	100	-	32.29	-

สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันกับด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่น  $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$  ของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมได-ออกไซด์ที่เจือซิลิกอนไดออกไซด์ (Figure 2) ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $3400\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H และที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1630\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะการสั่นแบบงอของพันธะ O-H จากโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้ FT-IR สเปกตรัมของ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ยังแสดงพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $584\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการสั่นแบบยืดของพันธะ Ti-O stretching และใน FT-IR สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ พบพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $954\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบยืดของพันธะ Ti-O-Si [15]

นอกจากนี้มีการศึกษาพื้นผิวและขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย

ซิลิกอนไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสอนุภาคมีรูปร่างคล้ายวงกลมที่มีขนาดใกล้เคียงกันอยู่รวมกันเป็นกลุ่มซึ่งเมื่อมีการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ลงบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีผลต่อขนาดผลึกซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ โดยเทคนิค XRD นั่นคือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์จะมี

ขนาดผลึกใหญ่กว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย (Figure 3) เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนที่เติมลงไป ไปเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

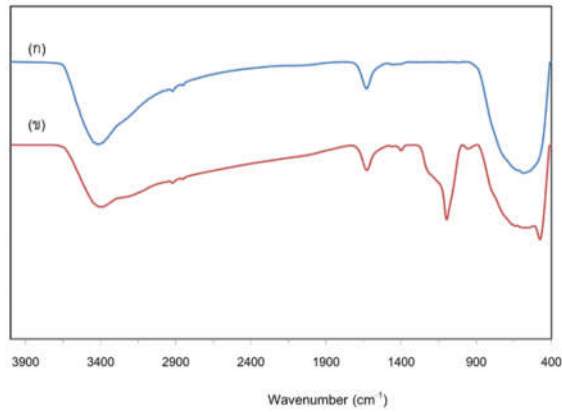


Figure 2 FT-IR spectrum ของ  $\text{TiO}_2$  (ก) และ  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  (ข)

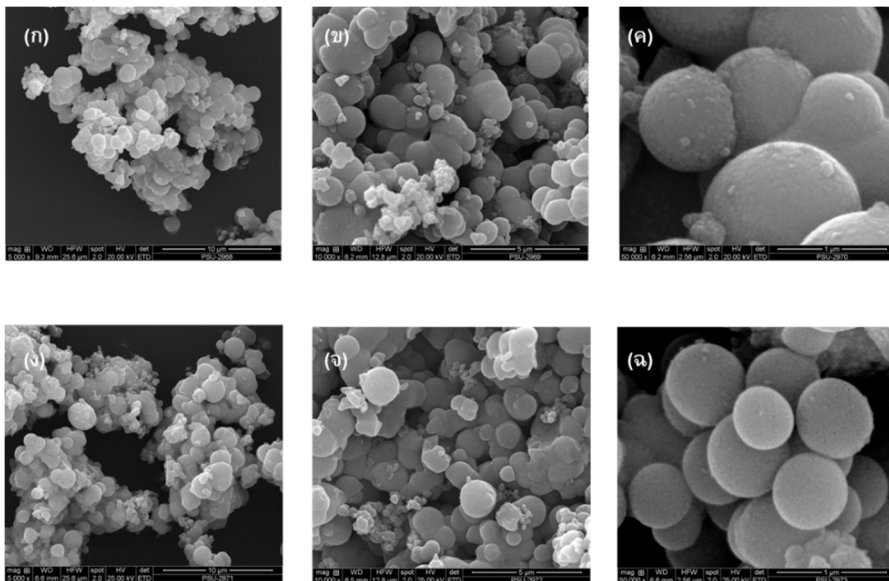
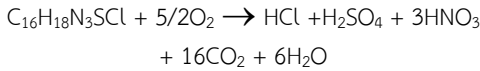


Figure 3 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก)-(ค) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (ง)-(ฉ) กำลังขยาย 5,000 10,000 และ 50,000

## 2. ผลการทดสอบทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก

ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ( $C_{16}H_{18}N_3SCl$ ) ภายใต้แสงยูวีและที่มีดของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาการสลายตัวของเมทิลีนบลู เป็นดังนี้ [16]



พบว่า การสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีมีประสิทธิภาพในการสลายมากกว่าในที่มีด ภายใต้แสงยูวีไทเทเนียมไดออกไซด์และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์มีร้อยละการสลาย 51.8 และ 72.0 ตามลำดับ และในที่มีด ไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์มีร้อยละการสลายเป็น 7.7 และ

19.6 ตามลำดับ (Figure 4 และ 5) ทั้งนี้แสงยูวีเป็นแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงานของแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดย plot กราฟระหว่าง  $\ln(C/C_0)$  กับเวลา พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order) ทั้งนี้เนื่องมาจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ใกล้เคียงหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order) แสดงดังสมการ

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt$$

- เมื่อ C คือ ความเข้มข้นเมทิลีนบลูเริ่มต้น  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นเมทิลีนบลู ณ เวลาต่างๆ  
 k คือ ค่าคงที่อัตรา  
 t คือ เวลา

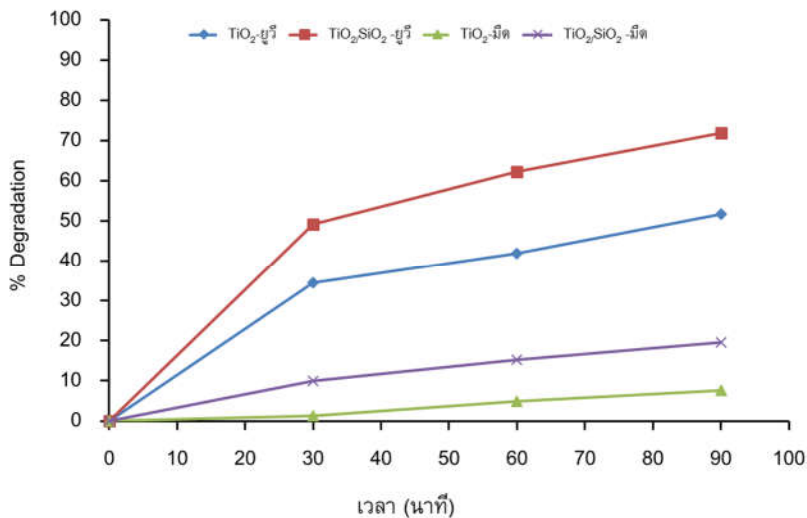


Figure 4 ร้อยละการสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและที่มีด

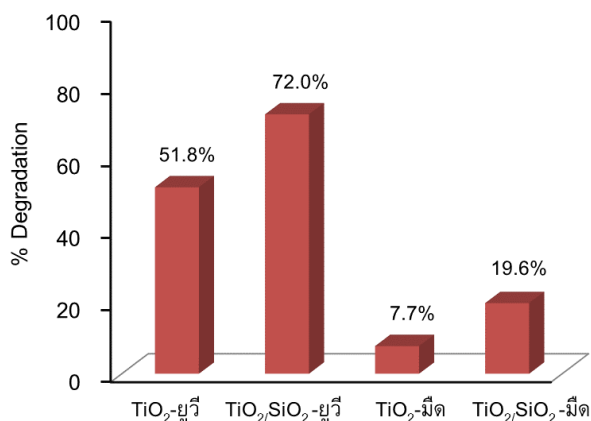


Figure 5 ร้อยละการสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีและที่มีด

โดย TiO<sub>2</sub>-ยูวี , TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-ยูวี, TiO<sub>2</sub>-มีด และ TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-มีด มีค่าคงที่อัตรา 0.0088, 0.0154, 0.0008 และ 0.0026 นาที่<sup>-1</sup> ตามลำดับ และ TiO<sub>2</sub>-ยูวี , TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-ยูวี, TiO<sub>2</sub>-มีด และ TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-มีด มีครึ่งชีวิต 78.8, 45.0, 866.3 และ 266.5 นาที ตามลำดับ (Table 2) โดยพบว่า TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-ยูวี มีครึ่งชีวิตที่น้อยที่สุดซึ่งมีประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลูมากที่สุด โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงซึ่งเกิดบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงช่วงยูวี ทำให้เกิดสปีชีส์ (OH•, O<sub>2</sub>•-) ที่สามารถไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการสลายเมทิลีนบลูประกอบไปด้วยพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แถบช่องว่างพลังงาน ขนาดอนุภาค ความเป็นผลึกของสารตัวเร่ง และอัตราการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน ดังนั้นการปรับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยธาตุต่างๆ จึงมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงให้ได้ดีขึ้นและส่งผลให้ไม่เกิดการรวมกันของอิเล็กตรอนกับหลุมอิเล็กตรอน

Table 2 Kinetics parameter ของการสลายเมทิลีนบลู

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าคงที่อัตรา (นาที่ <sup>-1</sup> )	ครึ่งชีวิต (นาที่)
TiO <sub>2</sub> -ยูวี	0.0088	78.8
TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -ยูวี	0.0154	45.0
TiO <sub>2</sub> -มีด	0.0008	866.3
TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -มีด	0.0026	266.5

### สรุป

ผลจากการศึกษาเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค XRD พบว่าจะมีเฉพาะเฟสอนาเทสเพียงเฟสเดียว และในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ พบการสั่นแบบยืดของพันธะ Ti-O-Si และพันธะ Si-O ซึ่งการสั่นแบบยืดของพันธะ Ti-O-Si เป็นการแสดงให้เห็นว่าซิลิกอนเกิดพันธะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลิกอนไดออกไซด์มีสลายเมทิลีนบลูในช่วงของแสงยูวีสูงที่สุด ที่ 72.0 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าคงที่อัตราและครึ่งชีวิตเป็น 0.0154 นาที่<sup>-1</sup> และ 45.0 นาที ตามลำดับ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต  
สุราษฎร์ธานี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Wunderlich, W. and et al. 2004. Electronic properties of nano-porous TiO<sub>2</sub>- and ZnO thin films- comparison of simulations and experiments. **Journal of Ceramic Processing & Research**. 5(4): 343-354.
- [2] Gómez-Solís, C. and et al. 2012. Photodegradation of indigo carmine and methylene blue dyes in aqueous solution by SiC-TiO<sub>2</sub> catalysts prepared by sol-gel. **Journal of hazardous materials**. 217: 194-199.
- [3] Bhosale, R.R. and et al. 2014. Solar photocatalytic degradation of methylene blue using doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. **Solar Energy**. 103: 473-479.
- [4] Ahangar, L.E. and et al. 2016. Photocatalytic application of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>- based magnetic nanocomposite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) for reusing of textile wastewater. **Nanochemistry Research**. 1(1):33-39
- [5] Luttrell, T. and et al. 2014. Why is anatase a better photocatalyst than rutile?- Model studies on epitaxial TiO<sub>2</sub> films. **Scientific reports**. 4.
- [6] Vasić, M.B and et al. 2016. Degradation of crystal violet over heterogeneous TiO<sub>2</sub>-based catalysts: The effect of process parameters. **Processing and Application of Ceramics**. 10(3):189-198.
- [7] Pawar, M.J. and Kaware, P.B., 2012. Ce<sup>3+</sup> doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles; synthesis and photocatalytic activity. **International Journal of Emerging Sciences**. 2(1): 149-159.
- [8] Lin, Y. and et al. 2013. Electronic and optical performances of Si and Fe-codoped TiO<sub>2</sub> nanoparticles: a photocatalyst for the degradation of methylene blue. **Applied Catalysis B: Environmental**. 142: 38-44.
- [9] Ramos, D.D. and et al. 2015. Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/Ag for use in photodegradation of methylviologen, with kinetic study by laser flash photolysis. **Environmental Science and Pollution Research**. 22(2): 774-783.
- [10] Chowdhury, I.H., Ghosh, S. and Naskar, M.K., 2016. Aqueous-based synthesis of mesoporous TiO<sub>2</sub> and Ag-TiO<sub>2</sub> nanopowders for efficient photodegradation of methylene blue. **Ceramics International**. 42(2): 2488-2496.
- [11] Fu, X. and et al. 1996. Enhanced photocatalytic performance of titania-based binary metal oxides: TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>. **Environmental Science & Technology**. 30(2): 647-653.
- [12] Anderson, C. and Bard, A.J., 1997. Improved photocatalytic activity and characterization of mixed TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials. **The Journal of Physical Chemistry B**, 101(14): 2611-2616.



- [13] Chauhan, R., Kumar, A. and Chaudhary, R.P., 2012. Structural and optical characterization of Zn doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles prepared by sol-gel method. **Journal of sol-gel science and technology**. 61(3): 585-591.
- [14] Adamczyk, A. and Rokita, M., 2016. The structural studies of Ag containing TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> gels and thin films deposited on steel. **Journal of Molecular Structure**.1114: 171-180.
- [15] Kim, Y. and et al. 2013. Sol-gel synthesis of sodium silicate and titanium oxchloride based TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogels and their photocatalytic property under. **Chemical Engineering Journal**. 231: 502-511.
- [16] Nogueira, R.F. and Jardim, W.F., 1993. Photodegradation of methylene blue: Using solar light and semiconductor (TiO<sub>2</sub>). **Journal of Chemical education**. 70(10): 861