



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องกำจัดสารอินทรีย์พิษในน้ำเสีย

Organic Waste Treatment Machine

ผศ.ดร. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้คณะ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เครื่องกำเนิดสารอินทรีย์พิษในน้ำเสีย.....  
 แหล่งเงิน ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้คณะ.....  
 ประจำปีงบประมาณ 2559..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 135,000 บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2559 ถึง กันยายน 2560.....  
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด  
 ผศ.ดร.กฤษณ์พันธ์ เกียรติกิตติพงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณคอปเปอร์(II)ไอออน ( $Cu^{2+}$ ) ที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ในการทดลองทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานตจากไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสบริสุทธิที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลพบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานตที่มีลักษณะสัณฐานคล้ายริบบิ้นและมีโครงสร้างแบบชั้น และนำมาปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่สัดส่วน คอปเปอร์(II)คลอไรด์ต่อโซเดียมไททานตเป็น 1, 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกพบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดูแลด้วยแสงไม่มีผลต่อปฏิกิริยาเนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับบนพื้นผิวดำ การเติมคอปเปอร์ในชั้นโครงสร้างของริบบอนนาโนไททานตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโฟตอนได้มากขึ้น โดยที่ คอปเปอร์ที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณสูงสุดในการเติมลงในชั้นโครงสร้างและมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกได้ดีถึง 90 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ไททานเนียม ไททานต ริบบอนนาโน กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

**Research Title:** Organic Waste Treatment Machine .....

**Researcher:** Asst.Prof.Dr. Kunlanun Kiatkitipong .....

**Faculty:** Engineering ..... **Department:** Chemical Engineering .....

## ABSTRACT

The aim of this project is to study the optimal copper contents intercalated in titanate nanoribbons for photocatalytic degradation of formaldehyde (CH<sub>2</sub>O) in water. Titanate nanoribbon was synthesized by hydrothermal reaction using TiO<sub>2</sub> anatase under alkaline condition at 200 oC. The layered titanate nanoribbons with a width of 118 nm and length of 1033 nm possessed a surface area of 18 m<sup>2</sup>/g. The obtained titanate nanoribbons was intercalated with Cu via ion exchange process by varying the concentration of Cu at 1% 5% and 6.5% by weight. The findings in this work indicate that the effect of surface area was not significant on the photocatalytic reaction, probably due to the limited adsorption of formaldehyde on the surface of catalyst. Intercalating Cu into titanate nanoribbon could decrease band gap energy and improve the absorption more photon. Cu<sup>2+</sup> at 6.5% by weight is an optimum content in doping in layered titanate, and could degrade formaldehyde up to 90%.

**Keywords :** Titania Titanate Nanoribbon Photocatalytic reaction

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่สัญญา 2559-01-01013 และ ขอขอบคุณ นางสาวนุชจรินทร์ จูสิงห์ และ นางสาวพิมพ์ชนก คล้ายทองคำ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลอง



คศ.ดร.กมลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic activity).....	3
2.2 สารประกอบไททานเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound).....	4
2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis).....	6
2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange).....	7
2.5 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde).....	8
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>12</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.3 การสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททานเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	12
3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	13
3.5 การปรับปรุงสมบัติของรีบบอนนาโนไททานเนต.....	14
3.6 การศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดฟอรัมาลดีไฮด์ในน้ำ.....	14

<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสารตั้งต้น.....	16
4.2 ผลการสังเคราะห์รีบอบนาโนไททานต.....	17
4.3 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยารีบอบนาโนไททานต.....	20
4.4 ผลการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	22
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	25
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	25
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง</b>	26
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	28
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	29



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์.....	6
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	22
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรี.....	23



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และ โฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง .....	3
2.2 กระบวนการ โฟโตแคตตาไลติก .....	4
2.3 โครงสร้างผลึกของไททานเนียม ไดออกไซด์ .....	5
2.4 ภาพจำลองโครงสร้างแบบชั้นของไททานเนต .....	7
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททานเนียม ไดออกไซด์แบบอะนาเทส .....	16
4.2 ลักษณะพื้นฐานและพื้นผิวของไททานเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น .....	17
4.3 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส .....	17
4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททานเนต .....	18
4.5 พื้นผิวและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททานเนต .....	18
4.6 โครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททานเนต .....	19
4.7 กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททานเนต .....	19
4.8 ลักษณะทางกายภาพของคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	20
4.9 ตัวอย่างพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททานเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	21
4.10 ตัวอย่างกราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานเนต ที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	21
4.11 อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างไททานเนียม ไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับริบบอนนาโนไททานเนต (R90) .....	23
4.12 อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของริบบอนนาโนไททานเนตเทียบกับ คอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานเนตที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ปริมาณต่างๆ .....	24

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันฟอर्मาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม และความเป็นพิษของฟอर्मาลดีไฮด์ ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำจึงจำเป็นต้องหาวิธีบำบัดฟอर्मาลดีไฮด์ที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการกำจัดพิษของฟอर्मาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่ได้รับความนิยม เนื่องจากช่วยขจัดความเป็นพิษของสารด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นใช้สารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้พลังงานแสงที่มากพอ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ซึ่งเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงกระตุ้นให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และโฮลภายในไททาเนียมไดออกไซด์ออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน มีความสามารถสูงในการทำลายโมเลกุลของฟอर्मาลดีไฮด์ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) คุณสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase - structure) ขนาดอนุภาค (Particle size) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และอื่นๆส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพจึงมีหลายงานวิจัยคิดค้นวิธีพัฒนาและปรับปรุง ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์ต่างๆ ทั้งวิธีโซลเจล วิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งวิธีสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (ชลดดา, 2555) เป็นวิธีการสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่ได้รับนิยมนับเป็นอย่างมากมีข้อดี คือ สามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้ อนุภาคของสารมีขนาดเล็กระดับไมโครถึงนาโน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารทางเคมีที่ดีโดยไม่ต้องมีการเผาหรืออบคั่วอีก ทำให้ประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆ ที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (Nanostructure) เป็น ท่อนาโน (Nanotube) ริบบอนนาโน (Nanoribbon) แท่งนาโน (Nanorod) และเส้นลวดนาโน (Nanowire) เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งพื้นที่ผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา หรือค่าช่องว่างของแถบพลังงาน เป็นข้อจำกัดต่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวได้ด้วยการนำมาทำปฏิกิริยากับเบสเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างที่น่าสนใจคือโครงสร้างแบบท่อริบบอน ที่มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนทับกันคล้ายไม้บรรทัด หรือริบบิน ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ในการเกิดโฮลเพื่อทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และ

อิเล็กตรอนที่สามารถรีดิวซ์ออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แเรดิคัลแอนไอออน เพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับสารเพื่อทำปฏิกิริยา และลดค่าช่องว่างของแถบพลังงานทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยพลังงานแสงไม่สูงมาก อีกทั้งยังมีโครงสร้างแบบชั้นที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) กับสารประกอบคอปเปอร์(II)ไอออน ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกให้สามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) (Kunlanun et al, 2011)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานตจากสารตั้งต้นไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส (100% Anatase) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และปรับปรุงสมบัติของริบบอนนาโนไททานตในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยคอปเปอร์(II)ไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสามารถควบคุมโครงสร้างนาโนริบบอนให้เหมาะสมต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของริบบอนนาโนไททานตที่ถูกปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)ไอออน ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน
- 1.2.3 เพื่อกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde:  $\text{CH}_2\text{O}$ ) ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic) ในสภาวะที่มีริบบอนนาโนไททานตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณคอปเปอร์(II)ไอออนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

### 1.3 ขอบเขตโครงการ

- 1.3.1 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานตจากสารตั้งต้นไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ และระยะเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
- 1.3.2 การปรับปรุงสมบัติของริบบอนนาโนไททานตด้วยคอปเปอร์(II) ไอออนในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่สัดส่วน 1%, 5% และ 6.5% โดยน้ำหนัก

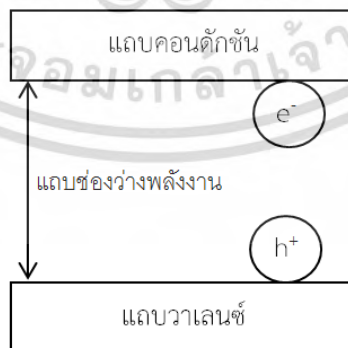
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันวิธีที่ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดสารพิษในแหล่งน้ำมีมากมาย ทั้งกระบวนการทางเคมีเช่น การใส่สารให้เกิดตะกอน กระบวนการทางชีววิทยาโดยการย่อยด้วยจุลินทรีย์ และกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ด้วยวิธีการดูดซับด้วยถ่าน เป็นต้น วิธีการข้างต้นช่วยลดสารพิษ แต่อาจก่อให้เกิดการตกค้างของสารพิษที่ยังคงสภาพของความเป็นพิษอยู่ หรือเกิดเป็นกากของเสียจากการดูดซับ เมื่อต้องการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ จำเป็นต้องคายซับ ส่งผลให้สารพิษดังกล่าวจึงยังคงอยู่ในระบบนิเวศไม่ได้ถูกกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถกำจัดสารพิษได้ ด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ วิธีดังกล่าวช่วยลดสารพิษในระบบนิเวศ และไม่ทิ้งกากของเสียอีกด้วย

#### 2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity)

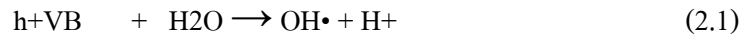
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงดูดซับโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งขึ้นกับของแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) เกิดสถานะการขาดอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน หรือ โฮล ( $e^-/h^+$  pair) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



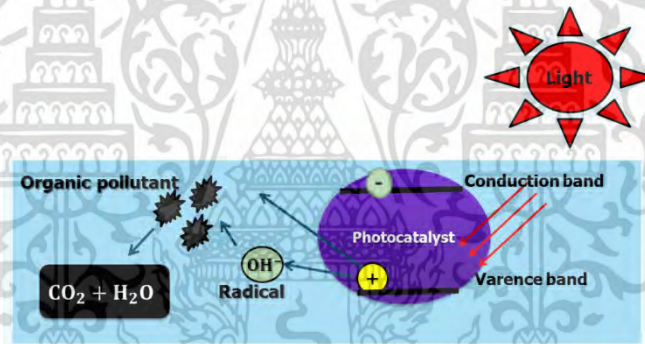
ภาพที่ 2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และ โฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง

(ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ ,2551)

ซึ่งเมื่อผิวหน้าของสารในสถานะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับ โมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน(O<sub>2</sub>) ที่มีอยู่ในอากาศจะทำให้เกิดแรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮลเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) ดังสมการที่ (2.1) ส่วนโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำพลังงาน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออน(O<sub>2</sub><sup>-</sup>) ดังสมการที่ (2.2)



ทั้งนี้ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสาร เรียกกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตรีดักชัน (Photoreduction) (ณัฐวดี และคณะ, 2551) จากสองกระบวนการที่กล่าวข้างต้นจึงเรียกรวมว่ากระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic reaction) ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 2.2 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ, 2551)

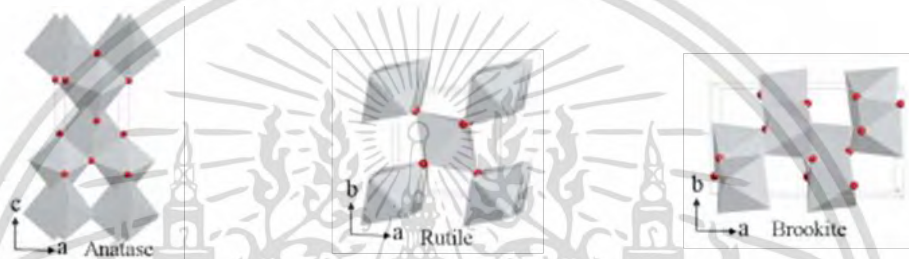
จากการศึกษาในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกข้างต้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในสถานะที่มีแสงซึ่งสารที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารในกลุ่มของสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) โดยส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบไททาเนียมออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาต่ำ

## 2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound)

### 2.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO<sub>2</sub>)

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง มีโครงสร้างผลึกมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ โครงสร้างแบบอะนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์ มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal)

ส่วนโครงสร้างแบบรูไทล์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกเป็นออร์โทโรมบิก (Orthorhombic) โครงสร้างผลึกทั้ง 3 รูป ของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอะตอมออกซิเจนของออกตะฮีดรอลที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยไอออนของ  $\text{Ti}^{4+}$  ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ  $\text{O}^{2-}$  แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตะฮีดรอลของแต่ละโครงสร้างจะต่างกัน โดยโครงสร้างแบบรูไทล์ การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดที่บริเวณมุมและขอบ โครงสร้างแบบอะนาทาสเกิดการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลเฉพาะที่บริเวณขอบ โดยที่แต่ละออกตะฮีดรอลถูกล้อมรอบด้วยออกตะฮีดรอลสี่ออกตะฮีดรอลและมีการใช้ขอบร่วมกัน ส่วนโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีระบบผลึกเป็นออร์โทโรมบิก การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุม (ฉวีวุฒิและคณะ, 2551) ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก)อะนาทาส (ข) รูไทล์และ(ค) รูไทล์ไทเทเนียม  
(อุษา, 2551)

### 2.2.2 การประยุกต์ใช้สารประกอบไททาเนียมออกไซด์

ไททาเนียมออกไซด์ได้รับความนิยมอย่างมากในการประยุกต์สำหรับงานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง เป็นต้น ทั้งนี้อาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพของไททาเนียมออกไซด์ ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไอออนิกภายใต้สภาวะเบส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโลหะไททานต นอกจากนี้ไททาเนียมออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาแบบไม่ใช้แสงได้ ด้วยการใช้ตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งนำมาใช้ในการกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NOX) การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์และการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction เป็นต้น

จากการศึกษากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่กล่าวข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวต้องคำนึงถึงสารที่ใช้นั้นคือเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีพื้นที่ผิวมากพอเพื่อดูดซับสารที่ต้องการทำปฏิกิริยา และมีพื้นที่ในการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล และซูเปอร์เรดิคัลแอนไอออนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ จากการรายงาน พบว่าริบบอนนาโนไททานตเป็นลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมจากที่กล่าวข้างต้น อีกทั้งยังมีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูงจึงเลือกสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานต

ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ไททานเนียมมีหลายกระบวนการ ที่นิยมคือกระบวนการ โซล-เจล เป็นกระบวนการทางเคมีแบบเปียก โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (โซล) และจับตัวกันจนเป็นวุ้นที่มีความหนืดสูง (เจล) จากนั้นจึงนำเจลไประเหย และเผา ซึ่งวิธีดังกล่าวมีหลายขั้นตอนจึงมีความยุ่งยากในการสังเคราะห์ อีกวิธีที่น่าสนใจคือวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงวิธีการเตรียมสารและความสามารถในการควบคุมลักษณะของผลึก จึงสนใจสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยรายละเอียดต่างๆแสดงดังหัวข้อ 2.3

### 2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis)

ในปัจจุบันเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลใช้ทำการสังเคราะห์วัสดุสมัยใหม่ (Advance materials) โดยเทคนิคดังกล่าวมีข้อดี คือ มีวิธีการเตรียมที่ง่าย สามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้ ผลึกที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคของสารมีขนาดเล็ก มีความละเอียดสูง โดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรืออบย่อยอีก ทำให้ประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่มีโครงสร้างที่ง่ายและซับซ้อนได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่าง ๆ และมีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (nanostructure) เช่น ท่อนาโน (nanotube) แท่งนาโน (nanorod) เส้นลวดนาโน (nanowire) หรือเส้นใยนาโน (nanofiber) ความแตกต่างของโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากสภาวะการทดลองที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

ชนิดโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะการสังเคราะห์	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
ริบบอนนาโนไททานด์	200	24
ท่อนาโนไททานด์	150	72
เส้นลวดนาโน	220	48

ที่มา: Kunlanun et al, 2011, Yongnan, 2007

การปรับปรุงสมบัติของไททาเนียมออกไซด์ ทั้งสมบัติทางด้านการดูดกลืนแสง การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งวิธีการปรับปรุงมีหลายวิธีได้แก่ วิธีการจุ่มเคลือบสารด้วยสารละลายโลหะทรานซิชัน (Impregnation) เป็นการทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น พบว่าหากจุ่มเคลือบสารบางชนิดให้กับไททาเนียมไดออกไซด์จะสามารถขยายช่วงการดูดกลืนแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ให้ครอบคลุมแสงย่านที่ตามองเห็นซึ่งเป็นย่านที่มีความเข้มสูงที่สุดของแสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังทำให้โครงสร้างของไททาเนียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนสูงขึ้น จึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี (ชลดา, 2555) อีกวิธีการปรับปรุงที่น่าสนใจคือวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารประกอบโลหะ โดยจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ได้เป็นไททานิต เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในพบว่า มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนทับกัน ภาพจำลองโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.4 ลักษณะดังกล่าวเหมาะสมต่อการปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อให้เกิดการแทรกตัวของไอออนโลหะไประหว่างชั้นของไททานิต ซึ่งดีกว่าการจุ่มเคลือบไอออนของโลหะไว้เพียงพื้นที่ผิว ที่ง่ายต่อการเสื่อมสภาพจากการที่ไอออนโลหะจะหลุดออกจากผิวไททานิตระหว่างทำปฏิกิริยา

ภาพที่ 2.4 ภาพจำลองโครงสร้างแบบชั้นของไททานิต

#### 2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับใช้ปรับปรุงไททานิตเนื่องจากเป็นวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นของไททานิต ช่วยยืดอายุการใช้งานของไททานิตหลังการปรับปรุง ไอออนของโลหะที่เข้าไปแทนที่ไอออนเดิมจะหลุดออกจากโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก โลหะที่นิยมใช้ปรับปรุงไททานิตด้วยวิธีการดังกล่าวอยู่ในหมวดหมู่ของโลหะทรานซิชัน เช่น ซิลเวอร์ (Ag), แพลททินัม (Pt), คอปเปอร์ (Cu) และวานาเดียม (V) เป็นต้น ซึ่งสารที่นำมาใช้แลกเปลี่ยนประจุในที่นี้คือคอปเปอร์(II)คลอไรด์ เนื่องจากไอออนของคอปเปอร์จะช่วยลดความกว้างของแถบพลังงาน ซึ่งวิธีการและสถานะในการทดลองที่อ้างอิงจาก (M Vithal et al, 2013) เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีสถานะการทดลองที่ไม่อันตราย และยังให้ผลจากการแลกเปลี่ยนไอออนที่น่าสนใจ จึงเลือกคอปเปอร์(II)คลอไรด์ทดลองแลกเปลี่ยนไอออนกับไททานิต ซึ่งการศึกษาพบว่าการเติมโลหะเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดความกว้างของแถบพลังงานส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีถึงจุดหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากการเติมโลหะมากเกินไป โมเลกุลของโลหะอาจไปบดบังพื้นที่ในการเกิดไฮดรอกซิลแรติคอลล อีกรั้งการลดความกว้างของแถบพลังงานมากเกินไปจะส่งผลให้การดึงอิเล็กตรอนออกไปทำปฏิกิริยานั้นทำได้ยากขึ้น จึงอาจเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับไฮดรอกซิล ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

## 2.5 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)

ฟอรัมาลดีไฮด์หรือที่รู้จักกันในชื่อ ฟอรัมาลีน สูตรทางเคมี คือ  $\text{CH}_2\text{O}$  เป็นสารกันเสียที่มีส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ และพบมากในที่อยู่อาศัย เนื่องจากเป็นสารที่อยู่ในกาวและสารเคลือบเฟอร์นิเจอร์ไม้ชนิดต่างๆ รวมไปถึงสีทาบ้านบางชนิด ฟอรัมาลดีไฮด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการแพทย์ ผลิตได้ในรูปของสารละลาย ฟอรัมาลดีไฮด์หรือฟอรัมาลีนที่ความเข้มข้นประมาณ 37-55% โดยน้ำหนัก ซึ่งนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยูเรีย-ฟอรัมาลดีไฮด์ ฟีนอลฟอรัมาลดีไฮด์ และเคมีภัณฑ์ อื่นๆ อีกทั้งนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็น สารฆ่าเชื้อ สารกันเสีย ยาฆ่าแมลง ตัวลอคออกซิเจนในปฏิกิริยา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

### 2.5.1 สมบัติของฟอรัมาลดีไฮด์

ฟอรัมาลดีไฮด์เป็นก๊าซไวไฟ ไม่มีสีมีกลิ่นฉุน มีฤทธิ์กัดกร่อน หนักกว่าอากาศเล็กน้อย ไม่เสถียร เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้ง่ายในส่วนของฟอรัมาลีนมีสมบัติแตกต่างกันตามความเข้มข้นของฟอรัมาลดีไฮด์ในน้ำรวมทั้งอัตราส่วนผสม ของเมทานอลในสารละลาย

### 2.5.2 ความเป็นพิษของฟอรัมาลดีไฮด์และการปนเปื้อนของฟอรัมาลดีไฮด์ในน้ำ

ฟอรัมาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบันแหล่งที่มาหลัก มาจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก-เรซิน อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำที่มาจาก โรงพยาบาล หรือหน่วยงานที่มีการใช้ฟอรัมาลีนอาจพบการปนเปื้อนของฟอรัมาลดีไฮด์ในน้ำที่ใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำยารักษาสภาพศพไม่ให้เน่าเปื่อย หรือใช้ทำความสะอาดเครื่องมือในทางการแพทย์ ถ้ามีการระบายสารเคมีชนิดนี้โดยตรงหลังจากผ่านการใช้งานแล้ว โดยปราศจากการกำจัดพิษอย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบบำบัดน้ำเสียและก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่มนุษย์ใช้สำหรับอุปโภคบริโภคก็จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์เช่นกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) กระบวนการกำจัดฟอรัมาลดีไฮด์ในน้ำมีหลากหลายวิธี เช่นกระบวนการกำจัดด้วยการดูดซับซึ่งยังคงสภาพความเป็นพิษของฟอรัมาลดีไฮด์อยู่ ฉะนั้นเพื่อเป็นการเปลี่ยนสารดังกล่าวที่มีพิษเป็นสารที่ไม่มีพิษจึงใช้วิธีการกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ทำได้โดยง่ายภายใต้สภาวะที่มีแสง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kunlanan Kiatkitipong et al. ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานเด และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานเด และท่อนาโนไททานเด พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของอนุภาคนาโนไททานเดเปลี่ยนเฟสเป็นอะนาเทสโดยสมบูรณ์ และพื้นที่ผิวของท่อนาโนไททานเดเมื่อเทียบกับริบบอนนาโนไททานเดมีการลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่แถบช่องว่าง

พลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองลดลงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทานอล (Methanol)

M. Vithal et al. ได้สังเคราะห์โซเดียมไททานต และปรับปรุงประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงให้สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) ระหว่าง คอปเปอร์(II)ไอออน และซิลเวอร์ไอออน พบว่าเมื่อแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารดังกล่าว ส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่แลกเปลี่ยนไอออนกับซิลเวอร์สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสีย้อม (Methylene blue) ในช่วงแสงที่ตามองเห็น ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)

พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย และคณะ ได้ศึกษาปัจจัยในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ด้วยการปรับปรุงไททานเนียมไดออกไซด์ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี Hydrolysis precipitation เพื่อใช้เร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์มีค่า 1 กรัมต่อลิตร และเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะช่วยทำให้สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะกรดเหมาะสมต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ชลดา ชีการุณวงศ์ รวบรวมข้อมูลการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์ และ โครงสร้างของวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ ทั้งวิธีโซลเจล ไฮโดรเทอร์มอล การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดแบบต่างๆ พร้อมทั้งการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ซึ่งการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยไอออนของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ณัฐดี เทียนพองใส และคณะ ศึกษาปัจจัยในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ และผลของค่าความเป็นกรด เบส ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดไปได้มากที่สุดมีค่าเป็นประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการให้แสงยูวีเท่ากับ 4 ชั่วโมง

Guangsheng Cao et al. ได้สังเคราะห์ท่อนาโนไททานตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต พบว่าเมื่อแลกเปลี่ยนไอออน ด้วยสารละลายดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมดีขึ้น และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณของคอปเปอร์ (II) ไอออนในตัวเร่งปฏิกิริยา

Hoang Tran et al. ศึกษาอิทธิพลจากการเจือวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนโลหะซิลเวอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ 4 ประเภท คือ กรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ แอ็กคาไรด์ และสารประกอบอะโรมาติก พบว่าพื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับกรดคาร์บอกซิลิกได้ดีทำให้พื้นผิวน้ำของสารอยู่ในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน ที่มีอยู่ในอากาศจึงทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง ซึ่งส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ ต่างจากความสามารถในการดูดซับของแอลกอฮอล์ที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีอย่างจำกัดที่อุณหภูมิห้อง ในส่วนแอ็กคาไรด์การกำจัดจะเกิดผ่านตัวกลางคือกรดคาร์บอกซิลิกจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอ็กคาไรด์ ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับของแอ็กคาไรด์ที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงมีอย่างจำกัด สุดท้ายสารประกอบอะโรมาติกข้อจำกัดในการกำจัดขึ้นกับการกลับมารวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ลดลง

Ping Weia,b et al. ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการหาปริมาณการเจือไอออนโลหะแพททินัม (Pt) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากเดิมวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีจุดด้อย คือ การรวมตัวกันระหว่างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทั้งนี้การทดลองภายใต้แสงยูวีโดยมีการวัดปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการแยกสารผสมระหว่างน้ำและเมทานอล เพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง (Photoelectrochemical water splitting)

Daijiro Tsukamoto et al. ศึกษาหาปริมาณการเจือไอออนโลหะทังสเตน (WO<sub>3</sub>) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเลือกเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อออกซิเดชันแอลกอฮอล์เป็นฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก การทดลองพบว่าวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) มีประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาที่ดี ส่งผลต่อการกำจัดแอลกอฮอล์ ซึ่งมีอิทธิพลจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแถบการนำของไททาเนียมไดออกไซด์เคลื่อนที่ไปที่พื้นผิวของ WO<sub>3</sub> ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้มาก ในขณะที่ประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์ลดลง ทั้งนี้เมื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือไอออนของโลหะทังสเตนในสัดส่วนที่มากขึ้นพบว่าความสามารถในการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์บนที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพดีที่สุดในที่ 7.6 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

จากการศึกษาข้อมูลดังที่กล่าวมาข้างต้นจากแหล่งที่มาต่างๆทั้งนี้เพื่อสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและใช้โครงสร้างเด่นของโลหะไททาเนตนั้นคือโครงสร้างแบบชั้นมาปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน ซึ่งจะทำให้ไอออนของคอปเปอร์เข้าไปแทนที่

โซเดียมในโมเลกุล ไม่ใช่เป็นเพียงการเกาะติดแค่ที่ผิวซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปไอออนของคอปเปอร์อาจเสื่อมสภาพ และหลุดออกจากพื้นผิวได้โดยง่าย ทั้งนี้เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในช่วงแสงที่ตามองเห็น เมื่อรวบรวมข้อมูลได้พอสมควรแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการทดลองต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>anatase 100%) บริษัท Carlo Erba
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd
- 3.1.3 คอปเปอร์(II)คลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Qrec
- 3.1.4 สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Qrec
- 3.1.5 อะเซททิลอะซีโตน เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich
- 3.1.6 น้ำปราศจากไอออน

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ตู้อบ
- 3.2.2 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
- 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3.2.4 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD)
- 3.2.5 เครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET)
- 3.2.6 เครื่องปฏิบัติการสังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล
- 3.2.7 เครื่องปั่นกวน
- 3.2.8 แท่งแม่เหล็ก
- 3.2.9 เครื่องเหวี่ยงสารให้ตกตะกอน (Centrifuge)
- 3.2.10 หลอดเมอร์คิวรี 500 วัตต์ (Mercury lamp) ความยาวคลื่น (380-800 นาโนเมตร)
- 3.2.11 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง

#### 3.3 การสังเคราะห์รีบอนนาโนไททานเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.3.1 ผสมผงไททานเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที

3.3.2 เมื่อครบตามเวลาเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาทีจึงเทสารที่ได้ลงเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล ดังรูป 3.1 แล้วนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการให้ความร้อนแก่สารที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายในตู้อบ

3.3.3 เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะเปิดเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในจะแยกชั้นระหว่างสารละลายและของแข็ง ให้เทสารละลายออกมาก่อน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.3.4 อบให้ตะกอนแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผงโซเดียมไททานेट ที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกต่อไป

### 3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

3.4.1 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงออกมาในรูปของภาพสามมิติ สร้างภาพได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหนังของตัวอย่าง

3.4.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (EDX) โดยศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูงพุ่งชนชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นเพื่อให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานวงในจนทำให้อิเล็กตรอนวงในหลุดออกจากอะตอม แล้วอิเล็กตรอนวงนอกจะคายพลังงานออกบางส่วนพร้อมทั้งเปลี่ยนชั้นพลังงานเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดไป พลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมาจะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์ซึ่งมีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ เมื่อวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ดังกล่าวจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าภายในตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยธาตุชนิดใด

3.4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ เป็นการวัดปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาค ก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส) ในขั้นแรกต้องไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาคออกให้หมด จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซ และวัดปริมาณการดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่หายไปเมื่อป้อนสู่อุณหภูมิ หรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค

3.4.4 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททานेट (XRD) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยการ

เดี่ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างในมุมต่างๆกัน จากนั้นจึงนำผลของการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง

3.4.5 การวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ทำหน้าที่ตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว โดยตรวจวัดความเข้มแสงของตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ทั้งนี้ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างจึงแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สารชนิดต่างๆ ได้ เช่น ใช้วิธีการทำกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารกับค่าความเข้มข้นของสาร ทั้งนี้จากกราฟความเข้มข้นมาตรฐานเมื่อนำความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าไปวัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐานหรือคำนวณจากสมการเชิงเส้นของกราฟความเข้มข้นมาตรฐานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าของสารนั้นได้

### 3.5 การปรับปรุงสมบัติของรีบบอนนาโนไททานเนตที่ใช้คอปเปอร์(II)ไอออนในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

3.5.1 นำโซเดียมไททานเนต 0.2 กรัมที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3 มาละลายในสารละลายคอปเปอร์(II)คลอไรด์ 100 มิลลิลิตรที่ความเข้มข้นของสารละลายแตกต่างกัน (33.6, 161.3 และ 215.1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างสมบูรณ์

3.5.2 นำสารละลายที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการนำตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยงสารตกตะกอน จนได้ค่าแสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.5.3 นำตะกอนมาอบให้แห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผงคอปเปอร์รีบบอนนาโนไททานเนต ที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกดังข้อ 3.4

### 3.6 การศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดฟอร์มมาลดีไฮด์ในน้ำ

3.6.1 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตรที่บรรจุน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 300 มิลลิลิตร

3.6.2 นำบีกเกอร์ที่เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไว้จากข้อ 3.6.1 ใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดเมอร์คิวรี ดังแสดงในรูป 3.2 ปั่นกวนสารละลายภายใต้แสงภายในกล่องดังกล่าวเป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในตัวเร่งปฏิกิริยา และเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงานจนเกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และโฮล

3.6.3 เมื่อครบเวลา 20 นาที ปิดสวิตช์แล้วเปิดกล่องทึบแสง เพื่อให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศจะถูกรีดิวซ์ด้วยออกซิเจนที่อยู่ในแถบคอนดักชัน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนที่พร้อมในการย่อยสลายฟอร์มมาลดีไฮด์ในน้ำ จากนั้นปั่นกวนสาร

ในบีกเกอร์ต่อเป็นเวลา 10 นาที พร้อมเปิดสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ปริมาณ 0.68 มิลลิลิตร ใสลงในบีกเกอร์ จากนั้นเริ่มเก็บสารตัวอย่างทุก 5 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง

3.6.4 เปิดสวิตซ์เพื่อให้แสงอีกครั้ง เปลี่ยนระยะเวลาเก็บสารตัวอย่างทุก 2 นาทีจำนวน 6 ตัวอย่าง และทุก 5 นาทีอีก 3 ตัวอย่าง

3.6.5 นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ลดลงด้วยวิธีการทำให้เกิดสี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

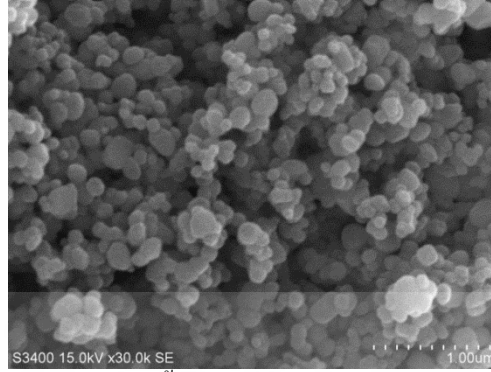
### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสารตั้งต้น (ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส)

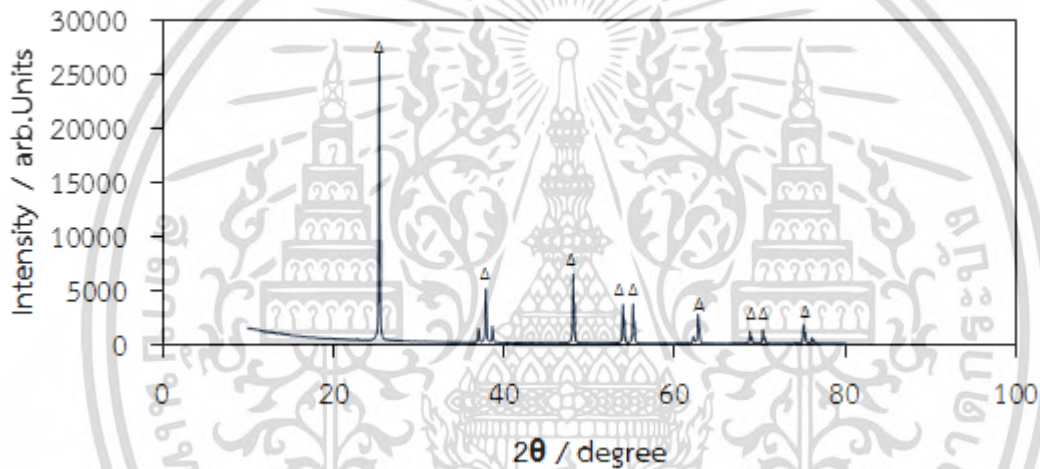
ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีน้ำหนักเบาจึงง่ายต่อการฟุ้งกระจาย ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะพื้นฐานหรือลักษณะพื้นผิวของด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะพื้นฐานที่ไม่สามารถระบุได้ (Random shape) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 197 นาโนเมตร พื้นที่ผิวที่ได้จากเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็น 10 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) พบว่าสารตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์เป็นแบบอะนาเทส ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส



ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานและพื้นผิวของไททานเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส (XRD pattern: No.21-1272)

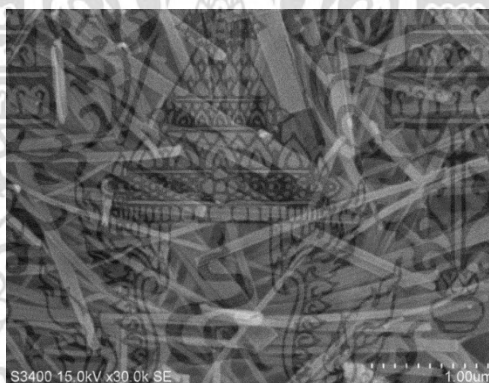
#### 4.2 ผลการสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททานเนต

ลักษณะทางกายภาพของสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (อ้างอิงวิธีการและสภาวะในการสังเคราะห์จาก Kiatkitipong, et al (2011)) คือ เป็นผงสีขาวไม่มีการเปลี่ยนแปลง และให้สัมผัสที่ละเอียดมากขึ้นเมื่อเทียบกับไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส แต่ยังคงมีน้ำหนักเบาและฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังภาพที่ 4.4



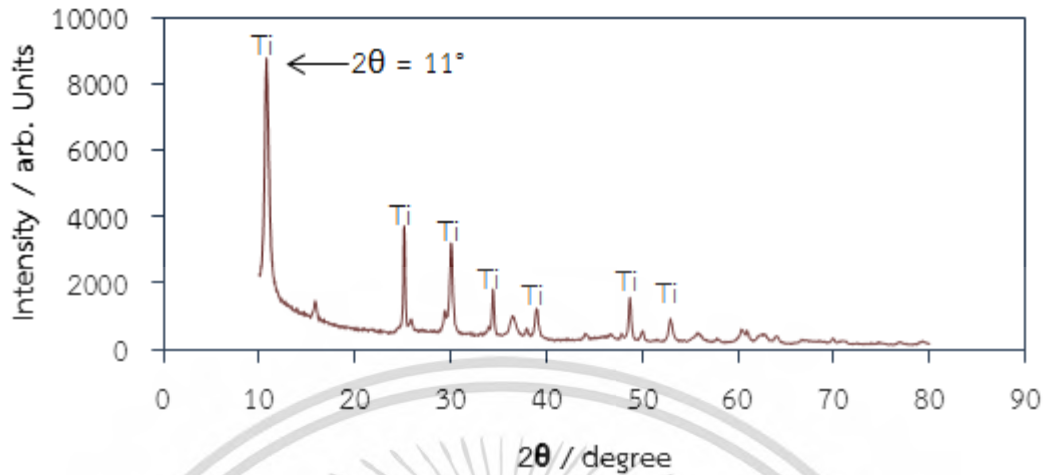
ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททานิต

เมื่อส่องตัวอย่างมาวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า สัณฐานที่ได้มีลักษณะคล้ายริบบิน หรือไม้บรรทัด จึงเรียกได้ว่าเป็นริบบอนนาโนไททานิต ความกว้าง และยาว โดยเฉลี่ยเป็น 118 นาโนเมตร และ 1033 นาโนเมตร ตามลำดับ จาก เครื่องวัดการดูดซับก๊าซพบว่าพื้นที่ผิวที่ได้ เพิ่มขึ้นเป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม ดังภาพที่ 4.5



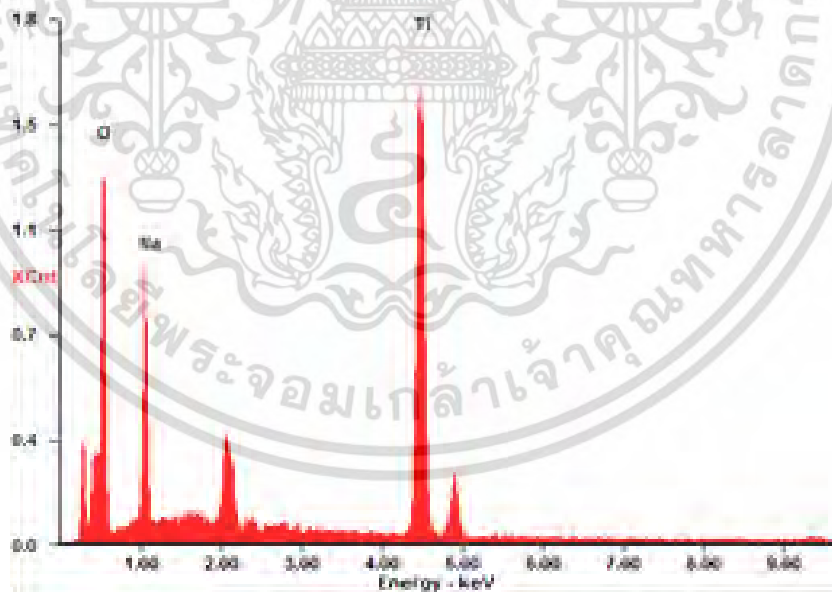
ภาพที่ 4.5 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททานิต

เมื่อพิจารณาการพิสูจน์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของนาโนริบบอน พบว่าเฟสที่ได้ เทียบได้กับกราฟอ้างอิงเลขที่ No.31-1329 ซึ่งตรงกับเฟสของไททานิต ( $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ )



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททานเนต (No.31-1329)

จากภาพที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างของริบบอนนาโนไททานเนตหลังผ่านการสังเคราะห์นั้น มีพิกที่สำคัญคือพิกที่  $2\theta$  เท่ากับ  $11^\circ$  ที่แสดงถึงโครงสร้างแบบชั้นของริบบอนนาโนไททานเนต สามารถคำนวณช่องว่างระหว่างชั้นเท่ากับ 0.8 นาโนเมตร เมื่อศึกษาปริมาณสัดส่วนของธาตุภายใน ด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิล็กตรอน (EDX) ยืนยันการมีอยู่ของ โซเดียม โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของ โซเดียมต่อไททานเนียมออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททานเนต

นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Kiatkitipong, et al (2013) ที่ทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานเนตที่มีลักษณะคล้ายกันด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าสมบัติเชิงแสงของริบบอนนาโนไททานเนตที่

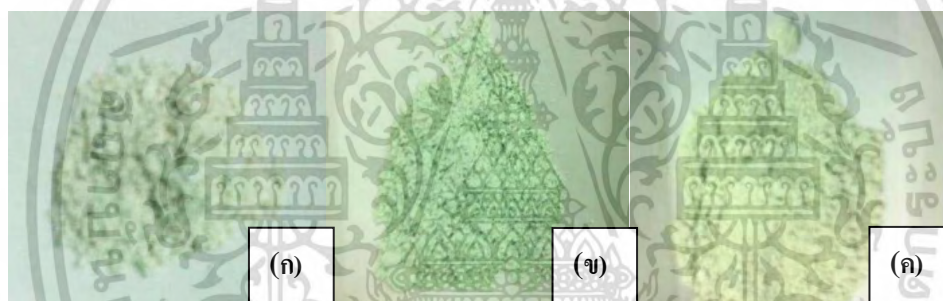
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ได้ สามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นประมาณ 335 นาโนเมตร หรือต้องให้พลังงานการกระตุ้น เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์

#### 4.3 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททานตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์

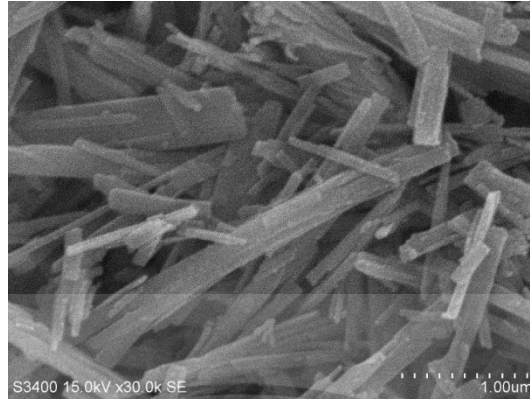
##### (II) ไอออน

ผลละเอียดของริบบอนนาโนไททานตที่ผ่านการสังเคราะห์ ถูกปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่สัดส่วนดังนี้คือที่ 1,5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วิธีการและสภาวะการแลกเปลี่ยนถูกอ้างอิงจาก Vithal et al (2013) เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 4.9 พบว่าคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานตยังคงเป็นผง น้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายได้ง่าย แต่มีความแตกต่างกันของสีที่เปลี่ยนไปตามสีของผลึกคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งมีสีออกเขียวอมฟ้า สีที่ได้แตกต่างกันตามเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ดังภาพ (ก) ให้สีขาวหม่นๆ (ข) และ (ค) ให้สีขาวอมเขียวอ่อนๆ ซึ่งทั้งสองภาพมีสีใกล้เคียงกัน เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่ใช้ปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ (ก) 1% โดยน้ำหนัก (ข) 5% โดยน้ำหนัก และ (ค) 6.5% โดยน้ำหนัก

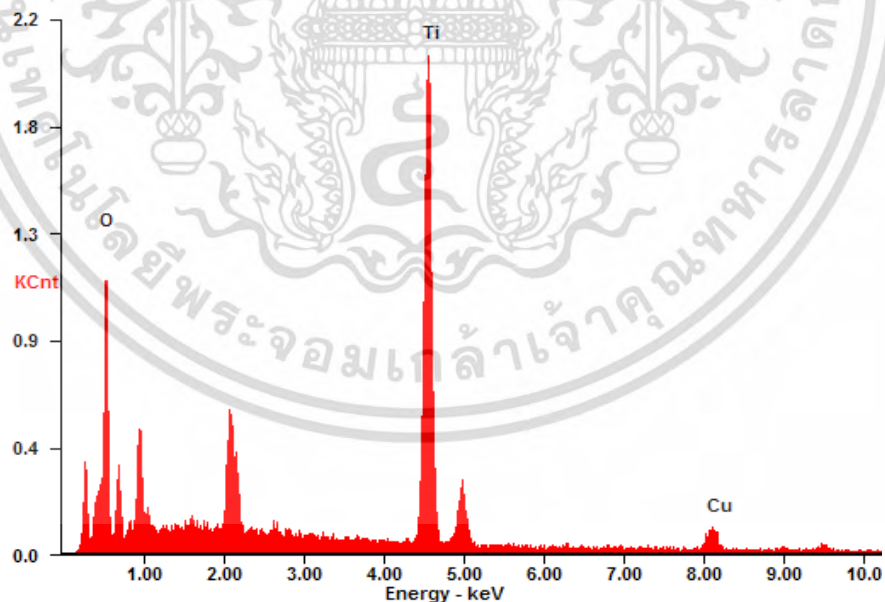
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะสีฐานและพื้นผิวภายหลังการปรับปรุง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานตที่สังเคราะห์ได้ ยังคงมีสีฐานเป็นริบบอน จากภาพมีขนาดความกว้าง และยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 227 นาโนเมตรและ 1062 นาโนเมตร ตามลำดับ พื้นที่ผิวที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับริบบอนนาโนไททานตคือมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 16 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับก่อนทำการแลกเปลี่ยนไอออน แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคอปเปอร์และโซเดียมไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของริบบอน



ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างสัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วย

#### คอปเปอร์(II)คลอไรด์

และศึกษาผลของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคอปเปอร์(II)ไอออน กับไอออนของโซเดียม ด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการและสภาวะดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้อย่างสมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่าสัดส่วนระหว่าง โซเดียม กับไททาเนียมมีค่าเป็น 0 : 1 นั่นคือไม่มีปริมาณโซเดียมอยู่ในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต ในทางกลับกันพบว่าสัดส่วนระหว่างคอปเปอร์(II)ไอออนกับ ไททาเนียมมีค่าเป็น 1 : 9 นั่นคือมีปริมาณคอปเปอร์อยู่เล็กน้อยในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถยืนยันว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาคูสมบัติเชิงแสงเทียบกับการศึกษาของ Vithal et al (2013) ที่ให้ผลของการสังเคราะห์ใกล้เคียงกัน พบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 397.4 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาทาส และริบบอนนาโนไททาเนต

จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะ เพื่อพิจารณาคูสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

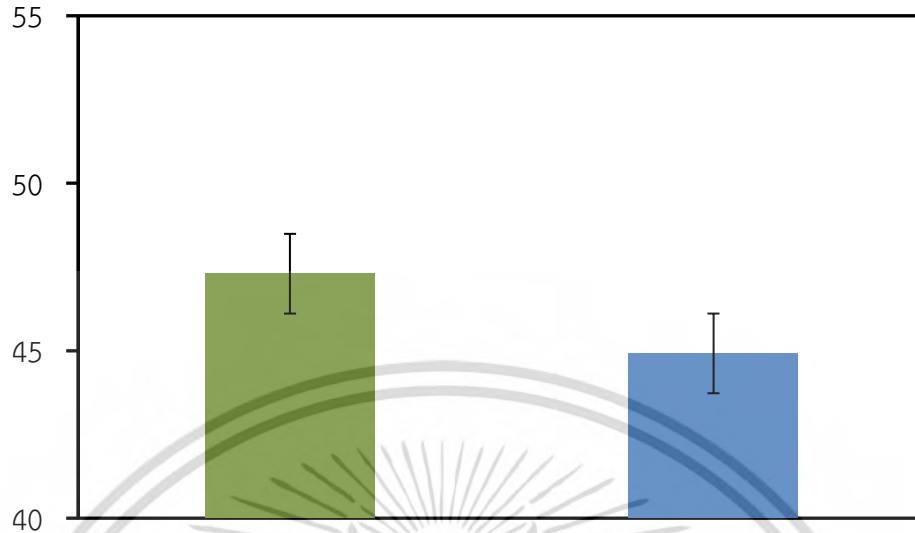
ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง	ค่าพลังงานกระตุ้น (อิเล็กตรอน โวลต์)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	3.20	387.5	10.0
โซเดียมไททาเนต (Na <sub>2</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>7</sub> )	3.70	335.1	18.0
คอปเปอร์ริบบอนนาโน ไททาเนต (Cu <sub>2</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>7</sub> )	3.12	397.4	16.0

#### 4.4 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ และที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารพิษในน้ำ โดยมีแสงกระตุ้น หรือ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยฟอร์มาลดีไฮด์ถูกใช้เป็นสารพิษตัวอย่าง การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ สามารถทำการศึกษาได้ด้วยการกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้เท่ากับ 0.01 กรัม สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 ลิตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาทาส, ริบบอนนาโนไททาเนต และคอปเปอร์ริบบอนนาโน-

ไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II) คลอไรด์ที่ 1, 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือในสารละลาย โดยผลการทดลองแสดงในรูปของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดไป 90 เปอร์เซ็นต์ (R90)



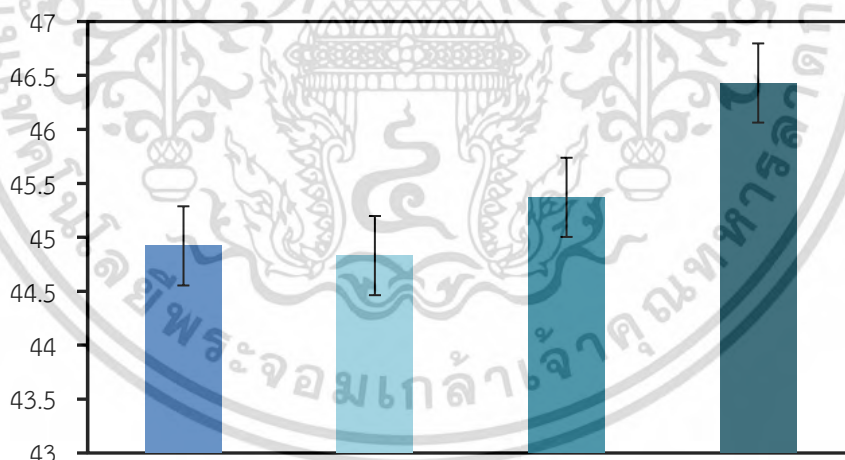
ภาพที่ 4.11 อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ ริปบอนนาโนไททานเนต (R90)

จากภาพที่ 4.11 พิจารณาประสิทธิภาพระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ ริปบอนนาโนไททานเนต (R90) พบว่าประสิทธิภาพของไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสสามารถกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 47 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ริปบอนนาโนไททานเนต สามารถกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีกว่าริปบอนนาโนไททานเนตเพียงเล็กน้อย จากผลการทดลองพบว่า ถึงแม้ริปบอนไททานเนตที่สังเคราะห์มีพื้นที่ผิวที่มากกว่าไททานเนียมไดออกไซด์ แต่กลับไม่เพิ่มอัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ อาจเนื่องจากคุณสมบัติฟอร์มัลดีไฮด์มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวดั้วรงปฏิริยาต่ำ จากการอ้างอิงของ Hoang Tran et al. ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงไม่เป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ นอกจากนี้ ไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นมากที่สุด 387.5 นาโนเมตร ในขณะที่ริปบอนนาโนไททานเนตที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นมากที่สุด 335 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าของไททานเนียมไดออกไซด์จะช่วยให้สามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้มากกว่า เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 จากข้อมูลของหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในการทดลอง แสดงให้เห็นว่าไททานเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับโฟตอนของแสงที่มีความยาวคลื่น 344 และ 382 นาโนเมตรขณะที่ริปบอนนาโนไททานเนตดูดซับโฟตอนของแสงที่มีความยาวคลื่น 344 นาโนเมตรเท่านั้น

ตาราง 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรีที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 450 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)
344	27
382	24
413	49

ผลของการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ภายหลังการปรับปรุงระบบอนนาโนไททาเนตโดยการเติมคอปเปอร์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในภาพที่ 4.12 พบว่าการเติมคอปเปอร์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 44 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระบบอนนาโนไททาเนต อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณคอปเปอร์ที่ 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกดีขึ้น เป็น 45 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงระบบอนนาโนไททาเนตให้เหมาะต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลติกเพื่อกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ โดยปริมาณดังกล่าวยังเป็นปริมาณที่มากที่สุดของคอปเปอร์ในการแทรกตัวอยู่ในระบบอนนาโนไททาเนต รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค เนื่องจากการเติมคอปเปอร์ส่งผลต่อการลดลงของแถบช่องว่างพลังงาน ซึ่งสามารถดูดซับโฟตอนในปริมาณมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.12 อัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของระบบอนนาโนไททาเนต เทียบกับคอปเปอร์ระบบอนนาโนไททาเนตที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ปริมาณต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ระบบอนนาโนไททาเนตสามารถสังเคราะห์ได้ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลทำให้ได้ระบบอนที่มีโครงสร้างแบบชั้นพื้นที่ผิวสูงขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัมเป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม แถบช่องว่างอิเล็กตรอนสูงขึ้นจาก 3.2 เป็น 3.7 อิเล็กตรอน โวลต์ จากผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ระหว่าง ไททานเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส และระบบอนนาโนไททาเนตแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจากการสังเคราะห์เป็นระบบอนไททาเนตมีผลน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ลดลงในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยพลังงานการกระตุ้นที่เหมาะสมส่งผลให้อธิพผลการผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือ ซูเปอร์เรดิคัลแอนไอออนมากพอในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ระบบอนนาโนไททาเนตสามารถขยายการใช้งานในช่วงแสงขาวได้โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)คลอไรด์เป็นคอปเปอร์ระบบอนนาโนไททาเนต จากผลของการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าคอปเปอร์ระบบอนนาโนไททาเนตที่ได้ยังคงโครงสร้างเป็นนาโนริบบอนที่มีพื้นที่ผิวโดยเฉลี่ยประมาณ 16 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยลดลงเหลือ 3.12 อิเล็กตรอน โวลต์ ผลการปรับปรุงด้วยการวัดปริมาณพลังงานที่ปลดปล่อยจากอิเล็กตรอน (EDX) ทำให้ทราบว่าที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณคอปเปอร์ที่สามารถแทรกตัวเข้าไปในระบบอนนาโนไททาเนตได้มากที่สุด สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์พบว่าคอปเปอร์ระบบอนนาโนไททาเนตเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ ที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์และประสิทธิภาพสูงสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสภาวะการสังเคราะห์เพื่อให้ได้โครงสร้างนาโนไททาเนตรูปแบบอื่น เช่น แท่งนาโน หรือเส้นลวดนาโน เพื่อศึกษาสมบัติของโครงสร้างนาโนชนิดอื่น
2. สามารถทดลองใช้สารประกอบของโลหะชนิดอื่นมาปรับปรุงนอกเหนือจากคอปเปอร์(II)คลอไรด์ เช่น ซิลเวอร์(I)ไนเตรต ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วยลดค่าพลังงานกระตุ้นได้ดี
3. สามารถเผาให้ความร้อน (Calcination) กับระบบอนนาโนไททาเนตเพื่อควบคุมเฟสเป็นอะนาเทสและยังคงโครงสร้างแบบนาโนริบบอน เพื่อให้ระบบอนนาโนไททาเนตนั้นมีระนาบผลึกที่แน่นอน

## บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. “คู่มือการจัดการสารอันตรายสูงฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde).” กรุงเทพมหานคร : กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. 2541.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. “คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มัลดีไฮด์.” [Online]. Available : <http://oaep.diw.go.th/cms/images/stories/pdf/Formaldehyde.pdf>.

ชลดา ชีรการุณวงศ์. “บททวนเอกสารเรื่องวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และโครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่ 14 (ฉบับที่ 1). 2555.

ณัฐพร ม่วงไตรรัตน์ และคณะ. “การพัฒนาสารเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนบนเหล็กกล้าไร้สนิม.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2554.

ณัฐวดี เทียนผ่องใส และคณะ. “การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการเร่งเชิงแสงในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย และคณะ. “ออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

อภิรัฐ ทวีรัตนานนท์ และคณะ. “การปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) โดยใช้เส้นใยจากเปลือกข้าวโพด.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

อุษา สุขขา. “ผลของพฤติกรรมทางความร้อนและการเจือโลหะเงินที่มีต่อโครงสร้างผลึกสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.

Chengxiang Wang, Longwei Yin, Luyuan Zhang, Ningning Liu, Ning Lun, and Yongxin Qi (2010). “Platinum-Nanoparticle-Modified TiO<sub>2</sub> Nanowires with Enhanced Photocatalytic Property.” Applied materials and interface. 11(2): 3373-3377.

Daijiro Tsukamoto, Makoto Ikeda, Yasuhiro Shiraiishi, Takayoshi Hara, Nobuyuki Ichikuni, Shunsuke Tanaka, and Takayuki Hirai (2011). “Selective Photocatalytic Oxidation of Alcohols to Aldehydes in Water by TiO<sub>2</sub> Partially Coated with WO<sub>3</sub>.” Journal of Chemistry European. 17: 9816-9824.

Hoang Tran, Jason Scott, Ken Chiang, Rose Amal (2006). "Clarifying the role of silver deposits on titania for the photocatalytic mineralisation of organic compounds." *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 183: 41-52.

Guangsheng Cao, Hui Li and Xiaojuan Zhang, *Synthesis* (2010). "photoluminescence and adsorption of Cu-doped hydrogen titanates nanotubes." *Micro & Nano Letters*. 6(2): 98-101.

M.Vithaln,S.RamaKrishna,G.Ravi,SureshPalla,RadhaVelchuri,SomeshwarPola (2013). "Synthesis of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ag}^+$  doped  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  by a facile ion-exchange method as visible-light-driven photocatalysts." *Ceramics International*. 39: 8429-8439.

Ping Weia,b, Jiawen Liua,n, Zhonghua Lib,nnaKey (2012). "Effect of Pt loading and calcination temperature on the photocatalytic hydrogen production activity of  $\text{TiO}_2$  microspheres." *Journal of Chemical Engineering*. 39: 5387-5391

Kunlanun Kiatkitipong, Akihide Iwase, Jason Scott, Rose Amal (2011). "Hydrothermally Synthesized Titanate Nanostructures: Impact of Heat Treatment on Particle Characteristics and Photocatalytic Properties." *Journal of Chemical Engineering Science*. 3: 3988-3996.

Kunlanun Kiatkitipong, Akihide Iwase, Jason Scott, Rose Amal (2013). "Photocatalysis of heat-treated sodium- and hydrogen-titanate nanoribbons for water splitting,  $\text{H}_2/\text{O}_2$  generation and oxalic acid oxidation." *Journal of Chemical Engineering Science*. 93: 341-349.

Yongnan Zhao, Jun Jin, Xiaoqin Yang (2007). "Hydrothermal synthesis of titanate nanowire arrays." *Materials Letters*. 61: 384-388.



## แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 3 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2559

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)  แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ ภาษาไทย เครื่องกำจัดสารอินทรีย์พิษในน้ำเสีย

ภาษาอังกฤษ (Organic Waste Treatment Machine)

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/ 2558 ถึงวันที่ 30/ กันยายน/ 2559

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1/ ตุลาคม/ 2558 ถึงวันที่ 30/ กันยายน/ 2559

## ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

## 1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 100,000 บาท 74 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป 9/ กุมภาพันธ์/ 2559

งวดที่ 2 35,000 บาท 26 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป 26/ กันยายน/ 2559

## 2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย	50,000	50,000	0
ค่าวัสดุ	85,000	85,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	135,000	135,000	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ..... ผศ.ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ .....

ตำแหน่งปัจจุบัน

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D. (Chem. Eng.)	Chemical Engineering	The University of New South Wales	2012
B.Sc. (Chem. Eng.)	Chemical Engineering	Chulalongkorn University	2008

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) .....

การใช้โครงสร้างนาโนไททาเนตแบบหนึ่งมิติ (1D titanate) ที่เตรียมได้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์/ไททาเนต โครงสร้าง 2 หรือ 3 มิติ (2D, 3D structures) เพื่อได้ลักษณะโครงสร้างที่เลือกจำเพาะ (Shape selective) สำหรับการดูดซับ หรือการเร่งปฏิกิริยา หรือเพื่อปรับปรุง เปลี่ยนแปลง คุณสมบัติ เช่น เฟสของผลึก (crystalline phase) ด้านมุมของผลึก (exposed facets) เพื่อให้การใช้งาน โครงสร้างนาโนไททาเนตเกิดประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานมากยิ่งขึ้น .....

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2557	ทุนวิจัย	ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ (สกว.)
2558	ทุนวิจัย	ทุนโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
2559	ทุนวิจัย	ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

## Publications

1. Payormhorm, J., Chuangchote, S., **Kiatkittipong, K.**, Chiarakorn, S., Laosiripojana, N., (2017) Xylitol and gluconic acid productions via photocatalytic-glucose conversion using TiO<sub>2</sub> fabricated by surfactant-assisted techniques: Effects of structural and textural properties, *Materials Chemistry and Physics*, 196 29-36.
2. **Kiatkittipong, K.**, Assabumrungrat, S., (2017) A Comparative Study of Sodium/Hydrogen Titanate Nanotubes/Nanoribbons on Destruction of Recalcitrant Compounds and Sedimentation, *Journal of Cleaner Production*, 148, 905-914.
3. Phimsen, S., Yamada, H., Tagawa, T., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., (2017) Epoxidation of methyl oleate in a TiO<sub>2</sub> coated-wall capillary microreactor, *Chemical Engineering Journal*, 314, 594-599.
4. Phimsen, S., Kiatkittipong, W., Yamada, H., Tagawa, T., **Kiatkittipong, K.**, Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., (2016) Oil extracted from spent coffee grounds for bio-hydrotreated diesel production, *Energy Conversion and Management*, 126, 1028-1036.
5. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S., (2014) Catalytic reforming of glycerol in supercritical water with nickel-based catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (27), 14739-14750.
6. Eiamsa-ard, S., **Kiatkittipong, K.**, (2014) Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO<sub>2</sub>/water nanofluid, *Applied Thermal Engineering* 70, 896-924
7. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., **Kiatkittipong, K.**, Kiatkittipong, W., Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S. (2014) Catalytic reforming of glycerol in supercritical water with nickel-based catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (27), 14739-14750.

8. Kiatkittipong, W., Phimsen, S., **Kiatkittipong, K.**, Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2013) Diesel-like hydrocarbons production from hydroprocessing of relevant refining palm oil, *Fuel Processing Technology* 116, 16-26 (impact factor 2013 = 3.019)
9. Pairojpiriyakul, T., Croiset, E., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Arpornwichanop, A., Assabumrungrat, S. (2013) Hydrogen production from catalytic supercritical water reforming of glycerol with cobalt based catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (11), 4368-4379. (impact factor 2013 = 2.930)
10. **Kiatkittipong, K.**, Iwase, A., Scott, J., Amal, R. (2013) Photocatalysis of heat treated sodium- and hydrogen-titanate nanoribbons for water splitting,  $H_2/O_2$  generation and oxalic acid oxidation, *Chemical Engineering Science*, 33, 341-349 (impact factor 2013 = 2.613)
11. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R. (2011) Hydrothermally synthesised titanate nanostructures: Impact of heat treatment on particle characteristics and photocatalytic properties, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3, 3988-3996. (impact factor 2013 = 5.900)
12. **Kiatkittipong, K.**, Ye, C., Scott, J., Amal, R. (2010) Understanding hydrothermal titanate nanoribbon formation, *Crystal Growth & Design*, 10, 3618-3625. (impact factor 2013 = 4.558)
13. **Kiatkittipong, K.**, Ye, C., Scott, J., Amal, R. (2010) Investigation preparation parameters during titanium oxide nanoribbon synthesis, *IEEE Explore on Nanoscience and Nanotechnology*, 6045196, 105-107.
14. Wang, Y., Chan S.L., Amal, R., Shen, Y.R., **Kiatkittipong, K.** (2010). XRD Anisotropic Broadening of Nano-Particles, *Powder Diffraction* 25, 217. (impact factor 2013 = 0.544)

#### National Publications

1. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์, การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้รีบบอนนาโนไททานตโครงสร้างแบบชั้นที่แลกเปลี่ยนด้วยทิน (II) ไอออน ภายใต้แสงวิลิเบิล, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ 2, 1-12., 2556
2. กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์, การสังเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนเมตรไททานตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล, วารสารสมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย 3, 64-69, 2556.

**Refereed International Conference Proceedings**

1. Ouraipryvan, P., Joosing, N., Kiatkittipong K., (2014) Effect of copper dopant on photocatalytic activity of titanate nanoribbon, The 4th TIChE International Conference 2014 (18-19 December 2014)
2. **Kiatkittipong, K.**, Assabumrungrat, S. (2014) Understanding phase transformation of titanate nanoribbons by heat treatment, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7<sup>th</sup> Asia-Pasific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
3. Teerachaiyapat, T., **Kiatkittipong, K.**, Kiatkittipong, W., Assabumrungrat, S. (2014) Ti-O nanoribbon photocatalyst: the ion exchange process of  $co^{2+}$  intercalated in layered nanoribbons, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7<sup>th</sup> Asia-Pasific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
4. Phimsen, S., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Yamada, H., Tagawa, T., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2014) Oil extracted from spent coffee grounds for bio-hydrogenated diesel production, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7<sup>th</sup> Asia-Pasific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
5. Pongsiriyakul, K., Kiatkittipong, W., **Kiatkittipong, K.**, Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2014) Hydrotreated vegetable oil production under synthesis gas, Proceedings, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and 7<sup>th</sup> Asia-Pasific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7) (7 – 10 September 2014, Bangkok, Thailand)
6. **Kiatkittipong, K.**, Pongsiriyakul, K., Phimsen, S., Kiatkittipong, W., Wongsakulphasatch, S., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S. (2013) Hydrotreated biodiesel production from palm fatty acid distillate, Proceedings, The 5<sup>th</sup> Regional Conference on Chemical Engineering (7-8 February 2013, Pattaya, Thailand)

7. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R., The impact of calcination on titanate nanostructure characteristics and their ensuing photocatalytic properties, Proceedings, The 16<sup>th</sup> International Conference on TiO<sub>2</sub> Photocatalysis Fundamentals and Applications (7-10 November 2011, San Diego, USA)
8. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R., Titanate nanostructure phase transformation and its influence on photocatalytic activity, Proceedings, Chemeca Conference (18-21 September 2011, Sydney, Australia)
9. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R., The structural transformation of hydrothermally synthesized titanate nanoribbons and nanotubes and photocatalytic activity, Proceedings, 22<sup>nd</sup> North American Catalysis Society Meeting (5-10 June 2011, Detroit, USA)
10. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R., An investigation of titanate nanostructure and photodegradation, Proceedings, The 7<sup>th</sup> Annual Conference of the ARC centre of Excellence for Functional Nanomaterials (25-26 November 2010, Gold Coast, Australia)
11. **Kiatkittipong, K.**, Scott, J., Amal, R., The effect of calcination temperature on titanate nanoribbon structure and its photocatalytic activity, Proceedings, Chemeca Conference (26-29 September 2010, Adelaide, Australia)
12. **Kiatkittipong, K.**, Ye, C., Scott, J., Amal, R., Synthesis condition and post treatment effect on titanate nanoribbons, Proceedings, The 6<sup>th</sup> Annual Conference of the ARC centre of Excellence for Functional Nanomaterials (9-11 November 2009, Coffs Harbour, Australia)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้