

การปรับปรุงโครงสร้างไททานิคแบบขั้นด้วยคอมพิวเตอร์ไอออนเพื่อ  
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การปรับปรุงโครงสร้างโททาเน็ตแบบชั้นด้วยคอปเปอร์(II)ไอออนเพื่อ  
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก



นุชจรินทร์ จูสิงห์  
พิมพ์ชนก คล้ายทองคำ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน "สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารฉบับนี้ตั้งแต่ปีการศึกษา 2556 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decorating titanate layer structure with copper for  
photodegradation



This Thesis is Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Bachelor of Chemical Engineering Faculty of Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในชื่อและนามสกุลของผู้แต่งไว้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2013

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เรื่องการปรับปรุงโครงสร้างไททานิตแบบชั้นด้วยคอปเปอร์ (II) ไอออนเพื่อ  
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

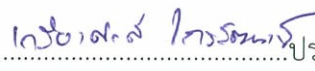
โดย นางสาวนุชจรินทร์ จุสิงห์  
นางสาวพิมพ์ชนก คล้ายทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

  
.....ประธานกรรมการ  
(ดร.นริศรา ทองบุญชู)

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	เรื่องการปรับปรุงโครงสร้างไททานิตแบบชั้นด้วย คอปเปอร์(II)ไอออนเพื่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก
โดย	นางสาวนุชจรินทร์ จุสิงห์ นางสาวพิมพ์ชนก คล้ายทองคำ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณคอปเปอร์(II)ไอออน ( $Cu^{2+}$ ) ที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ในการทดลองทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานิตจากไททานีียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสบริสุทธิ์ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททานิตที่มีลักษณะสัณฐานคล้ายริบบิ้นและมีโครงสร้างแบบชั้น และนำมาปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่สัดส่วน คอปเปอร์(II)คลอไรด์ต่อโซเดียมไททานิตเป็น 1, 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกพบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไม่มีผลต่อปฏิกิริยาเนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับบนพื้นผิวดำ การเติมคอปเปอร์ในชั้นโครงสร้างของริบบอนนาโนไททานิตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโฟตอนได้มากขึ้น โดยที่ คอปเปอร์ที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณสูงสุดในการเติมลงในชั้นโครงสร้างและมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกได้ดีถึง 90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงโครงสร้างไททานิตแบบชั้นด้วยคอปเปอร์(II)ไอออนเพื่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและปรับปรุงด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งนี้ได้ทำการวิจัยเพื่อหาปริมาณคอปเปอร์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพดี

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้หากไม่ได้รับความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยพร้อมทั้งคำปรึกษาที่มีค่าจาก ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในงานวิจัย ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ดร.อัศวิต ศิริสุข ผู้ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ผลข้อมูล ขอขอบพระคุณกลุ่มงานวิจัยตัวเร่งปฏิกิริยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิเคราะห์ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องทดลองคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองหาความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ และขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ที่ช่วยวิเคราะห์หาความยาวคลื่นที่เหมาะสมต่อการดูดกลืนแสงของฟอร์มัลดีไฮด์ ขอขอบคุณพิศสัย ผลโพธิ์ ที่ช่วยเอื้อเฟื้อความสะดวกและให้ความช่วยเหลือระหว่างทำการทดลอง

ขอขอบคุณพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆทุกท่านสำหรับทุกคำแนะนำ และทุกกำลังใจที่มีให้คณะผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณยิ่งสำหรับผู้ปกครองของคณะผู้จัดทำ ที่ให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้คณะผู้จัดทำมีความมานะพยายามทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จล่วงด้วยดี

นางสาวนุชจรินทร์

จูสิงห์

นางสาวพิมพ์ชนก

คล้ายทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity).....	3
2.2 สารประกอบไททาเนียม-ออกไซด์ (Titanium-oxide compound).....	4
2.3 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis).....	6
2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange).....	7
2.5 ฟอรัมาลดีไฮด์ (formaldehyde).....	7
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	11
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	11
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	11
3.3 การสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	12
3.5 การปรับปรุงสมบัติของรีบบอนนาโนไททาเนตที่ใช้คอปเปอร์(II)ไอออนในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	13
3.6 การศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ.....	13
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	15
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสบริสุทธิ์.....	15
4.2 ผลการสังเคราะห์รีบบอนนาโนไททาเนต.....	16
4.3 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยารีบบอนนาโนไททาเนตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน.....	18
4.4 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก.....	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	24
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	24
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	24
เอกสารอ้างอิง.....	25
ภาคผนวก ก.....	27
ภาคผนวก ข.....	28
ภาคผนวก ค.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์.....	6
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	20
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรีที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 450 นาโนเมตร.....	22
ข-1 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis Process).....	28
ข-2 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก(Photocatalytic Process) กรณีใช้ไททาเนียมไดออกไซด์(TiO <sub>2</sub> anatase 100%) ในการทำปฏิกิริยา .....	28
ข-3 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก(Photocatalytic Process) กรณีใช้ริบบอนนาโนไททาเนตในการทำปฏิกิริยา .....	29
ข-4 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) กรณีใช้คอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตในการทำปฏิกิริยาที่สัดส่วนของคอปเปอร์(II)ต่างกัน .....	30
ค-1 ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดภายในตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนต.....	31
ค-2 ผลการคำนวณค่าที่ใช้ในการหาปริมาณคอปเปอร์ในตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง .....	3
2.2 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก .....	4
2.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ .....	5
2.4 ภาพจำลองโครงสร้างแบบชั้น .....	7
3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล .....	12
3.2 ภาพกล้องทึบแสงต่อกับหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในการศึกษา .....	14
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส .....	15
4.2 ลักษณะพื้นฐานและพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น .....	15
4.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส .....	16
4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททาเนต .....	16
4.5 พื้นผิวและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนต .....	17
4.6 โครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททาเนต .....	17
4.7 กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททาเนต .....	18
4.8 ลักษณะทางกายภาพของคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	19
4.9 ตัวอย่างพื้นฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	19
4.10 ตัวอย่างกราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์ .....	20
4.11 อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสบริสุทธิ์ กับ ริบบอนนาโนไททาเนต(R90) .....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของรีบบอนนาโนไททาเนต เทียบกับคอปเปอร์รีบบอนนาโนไททาเนตที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ปริมาณต่างๆ.....	23
ข-1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์.....	28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม และความเป็นพิษของพอร์มาลดีไฮด์ ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำจึงจำเป็นต้องหาวิธีบำบัดพอร์มาลดีไฮด์ที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการกำจัดพิษของพอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากช่วยขจัดความเป็นพิษของสารด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นใช้สารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้พลังงานแสงที่มากพอ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก ซึ่งเมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงกระตุ้นให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และโฮลภายในไททาเนียมไดออกไซด์ออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล และซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออน มีความสามารถสูงในการทำลายโมเลกุลของพอร์มาลดีไฮด์ได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

คุณสมบัติทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์ออกไซด์ เช่น โครงสร้าง (Phase - structure) ขนาดอนุภาค (Particle size) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และอื่นๆ ส่งผลโดยตรงต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพจึงมีหลายงานวิจัยคิดค้นวิธีพัฒนาและปรับปรุง ด้วยเทคนิคการสังเคราะห์ต่างๆ ทั้งวิธีโซลเจล วิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งวิธีสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (ชลดา, 2555) เป็นวิธีการสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากมีข้อดี คือ สามารถควบคุมรูปร่างของผลึกได้อนุภาคของสารมีขนาดเล็กระดับไมโครถึงนาโน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารทางเคมีที่ดีโดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรืออบย่อยอีก ทำให้ประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่างๆ ที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (Nanostructure) เป็น ท่อนาโน (Nanotube) ริบบอนนาโน (Nanoribbon) แท่งนาโน (Nanorod) และเส้นลวดนาโน (Nanowire) เป็นต้น

ด้วยคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งพื้นที่ผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา หรือค่าช่องว่างของแถบพลังงาน เป็นข้อจำกัดต่อประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวได้ด้วยการนำมาทำปฏิกิริยากับเบสเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างที่น่าสนใจคือโครงสร้างแบบท่อริบบอน ที่มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนทับกันคล้ายไม้บรรทัด หรือริบบิน ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ในการเกิดโฮลเพื่อทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล และ อิเล็กตรอนที่สามารถรีดิวซ์ออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออน เพิ่มพื้นที่ผิวในการดูด

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

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตจากสารตั้งต้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส (100%Anatase) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และปรับปรุงสมบัติของริบบอนนาโนไททาเนตในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยคอปเปอร์(II)ไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสามารถควบคุมโครงสร้างนาโนริบบอนให้เหมาะสมต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติของริบบอนนาโนไททาเนตที่ถูกปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)ไอออน ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

1.2.3 เพื่อกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde:  $\text{CH}_2\text{O}$ ) ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic) ในสถานะที่มีริบบอนนาโนไททาเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณคอปเปอร์(II)ไอออนที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตโครงการ

1.3.1 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตจากสารตั้งต้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ และระยะเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

1.3.2 การปรับปรุงสมบัติของริบบอนนาโนไททาเนตด้วยคอปเปอร์(II) ไอออนในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่สัดส่วน 1%, 5% และ 6.5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันวิธีที่ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดสารพิษในแหล่งน้ำมีมากมาย ทั้งกระบวนการทางเคมี เช่น การใส่สารให้เกิดตะกอน กระบวนการทางชีววิทยาโดยการย่อยด้วยจุลินทรีย์ และกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ด้วยวิธีการดูดซับด้วยถ่าน เป็นต้น วิธีการข้างต้นช่วยลดสารพิษ แต่อาจก่อให้เกิดการตกค้างของสารพิษที่ยังคงสภาพของความเป็นพิษอยู่ หรือเกิดเป็นกากของเสียจากการดูดซับ เมื่อต้องการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องคายซับ ส่งผลให้สารพิษดังกล่าวจึงยังคงอยู่ในระบบนิเวศไม่ได้ถูกกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถกำจัดสารพิษได้ ด้วยการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ วิธีดังกล่าวช่วยลดสารพิษในระบบนิเวศ และไม่ทิ้งกากของเสียอีกด้วย

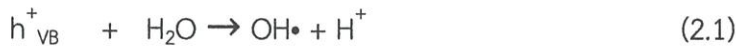
#### 2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic activity)

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงดูดซับโฟตอนที่มีความถี่เท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ซึ่งขึ้นกับของแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band, CB) เกิดสภาวะการขาดอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน หรือโฮล ( $e^-/h^+$  pair) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

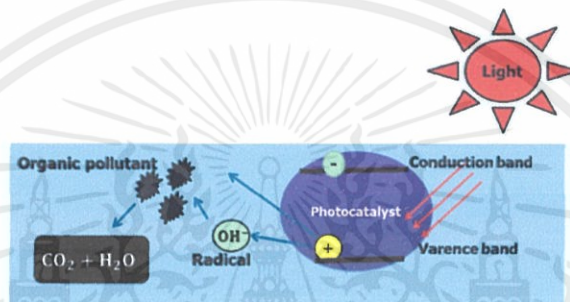


รูปที่ 2.1 การเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน และโฮล จากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสง (ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ ,2551)

ซึ่งเมื่อผิวหน้าของสารในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่มีอยู่ในอากาศจะทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโฮลเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH\cdot$ ) ดังสมการที่ (2.1) ส่วนโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำพลังงาน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ( $O_2^-$ ) ดังสมการที่ (2.2)



ทั้งนี้ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสาร เรียกระบวนการนี้ว่าโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในขณะที่ซูปเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารได้ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) (ณัฐวดี และคณะ, 2551) จากสองกระบวนการที่กล่าวข้างต้นจึงเรียกระบวนการโดยรวมว่ากระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic reaction) ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (ปรับปรุงจาก: อภิรัฐ, 2551)

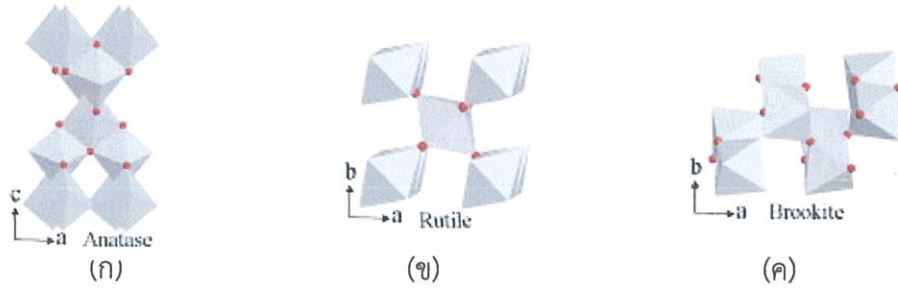
จากการศึกษาในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกข้างต้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีต้องสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในสถานะที่มีแสงซึ่งสารที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารในกลุ่มของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบไททาเนียมออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียร ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และราคาไม่แพง

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

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

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง มีโครงสร้างผลึกมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือโครงสร้างแบบอะนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์ มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์มีผลึกเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โครงสร้างผลึกทั้ง 3 รูป ของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอะตอมออกซิเจนของออกตะฮีดรอลที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>6</sub><sup>2-</sup>) โดยไอออนของ Ti<sup>4+</sup> ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ O<sup>2-</sup> แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตะฮีดรอลของแต่ละโครงสร้างจะต่างกัน โดยโครงสร้างแบบรูไทล์ การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดที่บริเวณมุมและขอบ โครงสร้างแบบอะนาเทสเกิดการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลเฉพาะที่บริเวณขอบ โดยที่แต่ละออกตะฮีดรอลถูกล้อมรอบด้วยออกตะฮีดรอลสี่ออกตะฮีดรอลและมีการใช้ขอบร่วมกัน ส่วนโครงสร้าง

แบบบรูคไคท์มีระบบผลึกเป็นออร์โธโรมบิก การเชื่อมต่อของออกตะฮีดรอลเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุม (ณัฐวดีและคณะ, 2551) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก)อะนาเทส (ข) รูไทล์และ(ค) บรูคไคท์ (อุษา, 2551)

### 2.2.2 การประยุกต์ใช้สารประกอบไททาเนียมออกไซด์

ไททาเนียมออกไซด์ได้รับความนิยมอย่างมากในการประยุกต์สำหรับงานในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง เป็นต้น ทั้งนี้อาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพของไททาเนียมออกไซด์ ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไอออนิกภายใต้สภาวะเบส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโลหะไททาเนต นอกจากนี้ไททาเนียมออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาแบบไม่ใช้แสงได้ ด้วยการใช้ตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งนำมาใช้ในการกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ( $\text{NO}_x$ ) การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์และการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction เป็นต้น

จากการศึกษากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่กล่าวข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวต้องคำนึงถึงสารที่ใช้นั้นคือเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีพื้นที่ผิวมากพอเพื่อดูดซับสารที่ต้องการทำปฏิกิริยา และมีพื้นที่ในการสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัล และซูเปอร์แรดิคัลแอนไอออนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ จากการรายงาน พบว่าริบบอนนาโนไททาเนตเป็นลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมจากที่กล่าวข้างต้น อีกทั้งยังมีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูงจึงเลือกสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต

ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนตมีหลายกระบวนการ ที่นิยมคือกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการทางเคมีแบบเปียก โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว (โซล) และจับตัวกันจนเป็นก้อนที่มีความหนืดสูง (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 โดยไม่จำเป็นต้องมีการเผาหรือบดย่อยอีก ทำให้ประหยัดพลังงาน และค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่มีโครงสร้างทั้งที่ง่ายและซับซ้อนได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่มีลักษณะรูปร่างแบบต่าง ๆ และมีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร (nanostructure) เช่น ท่อนาโน (nanotube) แท่งนาโน (nanorod) เส้นลวดนาโน (nanowire) หรือเส้นใยนาโน (nanofiber) ความแตกต่างของโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

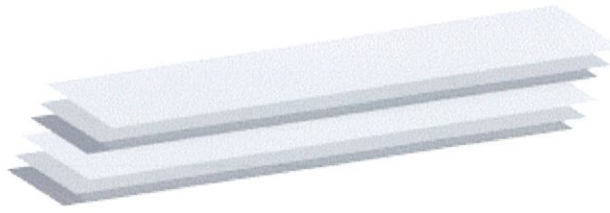
ตาราง 2.1 ตัวอย่างสภาวะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

ชนิดโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะการสังเคราะห์	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
ริบบอนนาโนไททาเนต	200	24
ท่อนาโนไททาเนต	150	72
เส้นลวดนาโน	220	48

ที่มา: Kunlanun et al, 2011, Yongnan, 2007

การปรับปรุงสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งสมบัติทางด้านการดูดกลืนแสง การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งวิธีการปรับปรุงมีหลายวิธีได้แก่ วิธีการจุ่มเคลือบสารด้วยสารละลายโลหะทรานซิชัน (Impregnation) เป็นการทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น พบว่าหากจุ่มเคลือบสารบางชนิดให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถขยายช่วงการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ครอบคลุมแสงย่านที่ตามองเห็นซึ่งเป็นย่านที่มีความเข้มสูงที่สุดของแสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งยังทำให้โครงสร้างของไทเทเนียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนสูงขึ้น จึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี (ชลดา, 2555) อีกวิธีการปรับปรุงที่น่าสนใจคือวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารประกอบโลหะ โดยจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลทำให้ได้เป็นไททาเนต เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในพบว่ามีลักษณะเป็นชั้นซ้อนทับกัน ภาพจำลองโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 ลักษณะดังกล่าวเหมาะสมต่อการปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อให้เกิดการแทรกตัวของไอออนโลหะไประหว่างชั้นของไททาเนต ซึ่งดีกว่าการจุ่มเคลือบไอออนของโลหะไว้เพียงพื้นที่ผิว ที่ง่ายต่อการเสื่อมสภาพจากการที่ไอออนโลหะจะหลุดออกจากผิวไททาเนตระหว่างทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองโครงสร้างแบบชั้นของไททาเนต

## 2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับใช้ปรับปรุงไททาเนตเนื่องจากเป็นวิธีแลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นของไททาเนต ช่วยยืดอายุการใช้งานของไททาเนตหลังการปรับปรุง ไอออนของโลหะที่เข้าไปแทนที่ไอออนเดิมจะหลุดออกจากโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก โลหะที่นิยมใช้ปรับปรุงไททาเนตด้วยวิธีการดังกล่าวอยู่ในหมวดหมู่ของโลหะทรานซิชัน เช่น ซิลเวอร์ (Ag), แพลททินัม (Pt), คอปเปอร์ (Cu) และวานาเดียม (V) เป็นต้น ซึ่งสารที่นำมาใช้แลกเปลี่ยนประจุในที่นี้คือคอปเปอร์(II)คลอไรด์ เนื่องจากไอออนของคอปเปอร์จะช่วยลดความกว้างของแถบพลังงาน ซึ่งวิธีการและสภาวะในการทดลองที่อ้างอิงจาก (M Vithal et al, 2013) เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน และมีสภาวะการทดลองที่ไม่อันตราย และยังให้ผลจากการแลกเปลี่ยนไอออนที่น่าสนใจ จึงเลือกคอปเปอร์(II)คลอไรด์ทดลองแลกเปลี่ยนไอออนกับไททาเนต ซึ่งการศึกษาพบว่า การเติมโลหะเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดความกว้างของแถบพลังงานส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีถึงจุดหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากการเติมโลหะมากเกินไป โมเลกุลของโลหะอาจไปดบังพื้นที่ในการเกิดไฮดรอกซิลแรติคอลล อีกทั้งการลดความกว้างของแถบพลังงานมากเกินไปจะส่งผลให้การดึงอิเล็กตรอนออกไปทำปฏิกิริยานั้นทำได้ยากขึ้น จึงอาจเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

## 2.5 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)

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

### 2.5.1 สมบัติของฟอร์มาลดีไฮด์

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นก๊าซไวไฟ ไม่มีสีมีกลิ่นฉุน มีฤทธิ์กัดกร่อน หนักกว่าอากาศเล็กน้อย ไม่เสถียร เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้ง่ายในส่วนของฟอร์มาลีนมีสมบัติแตกต่างกันตามความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำรวมทั้งอัตราส่วนผสม ของเมทานอลในสารละลาย

### 2.5.2 ความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์และการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบันแหล่งที่มาหลัก มาจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก-เรซิน อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมกระดาษพิมพ์ เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำทิ้งจากโรงพยาบาล หรือหน่วยงานที่มีการใช้ฟอร์มาลีน อาจพบการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำที่ใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำยารักษาสภาพศพไม่ให้เน่าเปื่อย หรือใช้ทำความสะอาดเครื่องมือในทางการแพทย์ ถ้ามีการระบายสารเคมีชนิดนี้โดยตรง หลังจากผ่านการใช้งานแล้วโดยปราศจากการกำจัดพิษอย่างเหมาะสม อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบบำบัดน้ำเสียและก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่มนุษย์ใช้สำหรับอุปโภคบริโภคก็จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์เช่นกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) กระบวนการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำมีหลากหลายวิธี เช่นกระบวนการกำจัดด้วยการดูดซับซึ่งยังคงสภาพความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ ฉะนั้นเพื่อเป็นการเปลี่ยนสารดังกล่าวที่มีพิษเป็นสารที่ไม่มีพิษจึงใช้วิธีการกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ทำได้โดยง่ายภายใต้สภาวะที่มีแสง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kunlanan Kiatkitipong et al. ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะของอนุภาคนาโนไททานเนต และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ระหว่างริบบอนนาโนไททานเนต และท่อนาโนไททานเนต พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของอนุภาคนาโนไททานเนตเปลี่ยนเฟสเป็นอะนาเทสโดยสมบูรณ์ และพื้นที่ผิวของท่อนาโนไททานเนตเมื่อเทียบกับริบบอนนาโนไททานเนตมีการลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่แถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองลดลงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดออกซาลิก (Oxalic acid) นั้นขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า เมื่อเทียบกับเมทานอล (Methanol)

M. Vithal et al. ได้สังเคราะห์โซเดียมไททานเนต และปรับปรุงประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงให้สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ในช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) ระหว่าง คอปเปอร์(II)ไอออน และซิลเวอร์ไอออน พบว่าเมื่อแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างสารดังกล่าว ส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานลดลง โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่แลกเปลี่ยนไอออนกับซิลเวอร์สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสีย้อม (Methylene blue) ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II) นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีความเสถียรสูง สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่มีพื้นที่ผิวต่ำและมีความเสถียรต่ำ

ขึ้นด้วยวิธี Hydrolysis precipitation เพื่อใช้เร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์มีค่า 1 กรัมต่อลิตร และเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะช่วยทำให้สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าสภาวะกรดเหมาะสมต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ชลดา อธิการณวงศ์ รวบรวมข้อมูลการศึกษาวិธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ และโครงสร้างของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งวิธีโซลเจล ไฮโดรเทอร์มอล การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดแบบต่างๆ พร้อมทั้งการประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ซึ่งการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยไอออนของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ณัฐดี เทียนผ่องใส และคณะ ศึกษาปัจจัยในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ศึกษาคือ ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ และผลของค่าความเป็นกรด เบส ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดไปได้มากที่สุดมีค่าเป็นประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาการให้แสงยูวีเท่ากับ 4 ชั่วโมง

Guangsheng Cao et al. ได้สังเคราะห์ท่อนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต พบว่าเมื่อแลกเปลี่ยนไอออน ด้วยสารละลายดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสี ย้อมดีขึ้น และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณของคอปเปอร์ (II) ไอออนในตัวเร่งปฏิกิริยา

Hoang Tran et al. ศึกษาอิทธิพลจากการเจือวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนโลหะซิลเวอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ 4 ประเภท คือ กรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ แอซิดคาร์บอกซิลิก และสารประกอบอะโรมาติก พบว่าพื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับกรดคาร์บอกซิลิกได้ดีทำให้พื้นผิวหน้าของสารอยู่ในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน ที่มีอยู่ในอากาศจึงทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ ต่างจากความสามารถในการดูดซับของแอลกอฮอล์ที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีอย่างจำกัด ที่อุณหภูมิห้อง ในส่วนแอซิดคาร์บอกซิลิกการกำจัดจะเกิดผ่านตัวกลางคือกรดคาร์บอกซิลิกจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอซิดคาร์บอกซิลิก ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับของแอซิดคาร์บอกซิลิกที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงมีอย่างจำกัด สุดท้ายสารประกอบอะโรมาติกข้อจำกัดในการกำจัดขึ้นกับการ

เอกสารนี้ กลับมารวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Daijiro Tsukamoto et al. ศึกษาหาปริมาณการเจือไอออนโลหะทังสเตน ( $WO_3$ ) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเลือกเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อออกซิเดชันแอลกอฮอล์เป็นฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก การทดลองพบว่าวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) มีประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาที่ดี ส่งผลต่อการกำจัดแอลกอฮอล์ซึ่งมีอิทธิพลจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากแถบการนำของไททาเนียมไดออกไซด์เคลื่อนที่ไปที่พื้นผิวของ  $WO_3$  ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลได้มาก ในขณะที่ประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์ลดลง ทั้งนี้เมื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือไอออนของโลหะทังสเตนในสัดส่วนที่มากขึ้นพบว่าความสามารถในการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์บนที่พื้นผิวของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเลือกเกิดปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 7.6 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

จากการศึกษาข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นจากแหล่งที่มาต่างๆทั้งนี้เพื่อสังเคราะห์ระบบนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและใช้โครงสร้างเด่นของโลหะไททาเนตนั้นคือโครงสร้างแบบชั้นมาปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน ซึ่งจะทำให้ไอออนของคอปเปอร์เข้าไปแทนที่โซเดียมในโมเลกุล ไม่ใช่เป็นเพียงการเกาะติดแคที่ผิวซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปไอออนของคอปเปอร์อาจเสื่อมสภาพและหลุดออกจากพื้นผิวได้โดยง่าย ทั้งนี้เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในช่วงแสงที่ตามองเห็น เมื่อรวบรวมข้อมูลได้พอสมควรแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (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 สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Qrec
- 3.1.5 อะเซทิลอะซิโตน 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 เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล
- 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 การสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.3.1 ผสมผงไททาเนียมไดออกไซด์ 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 นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอลออกจากตู้อบ และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะเปิดเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งภายในจะแยกชั้นระหว่าง สารละลายและของแข็ง ให้เทสารละลายออกมาก่อน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งออกมา ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนครั้งละ 400 มิลลิลิตร สลับกับการทำให้ตกตะกอนออกด้วยเครื่องเหวี่ยง สารตกตะกอน ทำซ้ำไปมาจนค่าของสารผลิตภัณฑ์แสดงความเป็นกรด-เบส ประมาณ 7

3.3.4 อบให้ตะกอนแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผง โซเดียมไททาเนต ที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกต่อไป



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล

### 3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

3.4.1 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงออกมาในรูปของภาพสามมิติ สร้างภาพได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนจากผิวหน้าของตัวอย่าง

3.4.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ (EDX) โดยศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยการยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูง พุ่งชนชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นเพื่อให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่ระดับ พลังงานวงในจนทำให้อิเล็กตรอนวงในหลุดออกจากอะตอม แล้วอิเล็กตรอนวงนอกจะคายพลังงาน ออกบางส่วนพร้อมทั้งเปลี่ยนชั้นพลังงานเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดไป พลังงานที่อิเล็กตรอนคาย ออกมาจะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์ซึ่งมีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ เมื่อวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์ดังกล่าว จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าภายในตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยธาตุชนิดใด

3.4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ เป็นการวัด ปริมาตรก๊าซที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาค ก๊าซที่นิยมใช้คือก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ ที่อุณหภูมิจุดเดือดของก๊าซไนโตรเจน (ประมาณ -196 องศาเซลเซียส) ในขั้นแรกต้องไล่ก๊าซที่ไม่ใช่ ไนโตรเจนเหลวออกจากพื้นผิวของอนุภาคออกให้หมด จากนั้นจึงให้พื้นผิวดูดซับก๊าซ และวัดปริมาณ

การดูดซับจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่หายไปเมื่อป้อนสู่อนุภาค หรือวัดจากปริมาณก๊าซที่คายออกมาตอนไล่ก๊าซออกจากอนุภาค

3.4.4 การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททานต (XRD) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยไม่ทำลายสารตัวอย่าง ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างในมุมต่างๆกัน จากนั้นจึงนำผลของการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบตัวอย่าง

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

### 3.5 การปรับปรุงสมบัติของริบบอนนาโนไททานตที่ใช้คอปเปอร์(II)ไอออนในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

3.5.1 นำโซเดียมไททานต 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 จากนั้นนำผงคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานต ที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกดังข้อ 3.4

### 3.6 การศึกษาผลจากการปรับปรุงสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์เป็นของสถาบันวิจัยและพัฒนาและองค์ความรู้เป็นของสถาบันวิจัยและพัฒนา

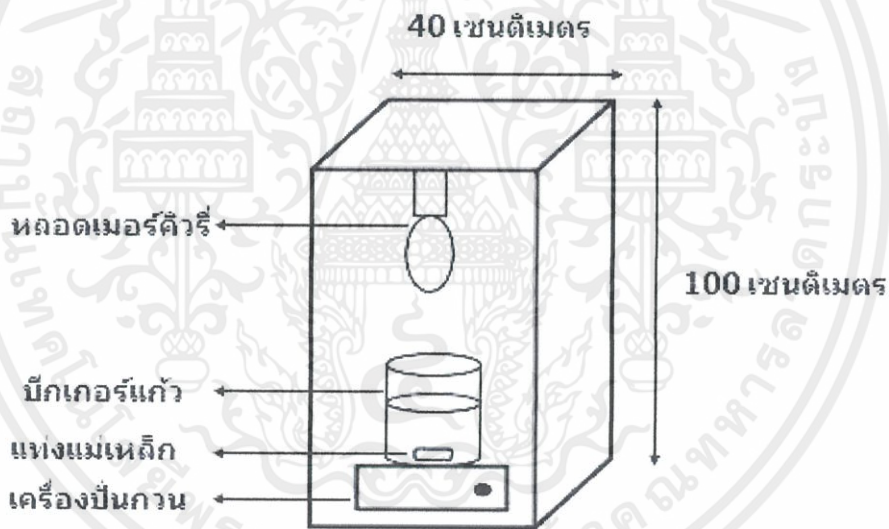
3.6.1 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 0.01 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตรที่บรรจุน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 300 มิลลิลิตร

3.6.2 นำบีกเกอร์ที่เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไว้จากข้อ 3.6.1 ใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดเมอร์คิวรี ดังแสดงในรูป 3.2 ปั่นกวนสารละลายภายใต้แสงภายในกล่องดังกล่าวเป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา และเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงานจนเกิดช่องว่าง อิเล็กตรอน และโฮล

3.6.3 เมื่อครบเวลา 20 นาที ปิดสวิตช์แล้วเปิดกล่องทึบแสง เพื่อให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศจะถูกรีดิวซ์ด้วยออกซิเจนที่อยู่ในแถบคอนดักชันเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออนที่พร้อมในการย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำ จากนั้นปั่นกวนสารในบีกเกอร์ต่อเป็นเวลา 10 นาที พร้อมเปิดสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ปริมาณ 0.68 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเริ่มเก็บสารตัวอย่างทุก 5 นาที จำนวน 2 ตัวอย่าง

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

3.6.5 นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ลดลงด้วยวิธีการทำให้เกิดสี (รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.2 ภาพกล่องทึบแสงต่อกับหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

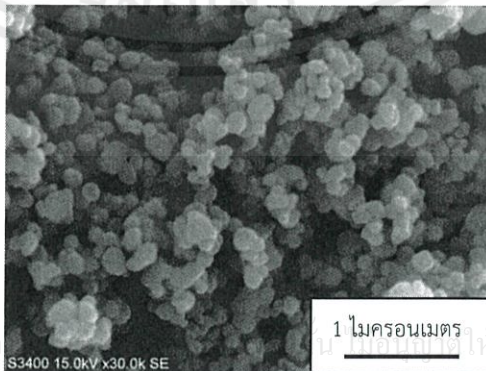
### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะสารตั้งต้น (ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส)

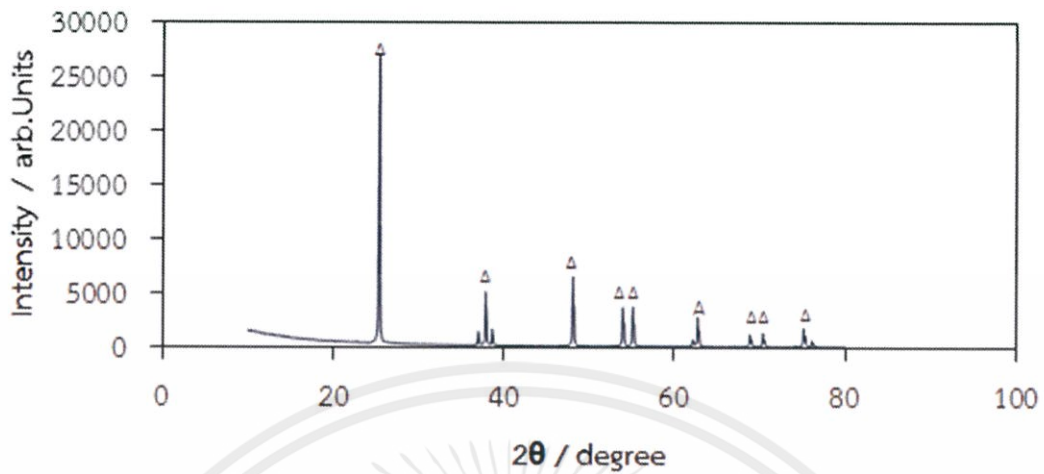
ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีน้ำหนักเบาจึงง่ายต่อการฟุ้งกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะสัณฐานหรือลักษณะพื้นผิวของด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะสัณฐานที่ไม่สามารถระบุได้ (Random shape) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 197 นาโนเมตร พื้นที่ผิวที่ได้จากเครื่องวัดการดูดซับก๊าซ (BET) เป็น 10 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) พบว่าสารตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์เป็นแบบอะนาเทส ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานและพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมออกไซด์แบบอะนาเทส (XRD pattern: No.21-1272)

#### 4.2 ผลการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนต

ลักษณะทางกายภาพของสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (อ้างอิงวิธีการและสภาวะในการสังเคราะห์จาก Kiatkitipong, et al (2011)) คือ เป็นผงสีขาวไม่มีการเปลี่ยนแปลง และให้สัมผัสที่ละเอียดมากขึ้นเมื่อเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส แต่ยังคงมีน้ำหนักเบาและฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังรูปที่ 4.4



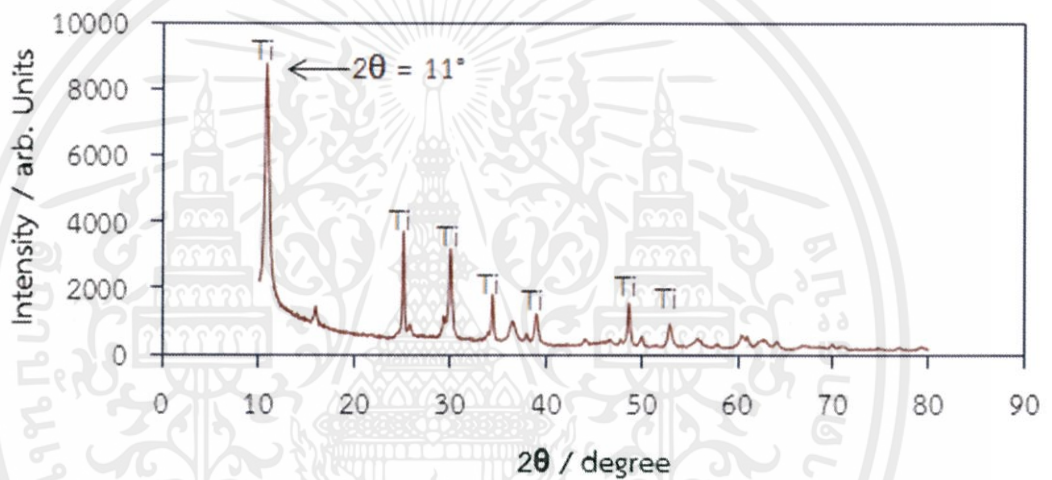
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของริบบอนนาโนไททาเนต

เมื่อส่องตัวอย่างมาวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสัณฐานที่ได้มีลักษณะคล้ายริบบิน หรือไม้บรรทัด จึงเรียกได้ว่าเป็นริบบอนนาโนไททาเนต ความกว้าง และยาว โดยเฉลี่ยเป็น 118 นาโนเมตร และ 1033 นาโนเมตร ตามลำดับ จากเครื่องวัดการดูดซับก๊าซพบว่าพื้นที่ผิวที่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนต

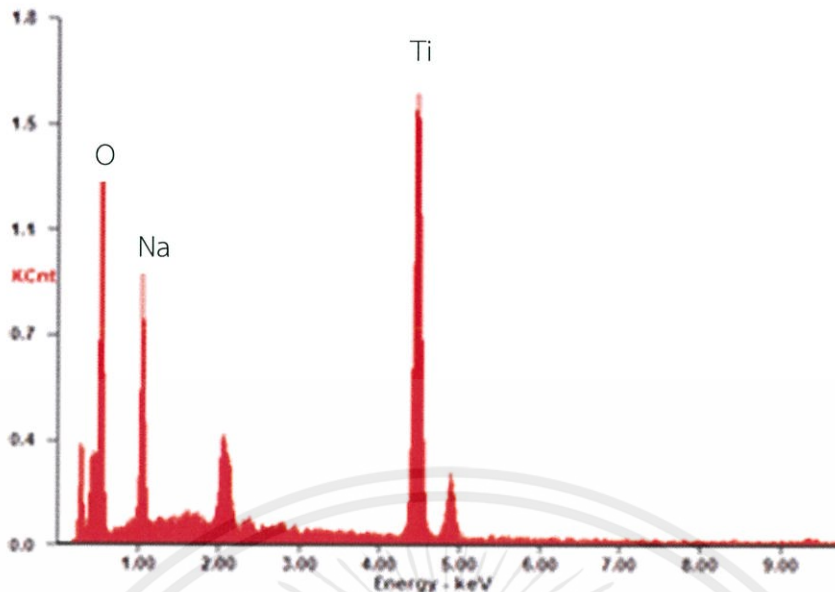
เมื่อพิจารณาการพิสูจน์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของนาโนริบบอนพบว่าเฟสที่ได้เทียบได้กับกราฟอ้างอิงเลขที่ No.31-1329 ซึ่งตรงกับเฟสของไททาเนต ( $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ )



รูปที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของริบบอนนาโนไททาเนต (No.31-1329)

จากรูปที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างของริบบอนนาโนไททาเนตหลังผ่านการสังเคราะห์นั้น มีพีคที่สำคัญคือพีคที่  $2\theta$  เท่ากับ  $11^\circ$  ที่แสดงถึงโครงสร้างแบบชั้นของริบบอนนาโนไททาเนต สามารถคำนวณช่องว่างระหว่างชั้นเท่ากับ 0.8 นาโนเมตร เมื่อศึกษาปริมาณสัดส่วนของธาตุภายใน ด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กตรอน (EDX) ยืนยันการมีอยู่ของโซเดียม โดยสัดส่วนเชิงปริมาณของโซเดียมต่อไททาเนียมออกไซด์ มีค่าประมาณ 1 : 4 แสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



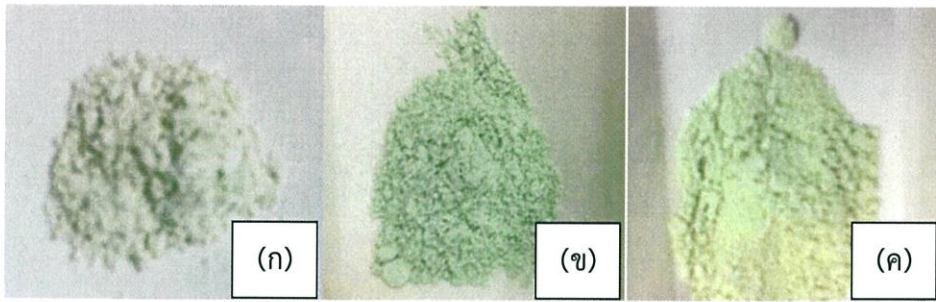
รูปที่ 4.7 กราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในริบบอนนาโนไททาเนต

นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Kiatkitipong, et al (2013) ที่ทำการสังเคราะห์ริบบอนนาโนไททาเนตที่มีลักษณะคล้ายกันด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล ภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าสมบัติเชิงแสงของริบบอนนาโนไททาเนตที่สังเคราะห์ได้ สามารถดูดกลืนแสงได้ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 335 นาโนเมตร หรือต้องให้พลังงานการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์

#### 4.3 ผลการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนตด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน

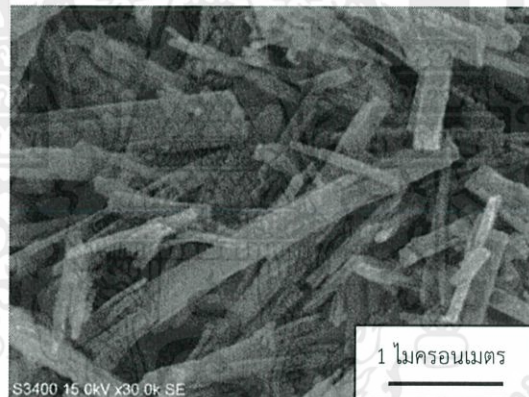
ผลละเอียดของริบบอนนาโนไททาเนตที่ผ่านการสังเคราะห์ ถูกปรับปรุงด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่สัดส่วนดังนี้คือที่ 1,5 และ6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วิธีการและสภาวะการแลกเปลี่ยนถูกอ้างอิงจาก Vithal et al (2013) เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 4.8 พบว่าคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตยังคงเป็นผง น้ำหนักเบา ฟุ้งกระจายได้ง่าย แต่มีความแตกต่างกันของสีที่เปลี่ยนไปตามสีของผลึกคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งมีสีออกเขียวอมฟ้า สีที่ได้แตกต่างกันตามเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของคอปเปอร์(II)คลอไรด์ ดังภาพ (ก) ให้สีขาวหม่นๆ (ข) และ (ค) ให้สีขาวอมเขียวอ่อนๆซึ่งทั้งสองภาพมีสีใกล้เคียงกัน เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คอปเปอร์(II)คลอไรด์ ที่ใช้ปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



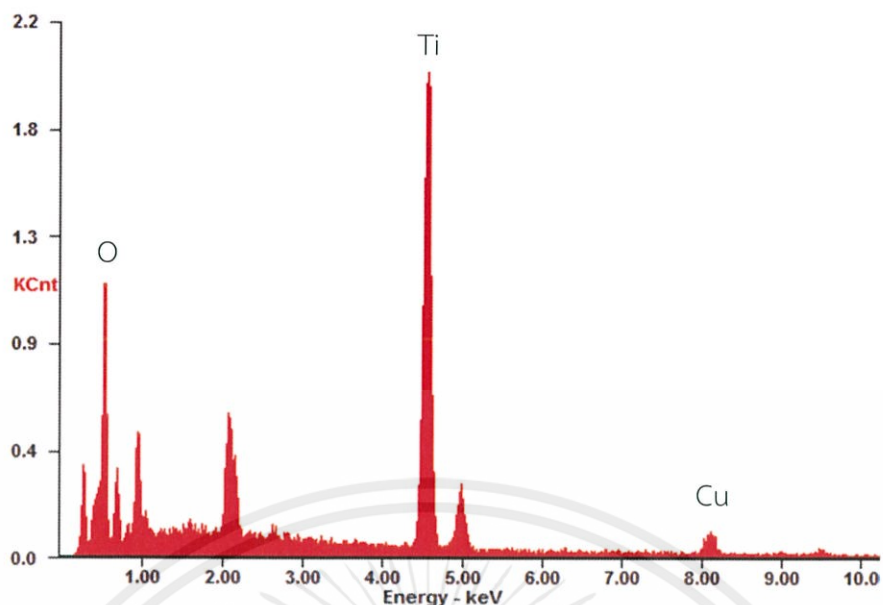
รูปที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II) คลอไรด์ (ก) 1% โดยน้ำหนัก (ข) 5% โดยน้ำหนัก และ (ค) 6.5% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะสัณฐานและพื้นผิวภายหลังการปรับปรุง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่สังเคราะห์ได้ ยังคงมีสัณฐานเป็นริบบอน จากภาพมีขนาดความกว้าง และยาวโดยเฉลี่ยประมาณ 227 นาโนเมตร และ 1062 นาโนเมตร ตามลำดับ พื้นที่ผิวที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับริบบอนนาโนไททาเนตคือมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 16 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับก่อนทำการแลกเปลี่ยนไอออน แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคอปเปอร์และโซเดียมไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของริบบอน



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างสัณฐานและลักษณะพื้นผิวของริบบอนนาโนไททาเนตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์

และศึกษาผลของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างคอปเปอร์(II)ไอออน กับไอออนของโซเดียม ด้วยวิธีตรวจวัดพลังงานที่ถูกคายออกมาจากอิเล็กตรอน เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการและสภาวะดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้อย่างสมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าสัดส่วนระหว่าง โซเดียม กับ ไททาเนียมมีค่าเป็น 0 : 1 นั่นคือไม่มีปริมาณโซเดียมอยู่ในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต ในทางกลับกันพบว่าสัดส่วนระหว่างคอปเปอร์(II)ไอออนกับ ไททาเนียมมีค่าเป็น 1 : 9 นั่นคือมีปริมาณคอปเปอร์อยู่เล็กน้อยในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต ทั้งนี้เอกสารข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถยืนยันว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างสมบูรณ์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟสัดส่วนของธาตุแต่ละชนิดในคอปเปอร์ริบบอนนาโนไททานิตที่ปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II)คลอไรด์

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงแสงเทียบกับการศึกษาของ Vithal et al (2013) ที่ให้ผลของการสังเคราะห์ใกล้เคียงกันพบว่า มีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 397.4 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างน้อย 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเทียบกับไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส และ ริบบอนนาโนไททานิต

จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะ เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

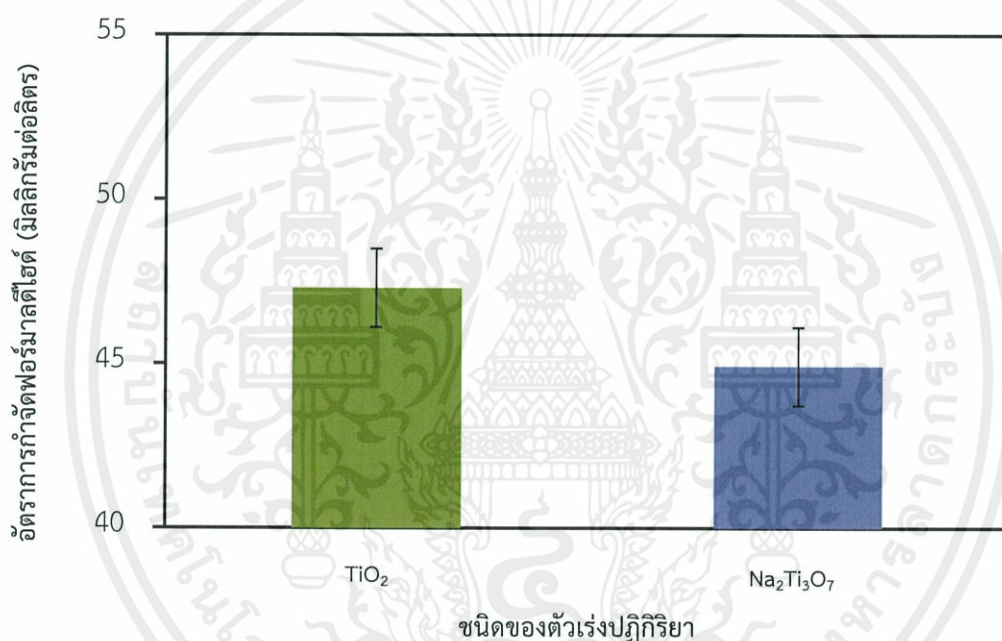
ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ และที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)ไอออน ถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารพิษในน้ำโดยมีแสงกระตุ้น หรือ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยฟอร์มาลดีไฮด์ถูกใช้เป็นสารพิษตัวอย่าง การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถทำการศึกษาได้ด้วยการกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ใช้เท่ากับ 0.01 กรัม สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 ลิตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส, ริงบอนนาโนไททาเนต และคอปเปอร์ริงบอนนาโนไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงด้วยคอปเปอร์(II) คลอไรด์ที่ 1, 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือในสารละลาย โดยผลการทดลองแสดงในรูปของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกกำจัดไป 90 เปอร์เซ็นต์ (R90)



รูปที่ 4.11 อัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ ริงบอนนาโนไททาเนต (R90)

จากรูปที่ 4.11 พิจารณาประสิทธิภาพระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ ริงบอนนาโนไททาเนต (R90) พบว่าประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสสามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 47 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ริงบอนนาโนไททาเนต สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าริงบอนนาโนไททาเนตเพียงเล็กน้อย จากผลการทดลองพบว่า ถึงแม้ริงบอนไททาเนตที่สังเคราะห์มีพื้นที่ผิวที่มากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ แต่กลับไม่เพิ่มอัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ อาจเนื่องจากคุณสมบัติฟอร์มาลดีไฮด์มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวดัเร่งปฏิกิริยาต่ำ จากการอ้างอิงของ Hoang Tran et al. ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงไม่เป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ นอกจากนี้ ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.2

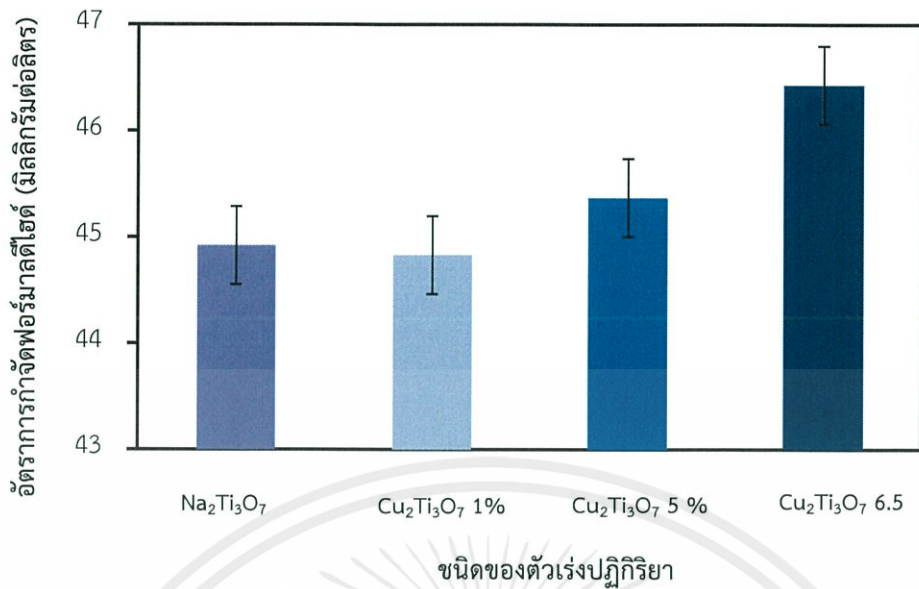
อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นมากที่สุด 387.5 นาโนเมตร ในขณะที่รีบอนนาโนไททาเนตที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้ที่ความยาวคลื่นมากที่สุด 335 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าของไททาเนียมไดออกไซด์จะช่วยให้สามารถดูดซับพลังงานโฟตอนได้มากกว่า เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 จากข้อมูลของหลอดเมอร์คิวรีที่ใช้ในการทดลอง แสดงให้เห็นว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับโฟตอนของแสงที่มีความยาวคลื่น 344 และ 382 นาโนเมตรขณะที่รีบอนนาโนไททาเนตดูดซับโฟตอนของแสงที่มีความยาวคลื่น 344 นาโนเมตรเท่านั้น

**ตาราง 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงและความเข้มสัมพัทธ์ของหลอดเมอร์คิวรีที่มีความยาวคลื่น 300 ถึง 450 นาโนเมตร

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

ผลของการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ภายหลังการปรับปรุงรีบอนนาโนไททาเนตโดยการเติมคอปเปอร์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าการเติมคอปเปอร์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 44 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรีบอนนาโนไททาเนต อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณคอปเปอร์ที่ 5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกดีขึ้น เป็น 45 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ที่ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงรีบอนนาโนไททาเนตให้เหมาะต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเพื่อกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ โดยปริมาณดังกล่าวยังเป็นปริมาณที่มากที่สุดของคอปเปอร์ในการแทรกตัวอยู่ในรีบอนนาโนไททาเนต รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค เนื่องจากการเติมคอปเปอร์ส่งผลต่อการลดลงของแถบช่องว่างพลังงาน ซึ่งสามารถดูดซับโฟตอนในปริมาณมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของริบบอนนาโนไททาเนต เทียบกับ คอปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

รีบบอนนาโนไททาเนตสามารถสังเคราะห์ได้ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลทำให้ได้รีบบอนที่มีโครงสร้างแบบชั้นพื้นที่ผิวสูงขึ้นจาก 10 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 18 ตารางเมตรต่อกรัม แถบช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นจาก 3.2 เป็น 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ จากผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ระหว่าง ไททาเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทส และรีบบอนนาโนไททาเนตแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจากการสังเคราะห์เป็นรีบบอนไททาเนตมีผลน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ลดลงในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยพลังงานการกระตุ้นที่เหมาะสมส่งผลให้อธิปถพลการผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล หรือ ซูเปอร์แรดิคัลแอนไอออนมากพอในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

รีบบอนนาโนไททาเนตสามารถขยายการใช้งานในช่วงแสงขาวได้โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับคอปเปอร์(II)คลอไรด์เป็นคอปเปอร์รีบบอนนาโนไททาเนต จากผลของการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าคอปเปอร์รีบบอนนาโนไททาเนตที่ได้ยังคงโครงสร้างเป็นนาโนรีบบอนที่มีพื้นที่ผิวโดยเฉลี่ยประมาณ 16 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าพลังงานกระตุ้นเฉลี่ยลดลงเหลือ 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลการปรับปรุงด้วยการวัดปริมาณพลังงานที่ปลดปล่อยจากอิเล็กตรอน (EDX) ทำให้ทราบว่าที่เปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณคอปเปอร์ที่สามารถแทรกตัวเข้าไปในรีบบอนนาโนไททาเนตได้มากที่สุด สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์พบว่าคอปเปอร์รีบบอนนาโนไททาเนตเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์คอปเปอร์ 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) กับรีบบอนนาโนไททาเนตเพื่อควบคุมเฟสเป็นอะนาเทสและยังคงโครงสร้างแบบนาโนรีบบอน เพื่อให้รีบบอนนาโนไททาเนตนั้นมีระนาบผลึกที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. “คู่มือการจัดการสารอันตรายสูงฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde).”  
กรุงเทพมหานคร : กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. 2541.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. “คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มัลดีไฮด์.” [Online].  
Available : <http://oaep.diw.go.th/cms/images/stories/pdf/Formaldehyde.pdf>.
- ชลดา อีรการุณวงศ์. “ทบทวนเอกสารเรื่องวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์และ  
โครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่ 14 (ฉบับที่ 1). 2555.
- ณัฐพร ม่วงไตรรัตน์ และคณะ. “การพัฒนาสารเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนบน  
เหล็กกล้าไร้สนิม.” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัย  
สงขลานครินทร์. 2554.
- ณัฐวดี เทียนผ่องใส และคณะ. “การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการเร่งเชิงแสงใน  
สภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- พิมพ์สิรินทร์ แดงสระน้อย และคณะ. “ออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารประกอบ  
อินทรีย์ในน้ำเสีย.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.
- อภิรัฐ ทวีรัตนานนท์ และคณะ. “การปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) โดยใช้เส้น  
ใยจากเปลือกข้าวโพด.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- อุษา สุขขา. “ผลของพฤติกรรมทางความร้อนและการเจือโลหะเงินที่มีต่อโครงสร้างผลึก  
สมบัติ ทางกายภาพของไททาเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร  
มหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Daijiro Tsukamoto, Makoto Ikeda, Yasuhiro Shiraishi, 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 Cu<sup>2+</sup> and Ag<sup>+</sup> doped Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 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 TiO<sub>2</sub> 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, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีการทดลอง

#### 1. การจัดทำกราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

1. เจือจางสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก จะได้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์สำหรับจัดทำกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่เตรียมได้จากข้อที่ 1 มา 10, 20, 30 และ 40 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปิดขวดวัดปริมาตรเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์สำหรับจัดทำกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. นำสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปทำให้เกิดสีตามวิธีการข้อที่ 2 โดยข้ามขั้นตอนการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาโคปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต เนื่องจากสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่เตรียมได้ไม่มีส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาโคปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนต

4. จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ทั้ง 5 ความเข้มข้นมาพลอตกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสง (ข้อมูลผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข)

#### 2. วิธีการทำให้เกิดสีสำหรับการวิเคราะห์สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างอ้างอิงตามมาตรฐานและคณะ (2551) ขั้นตอนการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

1. ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ต้องการวิเคราะห์มาประมาณ 5 มิลลิลิตร จากนั้นใช้ตัวกรองสารละลาย (Syringe filter) กรองตัวเร่งปฏิกิริยาโคปเปอร์ริบบอนนาโนไททาเนตที่เหลือบางส่วนออก

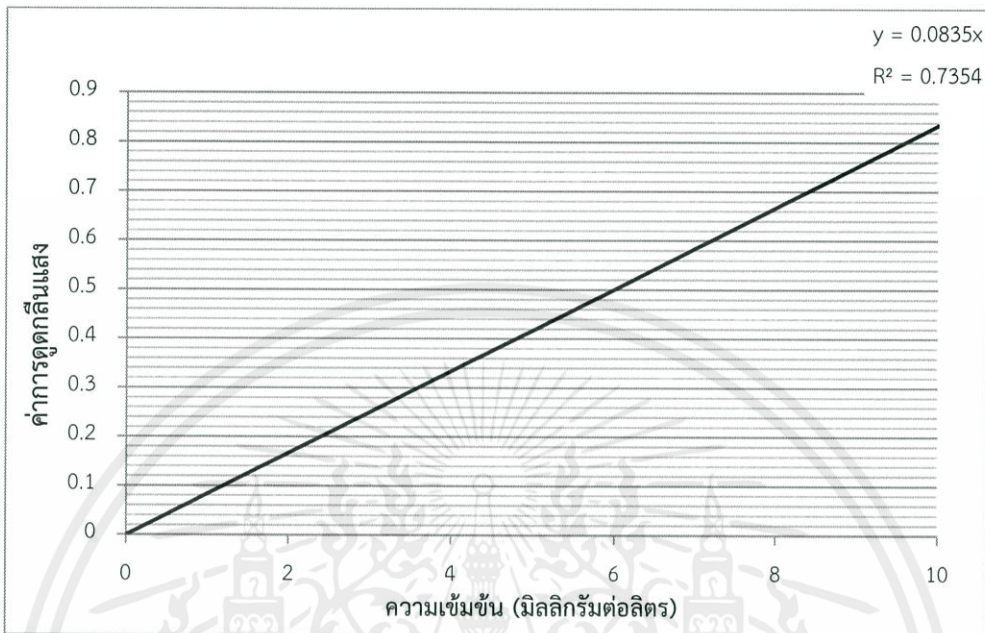
2. ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผ่านการกรองแล้วมา 3 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 1 นอร์มอล กรดซัลฟิวริก 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วเติม 1 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3. ปิเปตอะเซทิลอะซิโตน 5 มิลลิลิตรใส่ในสารละลายดังกล่าว จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจะได้สารละลายที่มีสีเหลืองใส

4. นำสารละลายสีเหลืองใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลผลการทดลอง



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

ตาราง ข-1 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis process)

เวลา (นาที)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800
15	0.088	340.4
30	0.021	81.2
45	0.020	77.4
60	0.019	73.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) กรณีใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>anatase 100%) ในการทำปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800
*5	0.003	11.6
*10	0.003	11.6
12	0.004	15.5
14	0.002	7.7
16	0.002	7.7
18	0.006	23.2

หมายเหตุ \*สภาวะการเร่งปฏิกิริยาแบบไร้แสง

ตาราง ข-3 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) กรณีใช้ริบบอนนาโนไททาเนตในการทำปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800
*5	0.013	50.3
*10	0.012	46.4
12	0.006	23.2
14	0.005	19.3
16	0.005	19.3
18	0.004	15.5

หมายเหตุ \*สภาวะการเร่งปฏิกิริยาแบบไร้แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-4 ผลของระยะเวลาการให้แสงกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) กรณีใช้ คอปเปอร์รีบอนนาโนไททาเนตในการทำปฏิกิริยาที่ สัตส่วนของคอปเปอร์(II)ต่างกัน

เวลา (นาท)	คอปเปอร์รีบอนนาโนไททาเนต (1% โดยน้ำหนัก)		คอปเปอร์รีบอนนาโนไททาเนต (5% โดยน้ำหนัก)		คอปเปอร์รีบอนนาโนไททาเนต (6.5% โดยน้ำหนัก)	
	Abs.	ความเข้มข้นหลัง บำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	0.205	800	0.205	800	0.205	800
*5	0.007	25.8	0.011	42.6	0.013	50.3
*10	0.006	23.2	0.008	30.9	0.011	42.6
12	0.004	15.5	0.006	23.2	0.022	85.1
14	0.004	15.5	0.007	27.1	0.018	69.6
16	0.003	9.7	0.006	23.2	0.015	58.0
18	0.002	7.7	0.006	23.2	0.010	38.7

หมายเหตุ \*สภาวะการเร่งปฏิกิริยาแบบไร้แสง

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณ

การคำนวณหาปริมาณคอปเปอร์(II)ไอออนที่สามารถแทรกตัวอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนตจากการทดลองด้วยการใช้ปริมาณคอปเปอร์(II)คลอไรด์คงที่ 1.71 กรัม ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนตที่ 0.21 กรัมและ 0.52 กรัม อ้างอิงวิธีการและสภาวะการสังเคราะห์จาก M. Vithal\* et al. (2556)

กำหนดให้ กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนต 0.21 กรัม เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา ก และ กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนต 0.52 กรัม เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา ข จากการทดลองนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองไปวิเคราะห์หาปริมาณคอปเปอร์ที่แทรกตัวอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่อง EDX ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ค.1

ตาราง ค-1 ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดภายในตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนต

สาร	ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	
	ก	ข
Copper(II) ( $\text{Cu}^{2+}$ )	8.48	7.68
Titanium (Ti)	44.91	47.31
Oxygen (O)	46.61	45.01

จากผลการทดลองเป็นปริมาณของธาตุแต่ละชนิดในกรณีสารมีปริมาณ 100 กรัม จึงต้องคำนวณหาปริมาณสารจริงเพื่อคำนวณหาปริมาณคอปเปอร์ที่แท้จริงในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาว่าค่าออกซิเจนในสารไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณของออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยาได้จาก

$$\frac{\text{น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)}}{\text{มวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา}} \times \text{มวลโมเลกุลของออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยา}$$

เมื่อ มวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาริบบอนนาโนไททาเนต  $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$  มีค่า 301.7

และ มวลโมเลกุลของออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า  $16 \times 7$  เท่ากับ 112

เมื่อคำนวณปริมาณออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยาได้แล้ว นำค่าดังกล่าวมาคำนวณปริมาณของสารจริงได้ด้วยการเทียบบัญญัติไตรยางค์

เมื่อ มีปริมาณออกซิเจน X กรัม ในสาร 100 กรัม

แล้ว มีปริมาณออกซิเจน Y กรัม ในสาร  $\frac{Y}{X} \times 100$  ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการคำนวณข้างต้นทำให้ได้ปริมาณสารที่แท้จริง สามารถคำนวณหาปริมาณคอปเปอร์ได้ด้วยวิธีเดียวกัน คือ

เมื่อ มีสาร 100 กรัม มีปริมาณคอปเปอร์ A กรัม

แล้ว มีสาร B กรัม มีปริมาณคอปเปอร์  $\frac{B}{100} \times A$

จากปริมาณคอปเปอร์ที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ที่หายไปได้ดังนี้

$$\frac{\text{ปริมาณคอปเปอร์ที่ใช้ (กรัม)} - \text{ปริมาณคอปเปอร์ในตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)}}{\text{ปริมาณคอปเปอร์ที่ใช้ (กรัม)}} \times 100$$

ผลการคำนวณแสดงดังตาราง ค.2

ตาราง ค-2 ผลการคำนวณค่าที่ใช้ในการหาปริมาณคอปเปอร์ในตัวเร่งปฏิกิริยา

	ตัวเร่งปฏิกิริยา ก	ตัวเร่งปฏิกิริยา ข
ปริมาณจริงของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.169	0.430
ปริมาณออกซิเจนในตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.078	0.193
ปริมาณคอปเปอร์ในตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.014	0.033
เปอร์เซ็นต์ของคอปเปอร์ที่หายไป	98%	95%

จากผลการคำนวณพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในสัดส่วนหนึ่งแล้ว ปริมาณของคอปเปอร์ที่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเพิ่มขึ้นในสัดส่วนเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าปริมาณคอปเปอร์ 0.014 กรัมเป็นปริมาณมากที่สุดที่สามารถแทรกตัวในตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.21 กรัม และในทำนองเดียวกันปริมาณคอปเปอร์ 0.033 กรัม เป็นปริมาณมากที่สุดที่สามารถแทรกตัวในตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.52 กรัม เช่นกัน

ซึ่งส่วนการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยารับอนนาโนไททาเนตนั้นเราใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 กรัม เพราะฉะนั้นปริมาณคอปเปอร์ที่สามารถแทรกตัวในตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณปริมาณ 0.21 กรัม คิดเป็นค่า 6.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้