



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การบำบัดน้ำเสียโดยการใช้ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของฟิล์มไทเทเนียมบางบนชิ้นงาน

สามมิติ

Wastewater Treatment by Photocatalysis of Titania Thin Film on 3D Substrates

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การบำบัดน้ำเสียโดยการใช้ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของฟิล์มไทเทเนียมบางบนชิ้นงาน

สามมิติ

Wastewater Treatment by Photocatalysis of Titania Thin Film on 3D Substrates

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรรค์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559-2560

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชื่อโครงการ** การบำบัดน้ำเสียโดยการใช้ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของฟิล์มไทเทเนียมบนชิ้นงานสามมิติ  
แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559-2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 2,313,300.00 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2559 ถึง 30 กันยายน พ.ศ.2561

**หัวหน้าโครงการ** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรรค์ สังกัด วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ผู้ร่วมโครงการวิจัย** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

### บทคัดย่อ

น้ำเสียเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประชาชน นอกจากจะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและทางกลิ่นแล้ว ยังอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพหากบริโภคน้ำที่มีเชื้อโรคหรือสิ่งปนเปื้อนไปในพื้นที่ปนเปื้อนในน้ำและน้ำเสียประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และเชื้อโรค กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ เนื่องจากสารอินทรีย์บางชนิดมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีและสารอินทรีย์บางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นนำสารโฟโตคะตะลิสต์ (photocatalyst) ที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดในด้านสิ่งแวดล้อม คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือไทเทเนียม หรือ  $TiO_2$  มาเคลือบลงบนชิ้นงานสามมิติเพื่อเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface to volume ratio) และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน โดยใช้กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน (Pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition (PP-MOCVD)) ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของฟิล์มบนชิ้นงานมากที่สุด คืออุณหภูมิ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ในช่วงแรก จึงมุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้คุณสมบัติของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงบนชิ้นงานสองมิติจากเหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิที่ใช้คือ 350, 370 และ 400°C ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เคลือบ มีโครงสร้างเป็นกลีบ (petal-like) ที่อุณหภูมิ 350°C และเป็นโครงสร้างเป็นทรงกลมที่อุณหภูมิ 400°C เฟส (phase) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้พบว่าเป็นอนาเทส มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและพบว่าคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดีที่สุดที่อุณหภูมิ 370°C

**คำสำคัญ :** ไทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โฟโตคะตะไลซิส กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน มุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Wastewater Treatment by Photocatalysis of Titania Thin Film on 3D Substrates

**Researchers:**

Assistant Professor Dr. Vilailuck Siriwongrungson, College of Advanced Manufacturing Innovation,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Assistant Professor Dr. Siriluk Chumchean, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering,  
Mahanakorn University of Technology

**ABSTRACT**

Wastewater is an important environmental problem that affects people. It not only causes water and odor pollutions, but also may cause health impacts if contaminated water was consumed. Contaminants in water and wastewater are organic compounds, inorganic compounds and pathogens. Conventional wastewater treatments are not effective enough because certain organic compounds are soluble and certain inorganic compounds are toxic to bacteria used in the wastewater treatment process. Therefore, there are research to apply photocatalysis in wastewater treatment. This research focuses on applying the most well-known catalyst in environment field, titanium dioxide or Titania or  $\text{TiO}_2$  to be coated on 3D substrates to increase the surface to volume ratio and can be recycle easier compared with the current titanium dioxide power used nowadays. The thin film coating technology applied is pulsed-pressure chemical vapor deposition (PP-MOCVD). From the previous research, the most influence parameter on the conformality of thin film is the temperature. As a result, in this first 2 years of research, the influence of temperature on the photocatalytic activity on 2D stainless steel substrate. The deposition temperature varied are 350, 370 and 400°C. It was found that the deposited films have petal-like structure at the temperature of 350°C and round structure at the deposition temperature of 400°C. The phase of the deposited titanium dioxide is anatase. The wettability tends to increase with the deposition temperature whereas the photocatalytic activity was maximum at the deposition temperature of 370°C.

**Keywords :** titanium dioxide, photocatalysis, pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition, contact angle

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้คำแนะนำปรึกษาเบื้องต้นในการทำวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. สมยศ เกียรติวนิชวิไล ขณะนั้นดำรงตำแหน่งรองคณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณคณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราชศักดิ์ สักदानุภาพ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิมล มรรคเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพล ภคศิริ, นางสาวพิมภาภรณ์ มั่นพิริยะกุล, นางสาวภวรรณตรี บ่อไทย, นางสาววินิตา นพรัตน์, นางจินตนา ทิพย์จักรภูรัตน์ และนายพิจิตร คชชา

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานบริหารงานวิจัย และเจ้าหน้าที่พัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนด้านเอกสารและการจัดซื้อจัดจ้างครุภัณฑ์ให้ เป็นไปด้วยความเรียบร้อย

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559-2560 สัญญาเลขที่ A118-0260-078

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 คำสำคัญของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง.....	12
3.2 ปัจจัยที่แปรเปลี่ยน.....	14
3.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบางและปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง.....	14
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	17
4.1 พื้นผิวและโครงสร้าง.....	17
4.2 เฟส.....	17
4.3 มุมสัมผัส.....	18
4.4 คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแผนการวิจัยต่อยอด</b> .....	21
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	21
5.2 แผนการวิจัยต่อยอด.....	21
<b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย</b> .....	22
6.1 รายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้.....	22
6.2 รายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่อยู่ระหว่างดำเนินการ.....	22
<b>เอกสารอ้างอิง</b> .....	23
<b>ภาคผนวก</b> .....	26
ภาคผนวก ก ผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้.....	26
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	33
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	37
หัวหน้าโครงการ.....	37
ที่ปรึกษาโครงการ.....	39

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 มุมสัมผัสที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	18
4.2 การดูดซับของเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่ 664 นาโนเมตร.....	19



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์คือ รูไทล์ (1) อนาเทส (2) และบรูคไคต์ (3).....	7
2.2 มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิว.....	8
3.1 แบบจำลองกระบวนการเคลือบด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน.....	13
4.1 พื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบที่อุณหภูมิ 350 (ซ้าย) 370 (กลาง) และ 400 (ขวา) องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า.....	17
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ.....	18
4.3 การดูดซับของเมทิลีนบลูหลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 120 นาที.....	19



# บทที่ 1

## บทนำ

รายงานการวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็นหกบท คือ บทนำ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย สรุปผลการวิจัยและแผนการวิจัยต่อยอด และสรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย โดยในบทนำนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย คำสำคัญของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสี่ยังคงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประชาชน นอกจากจะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและทางกลิ่นแล้ว ยังอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพหากบริโภคน้ำที่มีเชื้อโรค สิ่งปนเปื้อนในน้ำ และน้ำเสี่ยังประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และเชื้อโรค สารอินทรีย์ เช่น กลุ่มคลอโรเบนซิน กลุ่มพีนอล กลุ่มสารระเหยจำพวกฮาโลเจนเต็ดไฮโดรคาร์บอน และกลุ่มของโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น สารอนินทรีย์คือพวกโลหะหนักต่างๆ เช่นปรอท แคดเมียม โครเมียม แมงกานีส ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง เป็นต้น เชื้อโรค เช่น อี. โคไล (*Escherichia Coli*) แซคคาโรไมซิส (*Saccharomyces Cerevisiae*) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (*Fecal Coliforms*) เป็นต้น เนื่องจากสารอินทรีย์บางชนิดมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี สารอนินทรีย์บางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ สิ่งเหล่านี้ทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสี่ยแบบธรรมดามีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียนอกจากการกรองและการดูดซับกลิ่นด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ได้แก่ การใช้ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการทำอิเล็กโทรไดอะลิซิส (electrodialysis) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหรือโฟโตคะตะลิสต์ (photocatalysis) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสี่ย เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า และเหมาะสมกับประเทศไทย ที่มีแสงอาทิตย์อย่างเพียงพอ สารกึ่งตัวนำที่เป็นที่รู้จักว่าเป็นโฟโตคะตะลิสต์ (photocatalyst) ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$  และ  $\text{WO}_3$  [1] โฟโตคะตะลิสต์ที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในด้านสิ่งแวดล้อมคือไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียมหรือ  $\text{TiO}_2$  เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ เช่น ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ไม่ละลายน้ำ เกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีมีความเสถียรทางเคมี และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [2]

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติมาเป็นเวลานานและมีการประยุกต์ใช้งานในการบำบัดของเสียด้านต่างๆ ซึ่งปัจจุบัน  $\text{TiO}_2$  ที่ขายในท้องตลาดมีลักษณะเป็นผงขนาดนาโนและนิยมใช้ในสภาพแขวนลอย ซึ่งมีข้อดีคือเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก อย่างไรก็ตามภายหลังจากขบวนการบำบัดน้ำเสี่ยจำเป็นต้องแยกผง  $\text{TiO}_2$  เหล่านี้ออก เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดฟิล์มติดอยู่ที่

ภาชนะซึ่งยากในการขจัดออกได้จึงได้มีการศึกษาวิจัยการเคลือบฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  บนพื้นผิวเรียบสองมิติด้วยวิธีโซลเจล (Sol-gel) ซึ่งให้การยึดเกาะและความโปร่งแสงที่ดีกว่าการยัดผง  $\text{TiO}_2$  บนพื้นผิวเรียบ อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมข้อมลพิษของ  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมด้วยวิธีการโซลเจลนั้นต่ำกว่า  $\text{TiO}_2$  ที่ขายในท้องตลาด (Degussa P25) เนื่องจากพื้นที่ผิวที่น้อยกว่า [1] ทางหนึ่งในการเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface to volume ratio) คือ การเคลือบผิว โครงสร้างซับซ้อนสามมิติหรือแผ่นตัวกรองด้วย  $\text{TiO}_2$  ซึ่งจะทำให้การนำ  $\text{TiO}_2$  กลับมาใช้ใหม่ภายหลังการบำบัดทำได้ง่ายขึ้นและยังคงประสิทธิภาพหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่เพิ่มขึ้น กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการ Pulsed-Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition (PP-MOCVD) ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรผ่านทางชิ้นงานสามมิตินอกจากเหนือจากโครงสร้างและความพรุนของตัวฟิล์มเอง ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ทำจากโซลเจล ทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดนาโน Degussa 25 อีกทั้งต้นทุนในการเคลือบฟิล์มบนตัวอย่างสามมิตินั้นมีต้นทุนและใช้เวลาดำกว่าวิธีอื่นที่สามารถเคลือบชิ้นงานสามมิติได้ เช่น วิธีการ Atomic Layer Deposition (ALD)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยแบ่งออกได้เป็น 6 ข้อ ซึ่งคาดว่าจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบนชิ้นงานทั้งสองและสามมิติและราคากับวิธีการเคลือบอื่น รวมถึงความเป็นไปได้ในการต่อยอดงานวิจัยในแง่ของการโคป  $\text{TiO}_2$  ด้วยโลหะบนหรือพร้อมสารกึ่งตัวนำอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ในรายงานฉบับสมบูรณ์เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น

1. ประยุกต์ใช้วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างซับซ้อนบนชิ้นงานสามมิติหรือตัวกรองด้วย  $\text{TiO}_2$  โดยมุ่งประโยชน์ในการใช้ฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  ที่ได้จากการเคลือบด้วยวิธีดังกล่าวในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรคในน้ำเสียจากแหล่งน้ำต่างๆ
2. พัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบในรูปของชิ้นงานสามมิติที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมบางที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรค ให้มีขนาดหรือพื้นที่ผิวและต้นทุนที่คาดว่าจะเหมาะสมในเบื้องต้น
3. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสามมิติกับ Degussa P25 ในรูปผง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลด้านราคาเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบด้านราคากับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ
4. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสามมิติกับสองมิติทั้งที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี PP-MOCVD และจากบทความทางวิชาการที่ใช้วิธีการโซลเจล

5. ศึกษากลไกการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาดำแสงของ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสามมิติหรือตัวกรอง
6. ศึกษาความเป็นไปได้ในการโคป  $\text{TiO}_2$  ด้วยโลหะหรือเกลือ  $\text{TiO}_2$  บนหรือพร้อมสารกึ่งตัวนำอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาดำแสง

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัย เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์และเชื้อโรคในน้ำเสียให้สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อย่างปลอดภัย สารอินทรีย์และเชื้อโรคที่จะทำการศึกษา ได้แก่ เมทิลีนบลู (Methylene Blue) ในอุตสาหกรรมการย้อมและยา ทั้งเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณออกซิเจนในน้ำ, อี. โคลิที่มักปนเปื้อนมากับน้ำหรืออาหาร ทำให้เกิดอาการท้องเสีย, และฟิวแรน (Furans) ที่มักปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำจากการผลิตกระดาษและเยื่อ การฟอกย้อมเตาเผาขยะและอื่นๆ ซึ่งเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์

โดยต้นทุนการผลิตชิ้นงานสามมิติหรือตัวกรองที่เคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  และประสิทธิภาพที่ได้จากการทำวิจัยควรมีต้นทุนที่ต่ำกว่าและประสิทธิภาพที่เทียบหรือสูงกว่า Degussa P25 เมื่อเปรียบเทียบกับในเชิงปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ต่อต้นทุน รวมถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ และประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียคิดเป็นความเร็วหรือปริมาณที่ใช้ต่อหน่วย

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ การเตรียมงานวิจัย วิจัย และเผยแพร่ความรู้

1.4.1 การเตรียมงานวิจัย เป็นเป็นการเตรียมความพร้อมในการทำวิจัยในด้านต่างๆ เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ของการวิจัยที่ตั้งไว้ ซึ่งมีดังนี้

1. ทบทวนบทความทางวิชาการ เพื่อนำไปต่อยอดความรู้ที่มีผู้ได้ศึกษามาแล้ว เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย
2. จัดซื้ออุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัยและติดตั้งอุปกรณ์ในการเคลือบฟิล์มบางที่จะใช้ใน งานวิจัย ซึ่งจะจัดทำขึ้นที่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำแสงของไทเทเนียมในด้านองค์ประกอบของเฟส และพื้นผิวของฟิล์ม โดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วบนตัวอย่าง 2 มิติเปรียบเทียบกับ Degussa P25 เป็น การศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาดำแสงและการเปียกน้ำของฟิล์มในเบื้องต้น โดยใช้ อุปกรณ์การวิเคราะห์ที่มีอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดย เสียค่าใช้จ่ายตามกำหนด

1.4.2 วิจัย เป็นการวิจัยเพื่อบรรลุจุดประสงค์ของการวิจัยที่ตั้งไว้ และได้ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิชาการ การสนับสนุนนโยบาย การจดสิทธิบัตร และการเผยแพร่ความรู้ มีดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติ เฟส และความสม่ำเสมอของ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสามมิติหรือตัวกรอง โดยอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากการเตรียมงานวิจัย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Degussa P25 และ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสองมิติจากบทความทางวิชาการ โดยใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งขึ้นในช่วงเตรียมงานวิจัยและการวิเคราะห์ที่มีอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเสียค่าใช้จ่ายตามกำหนด
2. ศึกษากลไกการทำงานของเครื่องปฏิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  บนชิ้นงานสามมิติหรือตัวกรอง เพื่อทำการปรับปรุงข้อบกพร่อง (ถ้ามี) โดยใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งขึ้นในช่วงเตรียมงานวิจัยและโปรแกรมที่มีอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเสียค่าใช้จ่ายตามกำหนด
3. ทดสอบชิ้นงานที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วในรูปของผลิตภัณฑ์ต้นแบบในการกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรคที่เป็นตัวอย่างในการศึกษาตามขอบเขตของการศึกษา ได้แก่ เมทิลีนลู อี. โคลไล และฟูแรน พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Degussa P25 และปรับปรุงข้อบกพร่อง (ถ้ามี) และคำนวณต้นทุนเปรียบเทียบโดยใช้วิธีการทางสถิติ

#### 1.4.3 เผยแพร่ความรู้ ผ่านผลงานวิจัยเผยแพร่สู่ผู้สนใจ

### 1.5 คำสำคัญของการวิจัย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โฟโตคะตะไลซิส การระเหยด้วยไอของสารเคมีแบบช่วงความดัน มุมสัมผัส

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำผลงานวิจัยที่ได้ไปพัฒนาปรับปรุงให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งคาดว่าจะมีต้นทุนต่ำกว่ากระบวนการที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ผลิตบุคคลากรที่มีความสามารถในการทำวิจัย

เผยแพร่ความรู้ผ่านผลงานตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทนี้ จะเกี่ยวข้องกับ วัสดุที่ทำการศึกษา คือไทเทเนียมไดออกไซด์ มุมสัมผัส และปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

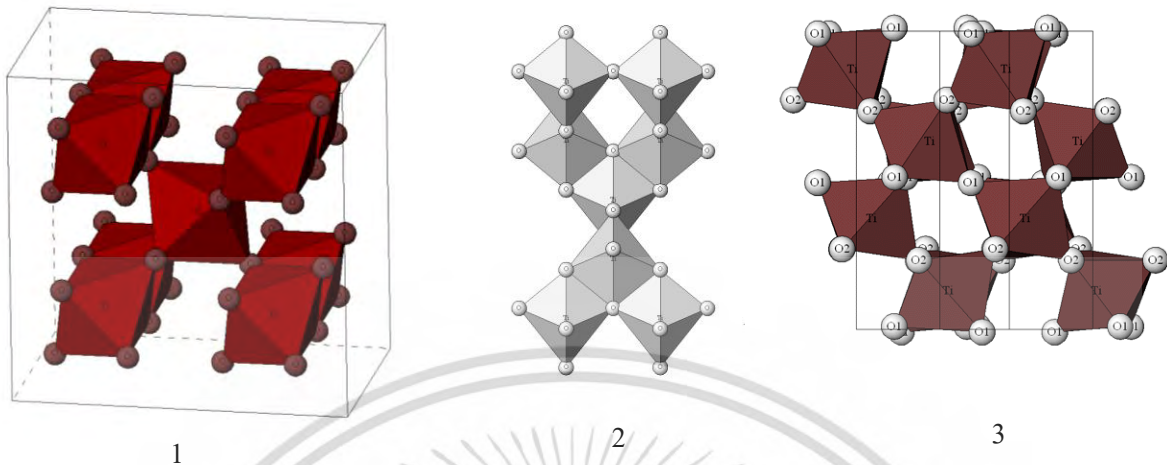
##### 2.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือไทเทเนีย หรือ  $TiO_2$  โดยทั่วไปมีสีขาว ทึบแสง เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติที่เป็นประโยชน์ที่ได้อีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากมีค่าครชนิการหักเหของแสงสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้การที่ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ(ไม่ใช้แสง) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ( $NO_x$ ) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการ Fischer Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงรวมเนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงรวมทั้งที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่

จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบ ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบแสดงดังภาพที่ 2.1 คือรูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และบรูคไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยโครงสร้างทั่วไปจะเหมือนกัน คือประกอบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ออกตะไฮดรอล ( $\text{TiO}_6^{2-}$ ) ที่ช่องว่างของออกตะไฮดรอลของออกไซด์ไอออนจะมีไอออน ( $\text{TiO}^{4+}$ ) อยู่แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกอนาเทสและรูไทล์จะมีการเชื่อมกันของไทเทเนียมกับออกซิเจนต่างกัน ทำให้มีผลต่อการสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือการใช้ร่วมกันที่ขอบมุมซึ่งรูไทล์มีการเชื่อมกันที่ขอบและมุม ขอบทั้งสองของออกตะไฮดรอลอยู่ในลักษณะตรงข้ามกันและเชื่อมกันผ่านออกซิเจน ส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสจะไม่มีการใช้ร่วมกันที่มุมแต่ขอบทั้งสองใช้ร่วมกันต่อหนึ่งออกตะไฮดรอล ทั้ง 2 รูปแบบมีไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์อยู่กับสารปนเปื้อน ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีจึงจะสามารถนำสารปนเปื้อนออกได้ ให้เหลือแค่ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

อนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะไลสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเป็นคู่กัน เช่นในระบบของ  $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$  ส่งผลให้มีการแยกของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกจากการเหนี่ยวนำ (Photo induced electron-hole pair) และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ  $\text{SnO}_2$  ให้มากขึ้นทำให้เฟสอนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง  $\text{SnO}_2$  จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงที่ดีขึ้นด้วย



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ รูไทล์ (1) อนาเทส (2) และบรูคไคต์ (3) [3]

### 2.1.2 มุมสัมผัส

มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง โดยจะทำรูปและมุม  $\theta$  กับพื้นที่ผิวของแข็ง ดังภาพที่ 2.2 มุมสัมผัสที่สมดุลจะวัดความสามารถในการเปียกของแข็งโดยของเหลวหรือเรียกว่า ปรากฏการณ์การโค้งงอของผิวของเหลว มุมสัมผัสจะมีค่าตั้งแต่  $0 - 180$  องศา เมื่อของเหลวอยู่บนผิวของแข็งจะอยู่ในสภาพเป็นหยด ไม่ทำให้พื้นผิวเปียกโดยพิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง  $0 - 90$  องศา ของเหลวจะแผ่กระจายเปียกไปยังพื้น หมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และ ของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมระหว่าง  $90 - 180$  องศา ของเหลวจะเป็นก้อนและไม่เปียกพื้น หมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

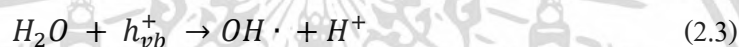
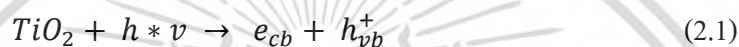


มุมสัมผัส	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่างชนิด	ดี	แย
ความสามารถในการเปียก	ดี	แย

ภาพที่ 2.2 มุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิว

### 2.1.3 ปฏิริยาการเร่งด้วยแสง

ปฏิริยาการเร่งด้วยแสงถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของสารกึ่งตัวนำ หลักการเกิดปฏิริยาด้วยแสงคือเมื่อวัสดุโฟโตแคตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่า ทำให้อิเล็กตรอนในแถบช่องว่าง (valence) ถูกกระตุ้นและจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำทำให้แถบช่องว่างเกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH \cdot$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ เรดิคัลแอนไอออน ( $O_2^-$ ) ดังแสดงในสมการ (2.1) - (2.3) โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะลิสต์



ปฏิริยาการเร่งด้วยแสงปกติจะต้องใช้แสงอาทิตย์หรือแสงที่ความยาวคลื่นใกล้ยูวี คือต่ำกว่า 400 นาโนเมตร [4-6] สารเร่งปฏิริยาด้วยแสง ในที่นี้คือสารกึ่งตัวนำ  $TiO_2$  ซึ่งเมื่อได้ดูดซับรังสียูวีจะทำให้อิเล็กตรอน (electron) หลุดไปเกิดโฮล (hole) ซึ่งมีประจุบวกขึ้น โฮลจะเกิดปฏิริยากับน้ำที่ถูกดูดซับเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radicals,  $OH \cdot$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง และอิเล็กตรอนจะทำปฏิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide Anion,  $O_2^-$ ) โดยไฮโดรเจนในสารอินทรีย์จะทำปฏิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลที่อยู่ใกล้พื้นผิวของ  $TiO_2$  เกิดเป็นน้ำ ( $H_2O$ ) ในขณะที่แอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) [6] ทั้งนี้การเกิด  $OH \cdot$  และ  $O_2^-$  จำเป็นต้องใช้สารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) มากกว่า 3 eV ซึ่ง  $TiO_2$  ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) เป็นสารเร่งปฏิริยาด้วยแสงที่เหมาะสมเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV [4] นอกจากนี้พื้นที่ผิวสัมผัสของสารเร่งปฏิริยาด้วยแสงยังมีบทบาทสำคัญในการช่วยในการเกิดการเร่งปฏิริยาด้วยแสงให้เร็วขึ้น [10] นอกเหนือไปจากโครงสร้างผลึก เช่น เฟส ขนาด ความพรุน ความสม่ำเสมอ และขนาดรูของ ความพรุน การกระตุ้นด้วยแอนไอออนหรือแคทไอออน การปรับเปลี่ยนพื้นผิวด้วยโลหะและสารกึ่งตัวนำ เช่น แพลตทินัม ทอง เงิน แคดเมียมซัลไฟด์ [7,8]

ปฏิริยาการเร่งด้วยแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิริยาด้วยแสง

1. ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงแบบเนื้อเดียว (Homogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
2. ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงแบบต่างสถานะ (Heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ได้แก่

1. ความเข้มของแสง (Light intensity) การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst dosage) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงเพิ่มขึ้น
3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ซึ่งจะลดลงทั้งนี้อาจสามารถสรุปได้ในหลายๆ เหตุผล นั่นคือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินทรีย์มีเคียดเพิ่มขึ้นซึ่งสารพวกนี้จะเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย
4. ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆจะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่งซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงตัวหนึ่งตามปกติแล้วออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แบบและไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงแบบออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนจนได้บทสรุปว่า

ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงการลดลงของความเป็นกรด-ด่างในปฏิกิริยาอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 สาเหตุ คือ จากการลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออน เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับ โสลเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง และ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงแบบออกซิเดชัน แต่ก็เป็นการยากที่จะสรุปรวมกว่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงอย่างเห็นได้ชัดแต่บางสารประกอบก็มีผลน้อยมาก
- อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนบางตัวก็อาจจะถูกดูดติดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ได้ ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้จึงถือเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาดังนั้นไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดน้ำเสียในชุมชนปัจจุบันนี้ใช้ระบบบ่อฝังมากที่สุดและเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำที่สุด รองลงมาคือเอส (Activated Sludge) แบบต่างๆ ซึ่งมีต้นทุนสูงที่สุด และยังมี การกำจัดน้ำเสียด้วยบ่อเติมอากาศ และแผ่นหมุนชีวภาพ เวลาที่ต้องใช้ในการกักเก็บน้ำเพื่อบำบัดนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการและคุณภาพของน้ำที่ได้ เวลาที่น้อยที่สุดคือประมาณ 3-5 ชั่วโมง บ่อที่ใช้แบคทีเรียในการบำบัดอาจมีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นถ้าปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไป ท่อระบายน้ำอาจส่งกลิ่นและเกิดปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซไข่เน่าในน้ำเสีย เนื่องจากความเร็วในท่อไม่เพียงพอ วิธีบำบัดน้ำที่ใช้เวลาน้อยที่สุดคือการเติมคลอรีน ใช้เวลา 15-30 นาที ซึ่งต้องควบคุมปริมาณให้เหมาะสม [6, 14-15] การเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงโดยใช้สารกึ่งตัวนำ  $TiO_2$  จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมากอีกทางหนึ่ง เพราะสามารถช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในน้ำที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ได้อีกด้วย [7,9-12]

จากการศึกษารูพรุนเฉลี่ยเฟส และการใช้สารกระตุ้น (dopant) ปัจจัยที่มีผลในการศึกษาประสิทธิภาพ ได้แก่ ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ชนิดของสารปนเปื้อน ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน และความเข้มของแสง  $TiO_2$  ในทางการค้า, Degussa P25, มีสัดส่วนของเฟสออสถุฐาน (Amorphous) อนาเทสและรูไทล์ประมาณ 4 ต่อ 1 ซึ่งอาจส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงที่ดีมาก [4] Choi et al. ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างของ  $TiO_2$  และการเพิ่มประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงบนเชื้อตัวกรองไทเทเนียม/อลูมินาในการบำบัดน้ำด้วยวิธีการ โสลเจลโดยการเติมกรดอะซิติกเพื่อควบคุมโครงสร้างในระดับนาโน

ซึ่งพบว่า  $\text{TiO}_2$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3-7 นาโนเมตร สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเช่น สารซอร์บิ เมทิลีนบลู ครีเอตินิน ไมโครซีสทิน-แอลอาร์ และยับยั้งอี. โคลไลได้ [7] Agrios and Pichat ได้ทำการสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  ที่มีทั้งอนาเทสและรูไทล์อยู่ด้วยกัน โดยใช้วิธีการโซลเจลเช่นกันโดยการเติมกรดซัลฟูริกพบว่าที่อนาเทส 0.5 wt% มีประสิทธิภาพในการกำจัดอะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ดีกว่า Degussa P25 35% และมีความสนใจมากขึ้นในการสังเคราะห์บรูคไลท์ (Brookite) ซึ่งเป็นอีกเฟสหนึ่งของ  $\text{TiO}_2$  อีกด้วย [5] Konishi et al. ได้ทำการศึกษาโครงสร้างแบบโมนอลิธ (monolith) ด้วยวิธีโซลเจลโดยใช้โพลี (เอทิลีนออกไซด์) (poly (ethylene oxide) และเอน-เมทิลฟอร์มาไมด์ (N-methylformamide) และการอบด้วยความร้อน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้มีการไหลผ่านที่ดีกว่าเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบซับซ้อนและเหมาะกับการใช้ในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม [13-14] Yu et al. ได้เตรียม  $\text{TiO}_2$  ที่มีรูพรุนจากการเผา (Calcination) เติตระบิวทิวไททาเนต (tetrabutyl titanate) ในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสได้ประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสูงสุด [15] Duminica et al. ได้ใช้ Atmospheric Metalorganic Chemical Vapor Deposition (AP-MOCVD) ที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียสในการสังเคราะห์ฟิล์มบางบนตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium Tetraisopropoxide, TTIP) เพื่อนำคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ [16] Evan et al. ได้ใช้ APCVD ในการสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  บนเหล็กกล้าไร้สนิมเช่นกัน โดยใช้ TTIP และไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) ซึ่งพบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติในการยับยั้งอี. โคลไลได้ [17] Tian et al. สังเคราะห์โครงสร้างคล้ายดอกไม้ (flower-like) ของ  $\text{TiO}_2$  ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) และการเผา ซึ่งเป็นโครงสร้าง 3 มิติที่พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อเปรียบเทียบกับ Degussa P25 [18] ซึ่งจะเห็นว่ามี ความพยายามในการเพิ่มรูพรุนหรือพื้นที่ผิวของ  $\text{TiO}_2$  เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงทางหนึ่ง

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธี Pulsed Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition (PP-MOCVD) ได้รับการศึกษาว่าสามารถเคลือบผิวชิ้นงานสามมิติที่ซับซ้อนได้ด้วยต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำและใช้เวลาไม่นาน [19] Siriwongrungson et al. ได้ทำการศึกษาการเคลือบฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  อย่างสม่ำเสมอโดยใช้ TTIP บนชิ้นงานซิลิคอน [20-22] แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีทั้งอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ นอกจากนี้ Krumdieck et al. ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) และ  $\text{TiO}_2$  บนโลหะผสม  $\text{Ti6Al4V}$  พบว่า  $\text{TiO}_2$  ที่ได้มีความสม่ำเสมอ และต้องศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟต [23] วิธีการเคลือบฟิล์มนี้ยังสามารถใช้ได้กับวัสดุอื่น เช่น เซอร์โคเนีย (Zirconia) [24] ความหลากหลายของวัสดุที่เคลือบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกระตุ้นด้วยสารกึ่งตัวนำอื่นๆ ซึ่งโครงการวิจัยนี้จะได้นำวิธีการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี PP-

MOCVD มาใช้ในการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมบนตัวอย่างสามมิติเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของไทเทเนียมผ่านการเพิ่มพื้นที่สัมผัส เฟส ความพรุนและโครงสร้างของผลึก

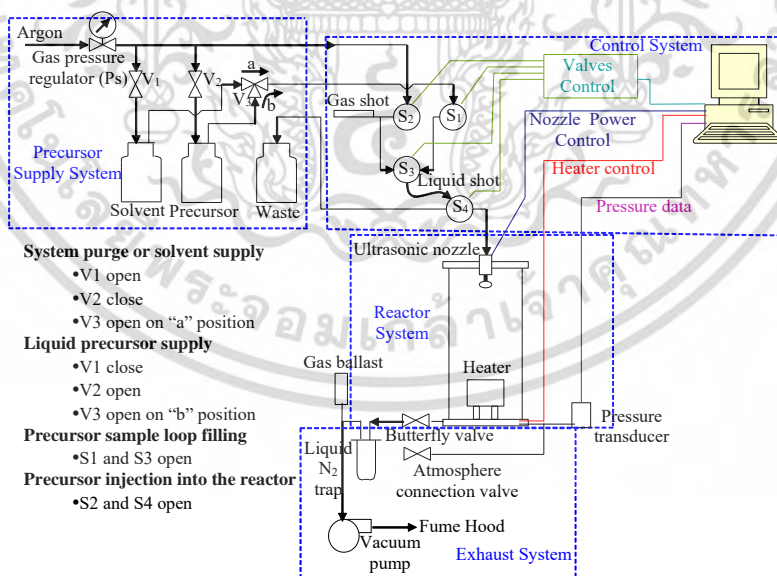


### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการวิจัยจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน (Pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition (PP-MOCVD)) ปัจจัยที่แปรเปลี่ยน และการวิเคราะห์ฟิล์มบางและปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง

#### 3.1 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง

เครื่องเคลือบฟิล์มบางที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือกระบวนการการเคลือบด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน (Pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition (PP-MOCVD)) ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มที่สามารถเคลือบชิ้นงานสามมิติได้ หลักการคือการฉีดสารตั้งต้นผ่านหัวฉีดเข้าไปในห้องเคลือบความดันต่ำ สารตั้งต้นที่มีอนุภาคเป็นฝอยจากหัวฉีดจะแตกตัวละตกลงบนชิ้นงานที่ถูกทำให้ร้อน ทำให้เกิดฟิล์มเคลือบลงบนชิ้นงาน การป้อนสารตั้งต้นจะกระทำเป็นช่วง เพื่อให้การเกิดฟิล์มบนชิ้นงานสามมิติเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และอยู่ในช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของชิ้นงานเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุด ช้ากว่าการถ่ายเทสารตั้งต้นไปยังพื้นผิว โดยเครื่องเคลือบฟิล์มบาง PP-MOCVD สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนหลักคือ ระบบป้อนสารตั้งต้น ห้องเคลือบ ระบบระบาย และระบบควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองกระบวนการเคลือบด้วยไอสารละลายโลหะอินทรีย์แบบช่วงความดัน [22]

### 3.1.1 ระบบป้อนสารตั้งต้น (Precursor supply system)

สารตั้งต้นของเหลวที่ได้เตรียมไว้จะถูกป้อนเข้าห้องเคลือบผ่านวาล์วสามทางซึ่งควบคุมสารตั้งต้นและตัวทำละลายผ่านโซลินอยด์วาล์ว โดยการใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวพา โดยจะประกอบไปด้วยขวด 3 ขวด คือ ขวดสารตั้งต้น ขวดตัวทำละลาย และขวดรับสารทิ้ง

### 3.1.2 ห้องเคลือบ (Reactor system)

ห้องเคลือบของ PP-MOCVD เป็นแบบผนังเย็น (cold wall) คือมีเพียงชิ้นงานที่ถูกทำให้ร้อนผ่านตัวทำความร้อน (heater) สารตั้งต้นจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดที่อยู่ด้านบนของห้องเคลือบที่อยู่ภายใต้สภาวะความดันต่ำ ด้านล่างเชื่อมต่อกับระบบระบาย แผลงจ่ายไฟความร้อน เครื่องวัดความดันและวาล์วระบายอากาศ รวมถึงเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ที่ใช้วัดอุณหภูมิของชิ้นงานหรือฐานรองรับชิ้นงาน

### 3.1.3 ระบบระบาย (Exhaust system)

ระบบระบายใช้ลดความดันภายในห้องเคลือบ ประกอบไปด้วยตัวกรองไนโตรเจนเหลว และปั๊มสุญญากาศเป็นหลัก ตัวกรองไนโตรเจนเหลวใช้เพื่อกรองปริมาณสารปนเปื้อนและตัวทำละลายที่ตกค้างมิให้เข้าสู่ปั๊มสุญญากาศจนเกิดความเสียหายได้

### 3.1.4 ระบบควบคุม (Control system)

ใช้ในการควบคุมระบบป้อนสารตั้งต้น และห้องเคลือบผ่านกล่องควบคุม โดยควบคุมการเปิดปิดของวาล์วที่ป้อนสารตั้งต้น การเปิดปิดของหัวฉีด อุณหภูมิของชิ้นงานหรือฐานรองรับชิ้นงาน ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกความดันที่เปลี่ยนแปลงไป กล่องควบคุมอุณหภูมิและวาล์ว และกล่องควบคุมหัวฉีด

## 3.2 ปัจจัยที่แปรเปลี่ยน

ปัจจัยที่แปรเปลี่ยนในการศึกษาในรายงานฉบับสมบูรณ์นี้คืออุณหภูมิของชิ้นงาน คือที่ 350, 370 และ 400°C โดยปัจจัยอื่นจะคงที่ ได้แก่ ปริมาณสารตั้งต้นที่ป้อน ความดันในห้องเคลือบ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น และระยะเวลาระหว่างช่วงความดัน

## 3.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบางและปฏิบัติการเร่งด้วยแสง

ฟิล์มบางที่เคลือบได้จะถูกนำมาวิเคราะห์พื้นผิวและโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์เฟสของฟิล์มที่เคลือบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน วัดความเป็ยกดของเหลวด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส และวัดปฏิบัติการเร่งด้วยแสงด้วยเครื่องวัดสารด้วยการดูคลื่นแสง

### 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope (FESEM))

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ คือ รุ่น JSM-7001F เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มี resolution

สูงถึง 1.2 nm ที่ 30 kV เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์กายภาพ ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ Sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ Diffusion pump มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer , EDS) ซึ่งในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้

### 3.3.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer (XRD))

ผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน Rigaku รุ่น SmartLab ในการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งเทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้

### 3.3.3 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle measurement)

การวัดมุมสัมผัสกระทำโดยการหยดน้ำปริมาณ 1 ไมโครลิตรลงบนผิวของชิ้นงาน แล้วถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิทัล YHDO รุ่น YH-313 และใช้โปรแกรม ImageJ หรือใกล้เคียงในการวิเคราะห์มุมสัมผัส

### 3.3.4 เครื่องวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

ท้ายสุดฟิล์มบางจะถูกนำมาวัดการดูดกลืนแสง ผ่านสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ได้นำชิ้นงานตัวอย่างไปใช้ทดสอบในการกำจัดสี โดยการวัดสารด้วยการดูดกลืนแสงใช้เครื่อง PG INSTRUMENTS T92+ UV Spectrophotometer โดยเครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV – Vis spectrophotometer โดยทั่วไปแล้ว จะมีส่วนประกอบหลักๆที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและเครื่องตรวจทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความ

เข้มขันสีเมทิลินบล เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงยูวี (310 – 400 นาโนเมตร) โดยเลือกความยาวคลื่น 644 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เมทิลินบลสามารถดูดกลืนได้



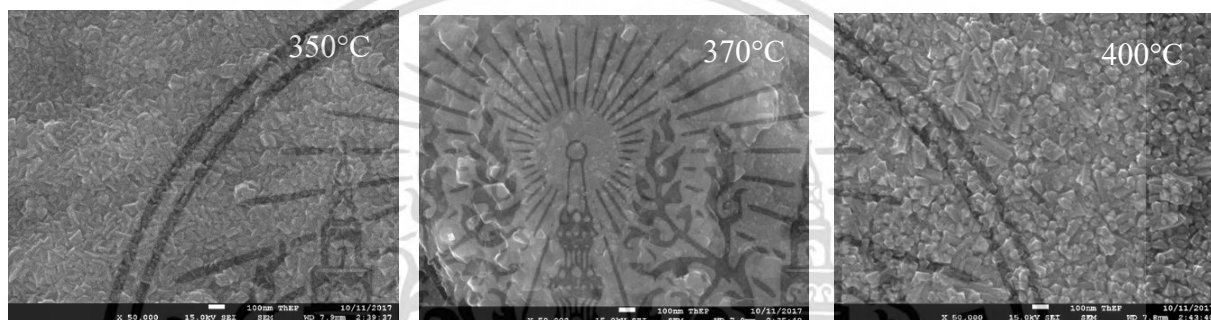
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย พื้นผิวและ โครงสร้าง เฟส มุมสัมผัส และ คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์มที่เคลือบ ได้บนชิ้นงานสองมิติ

#### 4.1 พื้นผิวและโครงสร้าง

พื้นผิวและ โครงสร้างของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 4.1

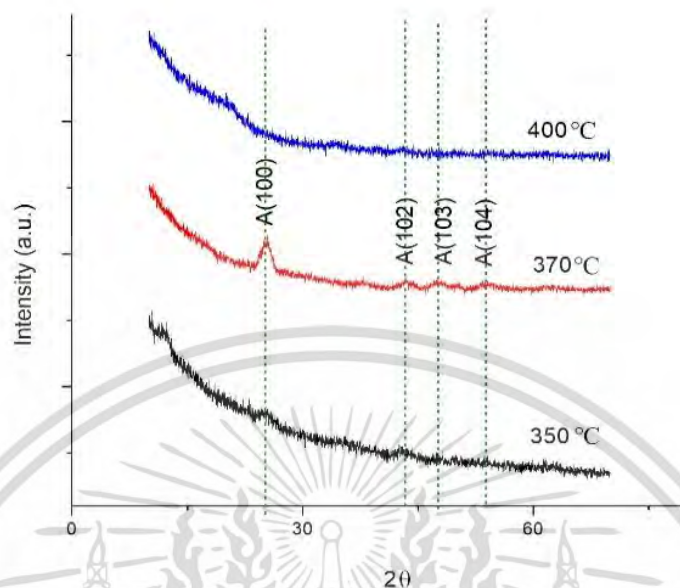


ภาพที่ 4.1 พื้นผิวของฟิล์มเทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบที่อุณหภูมิ 350 (ซ้าย) 370 (กลาง) และ 400 (ขวา) องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

จากภาพจะเห็นว่า ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 350°C มีลักษณะเหมือนกลีบ (petal-like) และมีขนาดเกรนเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทั้งสามอุณหภูมิที่ทำการศึกษา โครงสร้างของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 370°C มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ มีทั้งเกรนขนาดใหญ่และเล็กปนกัน ที่อุณหภูมิ 400°C พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นผลึกทรงกลม ขนาดของเกรนนั้นเกี่ยวข้องกับอัตราการเจริญของฟิล์ม (Growth rate) เมื่อการเจริญของฟิล์มเร็ว ขนาดเกรนก็จะเล็กและมีขนาดแน่น [25]

#### 4.2 เฟส

เฟสของฟิล์มบางที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้เป็นอนาเทส โครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ความเข้ม (Intensity) ของฟลักซ์ได้ต่างกัน



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.3 มุมสัมผัส

มุมสัมผัสบอกความสามารถในการเปียกของฟิล์ม ฟิล์มที่เคลือบที่สูงที่สุดคือ อุณหภูมิ 400°C มีค่ามุมสัมผัสสูงสุดที่ 95.4° และมุมสัมผัสที่น้อยที่สุดที่ 43.9° คือที่อุณหภูมิที่น้อยที่สุดคือ 350°C มุมสัมผัสที่วัดได้สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 มุมสัมผัสที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆ

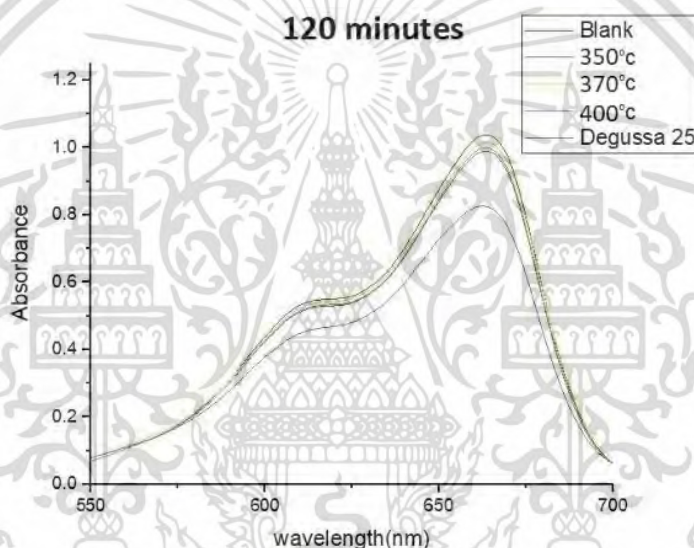
อุณหภูมิที่เคลือบ (°C)	มุมสัมผัส (°)
350	43.9
370	75.6
400	95.4

จะเห็นว่ามุมสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวและ โครงสร้างของฟิล์มบาง ซึ่งมุมสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเกรนเล็กลง โดยขนาดเกรนจะเล็กลงเมื่ออุณหภูมิในการเคลือบสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวเป็นปฏิกิริยาควบคุม หรือเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้าสุด การเคลือบนั้นจะส่งผลต่อการเกิดและการเจริญของฟิล์ม (nucleation and growth) ดังนั้นจึงส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ โดยทั่วไป

แล้ว ความสามารถในการเปียกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก และพื้นผิวและ โครงสร้างของฟิล์ม ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อพลังงานบนพื้นผิว (surface energy) ของฟิล์ม [16,26] พลังงานบนพื้นผิวที่สูงจะทำให้มุมสัมผัสมีค่าน้อย ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า พลังงานบนพื้นผิวลดลงเมื่ออุณหภูมิที่เคลือบเพิ่มขึ้นและมีขนาดเกรนเล็ก ขนาดเกรนที่อุณหภูมิ 350°C เล็กที่สุดจึงมีมุมสัมผัสที่น้อยที่สุด

#### 4.4 คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์มทำการดูดซับของเมทิลีนบลูหลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.3 ผลของการดูดซับที่พีคที่สูงที่สุดที่ประมาณ 664 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์การดูดซับที่ 550-700 นาโนเมตร สรุปได้ดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.3 การดูดซับของเมทิลีนบลูหลังจากได้รับแสงยูวีเป็นเวลา 120 นาที

ตารางที่ 4.2 การดูดซับของเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่ 664 นาโนเมตร

เวลา (นาที)	สาร มาตรฐาน	อุณหภูมิที่เคลือบ		
		350 °C	370 °C	400 °C
30	0.975	1.041	1.055	1.049
60	0.932	1.017	1.028	1.029
120	0.825	0.989	1.014	0.998

สารมาตรฐานคือ Degussa P25 ได้ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารสี แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดลอง พื้นที่ผิวของสารมาตรฐานเมื่อมาคำนวณแล้วจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟิล์มที่เคลือบประมาณ 10 เท่า จากการทดสอบพบว่า ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 370°C มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบทั้งหมดเป็นอนาเทส การลดลงของคุณสมบัติการเร่งด้วยแสงนั้น เนื่องมาจากพื้นที่ผิวและโครงสร้างและการแพร่ของสารปนเปื้อนในชั้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม [16,27] พื้นที่ผิวและโครงสร้างจะส่งผลต่อการดูดซับของเมทิลีนบลู ซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิดที่พื้นผิวใกล้ฟิล์มที่ทำการเคลือบ การแพร่ของสารปนเปื้อนดังกล่าวจะส่งผลต่อกระบวนการทางแสง ซึ่งปกติจะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ทำการเคลือบสูงขึ้น [16] อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ผลที่ได้ไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากวิธีการที่ใช้เคลือบคือ PP-MOCVD ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้หมายถึงการเพิ่มขึ้นของการเจริญของฟิล์ม การเจริญของฟิล์มที่เร็วหมายถึงฟิล์มที่ได้จะมีความแน่นมากกว่า [28] การเจริญของฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 400°C จึงลดลง ดังนั้นปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและการวิจัยต่อยอด

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและแผนการวิจัยต่อยอด เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่อง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้คุณสมบัติของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงบนชิ้นงานสองมิติทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิที่ใช้คือ 350, 370 และ 400°C ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เคลือบ มีโครงสร้างเป็นกลีบ (petal-like) ที่อุณหภูมิ 350°C และเป็นโครงสร้างเป็นทรงกลมที่อุณหภูมิ 400°C เฟส (phase) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้พบว่าเป็นอนาเทส มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและพบว่าคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดีที่สุดที่อุณหภูมิ 370°C

#### 5.2 แผนการวิจัยต่อยอด

ทำการเคลือบชิ้นงานบนชิ้นงานสามมิติ นอกจากจะทำการทดสอบกับเมทิลีนบลูแล้ว ยังรวมถึง อี.โคไล และฟูแรน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบนชิ้นงานทั้งสองและสามมิติและราคากับวิธีการเคลือบอื่น รวมถึงความเป็นไปได้ในการต่อยอดงานวิจัยในแง่ของการ โคป  $\text{TiO}_2$  ด้วยโลหะบนหรือพร้อมสารกึ่งตัวนำอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ในรายงานฉบับสมบูรณ์เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยที่ผลิตได้และที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ

#### 6.1 รายละเอียดผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยที่ผลิตได้

ผลงานที่ผลิตได้คือ ผลงานวิจัยตีพิมพ์เรื่อง Characterization and Photocatalytic Activity of Titanium Dioxide Deposited on Stainless Steel by Pulsed-Pressure MOCVD ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก

#### 6.2 รายละเอียดผลผลิตที่ผลิตได้จากงานวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ

ผลงานที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ คือ การผลิตนักวิจัยในระดับปริญญาโท ซึ่งคาดว่าจะสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2561 นี้ และผลงานวิจัยตีพิมพ์ ได้แก่ Influence of surface area and shadowing effect on the photocatalytic activity of deposited titanium dioxide on 3D stainless steel by PP-MOCVD; Growth mechanism of titanium dioxide deposited on 2D and 3D stainless steel substrate by PP-MOCVD; และ Photocatalytic activity of titanium dioxide deposited on 3D stainless steel substrate by PP-MOCVD on the removal of E-Coli and Furan ซึ่งคาดว่าจะผลิตได้เมื่อปิดโครงการต่อเนื่องโดยสมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang L., Kanki, T., Sano, N., Totoda, A., Photocatalytic degradation of organic compounds in aqueous solution by a TiO<sub>2</sub>-coated rotating-drum reactor using solar light, *Solar Energy*, 70 (2001) 331-337.
- [2] Fujishima, A., Rao, T.N., Tryk, D.A., Titanium dioxide photocatalysis, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1 (2000) 1-21.
- [3] Meagher, E.P., Lager, G.A., *The Canadian Mineralogist*, 17 (1979) 77.
- [4] Wold, A., Photocatalytic Properties of TiO<sub>2</sub>, *Chemistry of Materials*, 5 (1993) 280-283.
- [5] Agrios, A.G., Pichat, P., State of the art and perspectives on materials and applications of photocatalysis over TiO<sub>2</sub>, *Journal of Applied Electrochemistry*, 35 (2005) 655-663.
- [6] Nakata, K., Fujishima, A., TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Design and applications, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 13 (2012) 169-189.
- [7] Choi, H., Stathatos, E., Dionysiu, D.D., Photocatalytic TiO<sub>2</sub> films and membranes for the development of efficient wastewater treatment and reuse systems, *Desalination*, 202 (2007) 199-206.
- [8] Tachikawa, T., Fujitsuka, M., Majima, T., Mechanistic Insight into the TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Reactions: Design of New Photocatalysts, *Journal of Physical Chemistry C*, 111 (2007) 5259-5275.
- [9] ปิยฉัตร ตริทรัพย์พันธ์, วัชรวิภา คำนิ้ง, ขนิษฐา คำวิสัยศักดิ์, การลดสีย้อมผ้าโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์ The Decolourisation of Direct dye in Aqueous Solution by Photocatalyst, *วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 28*, 3 (2554) 49-54.
- [10] Youngman, R.J., *Trends in Biochemical Sciences*, 9 (1984) 280-283.
- [11] Lee, S., Nishida, K., Otaki M., Ohgaki, S., Photocatalytic inactivation of phage Q-beta by immobilized titanium dioxide mediated photocatalyst, *Water Science and Technology*, 35 (1997) 101-106.
- [12] Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe, T., *TiO<sub>2</sub> Photocatalysis — Fundamentals and Applications*, BKC: Tokyo, Japan (1999).
- [13] Konishi, J., Fujita, K., Nakanishi, K., Hirao, K., Monolithic TiO<sub>2</sub> with Controlled Multiscale Porosity via Template-Free Sol-Gel Process Accompanied by Phase Separation, *Chemistry of Materials*, 18 (2006) 6069-6074.

- [14] Konishi, J., Fujita, K., Nakanishi, K., Hirao, K., Morisato, K., Miyazaki, S., Ohira, M., Sol-gel synthesis of macro-mesoporous titania monoliths and their applications to chromatographic separation media for organophosphate compounds, *Journal of Chromatography A*, 1216 (2009) 7375–7383.
- [15] Yu, J.G., Su, Y.R., Cheng, B., Template-free fabrication and enhanced photocatalytic activity of hierarchical macro-/mesoporous titania, *Advanced Functional Materials*, 17 (2007) 1984–1990.
- [16] Duminica, F.-D., Maury, F., Hausbrand, R., Growth of TiO<sub>2</sub> thin films by AP-MOCVD on stainless steel substrates for photocatalytic applications, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2007) 9304-9308.
- [17] Evans, P., Sheel, D.W., Photoactive and antibacterial TiO<sub>2</sub> thin films on stainless steel, *Surface & Coatings Technology*, 201 (2007) 9319-9324.
- [18] Tian, G., Chen, Y., Zhou, W., Pan, K., Tian, C., Huang, X.-r., Fu, H., 3D hierarchical flower-like TiO<sub>2</sub> nanostructure: morphology control and its photocatalytic property, *Cryst Eng Comm*, 13 (2011) 2994–3000.
- [19] Krumdieck, S., Growth rate and morphology for ceramic films by pulsed-MOCVD, *Surface and Coatings Technology*, 141 (2001) 7-14.
- [20] Siriwongrungson, V., Alkaisi, M.M., Krumdieck, S.P., Step coverage of thin titania films on patterned silicon substrate by pulsed-pressure MOCVD, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2007) 8944-8949.
- [21] Siriwongrungson, V., Krumdieck, S.P., Alkaisi, M.M., Conformality investigation of titanium dioxide thin films on 3-D micrometer- and nanometer-scale features by pulsed-pressure metal-organic CVD, *Chemical Vapor Deposition*, 17 (2011) 327-336.
- [22] Siriwongrungson, V., Characterization of Step Coverage by Pulsed-Pressure Metalorganic Chemical Vapour Deposition: Titanium Dioxide Thin Films on 3-D Micro- and Nano-scale Structures, *University of Canterbury, New Zealand* (2010).
- [23] Krumdieck, S., Siriwongrungson, V., Reyngoud, B., Barnett, A., Bio-integration ceramics on 3D specimens by pulsed-pressure metal-organic CVD, *Chemical Vapor Deposition*, 16 (2010) 15-18.
- [24] Krumdieck, S., Kristinsdottir, A., Ramirez, L., Lebedev, M., Long, N., Growth rate microstructure and conformality as a function of vapor exposure for zirconia thin films by pulsed-pressure MOCVD, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2007) 8908-8913.
- [25] Krumdieck, S., Raj R., Growth rate and morphology for ceramic films by pulsed-MOCVD, *Surface and Coatings Technology*, 141 (2001) 7-14.

[26] Wu, K.-R., Wang, J.-J., Liu, W.-C., Chen, Z.-S., Wu, J.-K., Deposition of graded TiO<sub>2</sub> films featured both hydrophobic and photo-induced hydrophilic properties, *Applied Surface Science*, 252 (2006),5829-5838.

[27] Singh, J., Khan, S.A., Shah, J., Kotnala, R.K., Mohapatra, S., Nanostructured TiO<sub>2</sub> thin films prepared by RF magnetron sputtering for photocatalytic applications, *Applied Surface Science*, 422 (2017) 953-961.

[28] Krumdieck, S.P., Raj, R., Experimental Characterization and Modeling of Pulsed MOCVD with Ultrasonic Atomization of Liquid Precursor, *Chemical Vapor Deposition*, 7 (2001) 85-90.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## ผลงานวิจัยที่ผลิตได้



Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.28 No.2 pp. 76-82, 2018

### Characterization and photocatalytic activity of titanium dioxide deposited on stainless steel by pulsed-pressure MOCVD

Komrawee WIRANDORN, Natthawut PANYAYAO, and Vilailuck SIRIWONGRUNGSON\*

<sup>1</sup>College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, No. 1, Chalalongkrong Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

\*Corresponding author e-mail: vilailuck.s@kmitl.ac.th

Received date:

29 May 2018

Revised date:

17 June 2018

Accepted date:

18 September 2018

Keywords:

Titanium dioxide

Pulsed-pressure metalorganic

chemical vapor deposition

Phase analysis

Stainless steel

Characterization

#### Abstract

Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) was deposited on stainless steel 304 by pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition (PP-MOCVD). Titanium tetraisopropoxide (TIP) in toluene at the concentration of 0.5 mol% was used as the precursor. The deposition was conducted at the base pressure of 300 Pa and deposition temperatures were varied between 350°C and 400°C. At these deposition temperatures, anatase phase is expected for further photocatalysis study. The deposited TiO<sub>2</sub> thin films at the thickness of hundreds nanometers were analyzed using field emission scanning electron microscopy (FESEM) for surface morphology. X-ray diffraction (XRD) was applied for phase analysis. The contact angle was measured to study its relationship with surface morphology, grain size and phase. Finally, photocatalytic activity was investigated through the absorption of methylene blue using UV-Vis spectrophotometer. The deposited TiO<sub>2</sub> thin films were found to be rutile and anatase with various surface morphology and grain size depends on the deposition temperature. The hydrophobicity of deposited TiO<sub>2</sub> thin films tend to increase with the deposition temperature whereas the photocatalytic property depends on the microstructure of TiO<sub>2</sub> thin film.

#### 1. Introduction

Due to increase demand and shortage of clean water sources from population growth and industrialization, wastewater treatment at low-cost and high efficiency is sought to offset the clean water sources [1]. Wastewaters are often contained suspended solids, hazardous organic compounds and biological hazardous substances [1,2]. There are lots of wastewater treatment techniques such as adsorption, sedimentation, filtration and active sludge biochemical processes. Certain processes of these involves the use of chemicals that generate secondary pollution instead [1-3]. As a result, photocatalytic activity is of interest as it can degrade organic compounds and certain biological substances completely depend on the cases without using additional chemicals [2].

Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) has been an interesting material for research for a long time for air and water purification due to its attractive properties such as highly chemical and thermal stability, non-toxic and photocatalysis capability [4,5]. The photocatalytic activity generally occurs on the surface of TiO<sub>2</sub>. When a photon with energy equal

to or greater than the band gap of TiO<sub>2</sub> (3.2 eV in case of anatase and 3.0 eV in case of rutile), electron-hole pairs will be generated. These electron-hole pairs can react with oxygen dissolved in wastewaters and form hydroxyl radicals. These hydroxyl radicals has strong oxidizing and decontaminating abilities, hence reacts with organic compounds and biological substances in wastewater and polluted air and eliminates them [5].

TiO<sub>2</sub> is a polymeric compound that exists principally in three crystal structures, which are rutile, anatase and brookite. Nevertheless, only rutile and anatase phases are commonly synthesized due to their attractive thermodynamic characteristics and physical properties. Rutile phase has higher refractive index than the anatase, which probably due to more compact tetragonal crystal structure of rutile than anatase [1,6]. The light distribution and absorption of the rutile phase have been apply in inorganic cosmetics, sunscreens, opacifying agent for paints and high grade plastics [7]. The anatase phase is widely used in ceramics, manufacture of paper, rubber and fibers as well as photocatalytic coating for surface protection and surface treatment from various physical stresses and contaminations [8]. Considering the photocatalytic activity, anatase

DOI: 10.14456/jmmm.2018.20

shows higher photocatalytic activity than rutile [9]. Anatase is considered to be more sensitive to ultraviolet-visible wavelength region than rutile. However, rutile has better photoabsorption property in visible wavelength region than anatase with good refractive index, high dielectric constant and excellent chemical stability [1,10,11]. A main obstacle in using TiO<sub>2</sub> particles in wastewater treatment is the separation of TiO<sub>2</sub> particles after used. This is because the TiO<sub>2</sub> particles are too fine to be separated by gravity settling [1,2,5]. The other obstacle is the agglomeration of TiO<sub>2</sub> particles, which reduced the surface area; hence photocatalytic activity decreased as well as the reusable lifespan [1]. Attempts to effectively separate TiO<sub>2</sub> particles are such as coagulation and membrane separation, which however caused secondary pollutants and higher treatment cost [2]. Therefore, TiO<sub>2</sub> thin films is an interesting solution to solve the issue of TiO<sub>2</sub> particles separation with numbers of methods to enhance the photocatalytic activity such as increasing the surface area, doping with noble metals and preparing composite thin films [5].

Pulsed-pressure metalorganic chemical vapor deposition (PP-MOCVD) has been reported of its capability of conformal coating over complex shapes [12-14]. It is a low cost apparatus with supplying of controlled amount of precursor through an ultrasonic nozzle in a pulsing manner to an evacuated cold-wall reactor. With ultrasonic nozzle, very small droplets of a liquid precursor is generated, which influences the liquid precursor to flash evaporate immediately. The pulsing action provides uniform coverage, relatively fast growth rates, low cooling rates of the deposition surface, and low contamination of the film [12].

In this study, characterization of PP-MOCVD coated stainless steel 304 has been carried out. The surface morphology and phase of deposited TiO<sub>2</sub> thin film was characterized for further deposition on complex shapes and photocatalysis capability with recyclable possibility. The contact angle and photocatalytic activity were also investigated.

## 2. Experimental

### 2.1 Materials and reagents

TiO<sub>2</sub> thin films were deposited on flat stainless steel 304. Stainless steel has been chosen due to its good mechanical properties and high corrosion

resistance in most of the cases. In addition, nanometric chromium oxide layer is spontaneously formed on a surface of the stainless steel. This oxide layer acts perfectly as an adherent to ceramic coating TiO<sub>2</sub> thin film [15]. The source of liquid precursor for TiO<sub>2</sub> thin films deposition is titanium (IV) tetraisopropoxide (TTIP) 97% from Sigma-Aldrich dissolved in AR grade toluene to a concentration of 0.5 mol%.

For photocatalytic activity study, methylene blue trihydrate from MP Biomedicals was diluted with deionized water at a concentration of 0.5 mg/L. As standard reference, the commercial photocatalyst, Degussa P-25 nanopowder with primary particle size of 21 nm from Sigma Aldrich was used.

### 2.2 Preparation of TiO<sub>2</sub> thin films

TiO<sub>2</sub> thin films were deposited using a cold-wall reactor PP-MOCVD at the deposition temperatures of 350°C, 370°C and 400°C. The base pressure during the deposition was 300 Pa at the pulse time of 10 s.

### 2.3 Materials characterization

The phase of deposited TiO<sub>2</sub> thin films was analyzed using Bruker D8 Advanced X-ray diffraction (XRD). The surface morphology was characterized using JSM-7001F field emission Scanning Electron Microscope (FESEM). The wettability property of deposited TiO<sub>2</sub> was examined using contact angle measurement. The contact angle value was an average from four measurements on different areas of the same sample surface.

### 2.4 Grain size estimation

The crystallite size of deposited TiO<sub>2</sub> was calculated from XRD data using Scherrer equation as written in Equation 1.

$$L = \frac{K\lambda}{B(2\theta)\cos\theta} \quad (1)$$

Where  $L$  is the average crystallite size;  $B(2\theta)$  is the peak width;  $\lambda$  is the X-ray wavelength;  $\theta$  is the Bragg angle and  $K$  is the Scherrer constant, which assumed to be 0.94 for the full width at half maximum (FWHM) of spherical crystals with cubic symmetry [16].

## 2.5 Photocatalytic experiments

The photocatalytic activity of deposited TiO<sub>2</sub> thin films was investigated through the decomposition of methylene blue solution. The deposited TiO<sub>2</sub> thin films on 1x1 cm<sup>2</sup> flat stainless steels were immersed into 50 ml aqueous methylene blue solution with the concentration of 0.5 mg/L in a beaker each. For Degussa P-25, 0.01 g of Degussa P-25 powder was added in a beaker with 50 ml aqueous methylene blue solution at the same concentration. A mercury tube lamp was used as an only UV source with UVA wavelength range of 320-400 nm. The immersed TiO<sub>2</sub> thin films were irradiated in perpendicular direction with the distance from the UV source of 10 cm. The experiment was conducted at room temperature. The decomposition of the methylene blue solution was measured through the change of concentration using absorption of methylene blue from PG INSTRUMENTS T92+UV Spectrophotometer.

### 2.5 Photocatalytic activity degradation rate estimation

According to Beer-Lambert's law, the concentration of methylene blue is directly proportional to the intensity of the absorption peak at 663 nm. Therefore, the decomposition efficiency of methylene blue MB can be calculated using the concentration of the methylene blue at the initial and during the irradiation as shown in Equation 2.

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

Where C<sub>0</sub> is the initial concentration of methylene blue solution and C<sub>t</sub> is concentration of methylene blue during irradiation [17].

## 3. Results and discussion

### 3.1 Surface morphology of deposited TiO<sub>2</sub>

All the surface morphology of deposited TiO<sub>2</sub> thin films are shown in Figure 1. At the deposition temperature of 350°C, the surface morphology is petal-like with the average grain size of 5.01 nm. The surface morphology at the deposition temperature of 370°C is non-uniform. This non-uniform is likely to come from the film growth rate that causes high stress as certain cracks were observed; hence diffusion of atomic of the substrate

into the film [18]. This film has both large and small microstructure with the average grain size of 3.15 nm, which is the smallest grain size among the three samples. At the highest deposition temperature studied, 400°C, the deposited TiO<sub>2</sub> thin films has the largest grain size with round shape crystal with the average grain size of 5.68 nm. The grain size and shape of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films related to the growth rate. The higher the growth rate, the smaller the grain size as fully dense films are formed [19]. Nevertheless, this is not the case for this study. The growth rate of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films is likely to be in the mass transport of the second kind of control where the transfer of reactant in the main gas flow and the substrate surface are the slowest steps. In this regime, the mass transfer of the main gas flow and the substrate surface is through diffusion or convection. As the reaction chamber is under vacuum, the diffusion of the active gaseous

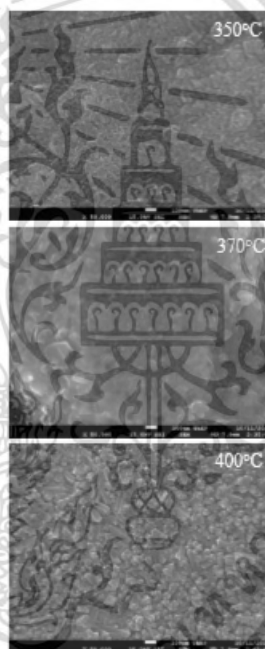


Figure 1. FESEM images of deposited TiO<sub>2</sub> thin films at 50 kX at the deposition temperatures of 350°C (top), 370°C (middle) and 400°C (bottom).

precursor through the boundary layer to the surface is the rate limiting step. Because the diffusion coefficients vary slightly with temperature and inversely depend on pressure. The growth rate depends weakly on the temperature, the growth rate is remarkably has smaller slope than other regimes [19,20]. As a result, the deposited TiO<sub>2</sub> thin films have different crystal shape and slightly different in grain size

### 3.2 Phase of deposited TiO<sub>2</sub>

The X-ray diffraction pattern of deposited TiO<sub>2</sub> thin films is shown in Figure 2. The difference morphology of the deposited films caused the difference in X-ray intensity. The XRD pattern shows that the deposited TiO<sub>2</sub> thin films have mixed phase of both rutile and anatase phases. The diffraction peaks related to the TiO<sub>2</sub> phase are at 2θ degrees with phases and Miller indices of anatase (101) and (200), and rutile (210). The anatase (200) was observed at the deposition temperature 370°C where the surface morphology has both large and small microstructure, which may due to the growth rate of the film [20]. The intensity of the peaks depend on the microstructure of the films. The substrate peak (S) was also detected.



Figure 2. XRD patterns of TiO<sub>2</sub> thin films deposition at temperature of 350°C, 370°C and 400°C.

### 3.3 Wettability of deposited TiO<sub>2</sub>

The wettability of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films was studied through the contact angle measurement. The deposited TiO<sub>2</sub> thin films at the deposition temperature of 400°C has the highest contact angle of 95.4°. The minimum contact angle of 43.9° was at the lowest deposition temperature in this study.

350°C. Table 1 summarized the contact angle at various deposition temperatures varied in this study.

Table 1. Contact angle of deposited TiO<sub>2</sub> thin films at various deposition temperatures.

Deposition temperature (°C)	Contact angle (°)
350	43.9
370	75.6
400	95.4

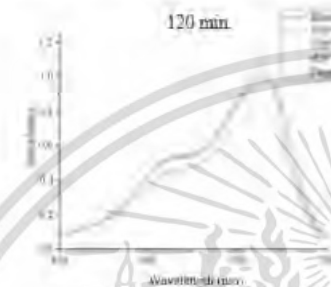
The contact angle tends to be related to the surface morphology. It tends to increase as the grain size decreased with an increase in the deposition temperature when the deposition is in the kinetic limited regime. The deposition temperature influences the nucleation and growth of the deposited films; hence affects the properties of the deposited films. In general, the wettability depends on the chemical composition, crystal structure and surface morphology. These parameters affect the surface energy of the films [19,20]. High surface energy results in low contact angle. Therefore, it could be implied that the surface energy decreased with increased deposition temperature and reduced grain size. The grain size of the deposited TiO<sub>2</sub> thin film at 370°C has the smallest grain size yet not the lowest contact angle. This may due to the crystallographic orientation and roughness of the deposited thin films [20]. In addition, it could be implied that the growth rate of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films are in the the mass transport of the second kind of control as mentioned in the surface morphology of deposited TiO<sub>2</sub> thin films section. The contact angle increases as the deposition temperature increases with larger grain size due to the decrease in growth rate when the mass transport of the second kind is the rate limiting step. The deposition temperature of 370°C has the smallest grain size, which could be implied that it has the faster growth rate in this growth regime.

### 3.4 Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>

The photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> thin films was investigated through the decomposition of methylene blue after UV exposure of 120 min. The absorbance measured from UV Spectrophotometer is shown in Figure 3. The absorption of methylene blue at the strongest absorption peak ≈663 nm of the full analysis wavelength of 550-700 nm is summarized in Table 2.

**Table 2.** Absorbance of methylene blue at various deposition temperatures compared with Degussa P25 at 663 nm.

Time (min)	Degussa P25	Deposition Temperature		
		350 °C	370 °C	400 °C
30	0.975	1.041	1.055	1.049
60	0.932	1.017	1.028	1.029
120	0.825	0.989	1.014	0.998
Degradation Efficiency (%)	15.4	5.0	3.9	4.8

**Figure 3.** Absorbance of methylene blue at 120 min.

Degussa P-25 was used to compare the photocatalytic activity of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films at various temperatures. The Degussa P-25 is the most widely used as a standard reference for comparisons of the photocatalytic activity under various treatment conditions [1]. It is in powder form consisting of both rutile and anatase crystallites [21]. It should be noted that due to the limitation of the scale, the surface area of the Degussa P-25 used was 10 times higher than the surface area of the TiO<sub>2</sub> coated on flat stainless steel substrates. In addition, the Degussa P-25 was applied in a slurry form and was not fixed on any substrate because the slurry form is usually preferred. The slurry form has more surface active sites; hence is not limited by mass transfer to the surface active sites [1].

The photocatalytic activity of the applied Degussa P-25 was the most effective after 30 min UV exposure and until 120 min UV exposure as well as its degradation efficiency. This is as expected because the calculated surface area of the applied Degussa P-25 was 10 times higher than the surface area of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films coated on flat substrate. In addition, it has been reported that the mixture of the phase of the Degussa P-25 of rutile and anatase cause synergistic effects and

increasing of photocatalytic activity compared to a single phase [24].

The photocatalytic activity after 120 min UV exposure of TiO<sub>2</sub> deposited at 370 °C is the least effective. As the deposited films at all deposition temperatures are both rutile and anatase, the decreased of the photocatalytic activity is due to surface morphology of the deposited film and the diffusion of cationic impurities from the stainless steel substrate [21,25]. The surface morphology affects the adsorption of methylene blue, which generally occurs at the surface and in the near-surface region of the deposited TiO<sub>2</sub> film [25]. The diffusion of the cationic impurities increased the recombination process of photo-electronic carriers, which normally decreased the photocatalytic activity when the deposition temperature increased [21]. However, in this study, the photocatalytic activity did not decrease when the deposition temperature increased. This is because the nature of the PP-MOCVD that the increase of temperature does not increase the growth rate, which higher growth rate results in denser microstructure [26]. The growth rate of the deposited TiO<sub>2</sub> films at various deposition temperatures is decreased with increased temperature; hence the photocatalytic activity tends to decrease with increased temperature. In addition, as the growth rate of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films are in the mass transport of the second kind of control as discussed above, the degradation efficiency of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films were not drastically different. The deposited TiO<sub>2</sub> thin films at the deposition temperature of 370 °C has the smallest grain size, hence the degradation efficiency should be the highest. The photocatalytic activity of smaller grain size is more effective due to the increasing of specific surface active sites. Nevertheless, the internal stress is increased and can cause a crystal lattice distortion, which changed the energy band gap [3]. As a result, the influence the photocatalytic activity was not more effective when grain size is smaller. The surface morphology of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films

also affect the band gap due to different surfaces; hence the photocatalytic activity as the adsorption of molecules and subsequent charge transfer to the molecules varied [27-29].

#### 4. Conclusions

TiO<sub>2</sub> thin films on flat stainless steel 304 were deposited using PP-MOCVD at the deposition temperatures of 350°C, 370°C and 400°C to study the surface morphology, phase and wettability of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films on the photocatalytic activity. At these deposition temperatures, different surface morphology of the deposited TiO<sub>2</sub> thin films was observed from FESEM at 50kX. Petal-like microstructure was found at the lowest deposition temperature, 350°C. Round shape microstructure was observed at the highest deposition temperature. The phase of the TiO<sub>2</sub> thin films according to the XRD is rutile and anatase with various orientations. The wettability or hydrophobicity tends to increase with the deposition temperature whereas the photocatalytic activity was maximum at the lowest deposition temperature in this studied of 350°C.

#### 5. Acknowledgements

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the National Research Council of Thailand (Grant Number A118-59-095).

#### References

[1] M. N. Chong, B. Jin, C. W. K. Chow and C. Saint, "Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review," *Water research*, vol. 44, pp. 2997-3027, 2010.

[2] H. Zhang, X. Quan, S. Chen, H. Zhao and Y. Zhao, "Fabrication of photocatalytic membrane and evaluation its efficiency in removal of organic pollutants from water," *Separation and Purification Technology*, vol. 50, pp. 147-155, 2006.

[3] U. I. Gaya and A. H. Abdullah, "Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems," *Journal of Photochemistry*

and Photobiology C: Photochemistry Reviews, vol. 9, pp. 1-12, 2008.

[4] M. Pakmehr, A. Nourmohammadi, M. Ghashang and A. Saffar-Teluri, "Synthesis, structural characterization and catalytic activity of TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> photo-composite," *Journal of Particle Science & Technology*, vol. 1, pp. 31-38, 2015.

[5] S. K. Zheng, T. M. Wang, G. Xiang and C. Wang, "Photocatalytic activity of nanostructured TiO<sub>2</sub> thin films prepared by dc magnetron sputtering method," *Vacuum*, vol. 62, pp. 361-366, 2001.

[6] T. Luttrell, S. Halpegamage, J. Tao, A. Kramer, E. Sutter and M. Batzill, "Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO<sub>2</sub> films," *Scientific Reports*, vol. 4, pp.4043-4050, 2014.

[7] Z. Zhang, F. Wu, H. J. W. Zandvliet, B. Poelsema, H. Metiu and M. G. Lagally, "Energetics and dynamics of Si Ad-Dimers on Si(001)," *Physical Review Letters*, vol. 74, pp. 3644-3647, 1995.

[8] D. Dijkamp, E. J. van Loenen and H. B. Elswijk, *Proc. 3rd NEC Symposium on Fundamental Approach to New Material Phases*. Springer Series on Material Science, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[9] L. Liu, H. Zhao, J. M. Andino and Y. Li, "Photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction with H<sub>2</sub>O on TiO<sub>2</sub> nanocrystals: Comparison of anatase, rutile, and brookite polymorphs and exploration of surface chemistry," *ACS Catalysis*, vol. 2, pp. 1817-1828, 2012.

[10] Y. B. Ryu, M. S. Lee, E. D. Jeong, H. G. Kim, W. Y. Jung, S. H. Baik, G.-D. Lee, S. S. Park and S.-S. Hong, "Hydrothermal synthesis of titanium dioxide from peroxotitanate solution using different amine group-containing organics and their photocatalytic activity," *Catalysis Today*, vol. 124, pp. 88-93, 2007.

[11] J. Yu, J. C. Yu, B. Cheng and X. Zhao, "Preparation and characterization of highly photoactive nanocrystalline TiO<sub>2</sub> powders by solvent evaporation induced crystallization method," *Science in China Series B: Chemistry*, vol. 46, pp. 549-557, 2003.

[12] V. Siriwongrungron, M. M. Alkaisy and S.P. Krundjack, "Step coverage of thin titania films on patterned silicon substrate by

- pulsed-pressure MOCVD," *Surface and Coatings Technology*, vol.201, pp. 8944-8949, 2007.
- [13] S. Krumdieck, "Kinetic model of low pressure film deposition from single precursor vapor in a well-mixed, cold-wall reactor," *Acta Materialia*, vol. 49, pp. 583-588, 2001.
- [14] S. Krumdieck and R. Raj, "Growth rate and morphology for ceramic films by pulsed-MOCVD," *Surface and Coatings Technology*, vol.141, pp. 7-14, 2001.
- [15] E. Martin, A. Lanzutti, M. Lekka, L. Guzman, W. Ensinger and L. Fedrizzi, "Chemical and mechanical characterization of TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atomic layer depositions on AISI 316L stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol.211, pp. 84-88, 2012.
- [16] J. I. Langford and A. J. C. Wilson, "Scherrer after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size," *Journal of Applied Crystallography*, vol.11, pp.102-113, 1978.
- [17] Z. A. C. Ramli, N. Asim, W. N. R. W. Isahak, Z. Emdadi, N. Ahmad-Ludin, M. A. Yarmo, and K. Sopian, "Photocatalytic Degradation of Methylene Blue under UV Light Irradiation on Prepared Carbonaceous TiO<sub>2</sub>," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp.1-8, 2014.
- [18] A. L. Greer, "Diffusion and reaction in thin films," *Applied Surface Science*, vol. 86, pp.329-337, 1995.
- [19] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films 2<sup>nd</sup> Edition*. Academic Press, United States of America, 2002.
- [20] C. E. Morosanu, *Thin films by chemical vapour deposition*, Elsevier, 1990.
- [21] F.-D. Duminica, F. Maury and R. Hausbrand, "Growth of TiO<sub>2</sub> thin films by AP-MOCVD on stainless steel substrate for photocatalytic applications," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 9304-9308, 2007.
- [22] K.-R. Wu, J.-J. Wang, W.-C. Liu, Z.-S. Chen and J.-K. Wu, "Deposition of graded TiO<sub>2</sub> films featured both hydrophobic and photo-induced hydrophilic properties," *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 5829-5838, 2006.
- [23] T. Ohno, K. Sarukawa, K. Tokieda and M. Matsumura, "Morphology of a TiO<sub>2</sub> photocatalyst (Degussa, P-25) consisting of anatase and rutile crystalline phases," *Journal of Catalysis*, vol. 203, pp.82-86, 2001.
- [24] D. O. Scanlon, C. W. Dunnill, J. Buckeridge, S. A. Shevlin, A. J. Logsdali, S. M. Woodley, C. R. A. Catlow, M. J. Powell, R. G. Palgrave, I. P. Parkin, G. W. Watson, T. W. Keal, P. Sherwood, A. Walsh and A. A. Sokol, "Band alignment of rutile and anatase TiO<sub>2</sub>," *Nature Materials*, vol. 12, pp. 798-801, 2013.
- [25] J. Singh, S. A. Khan, J. Shah, R. K. Kotnala and S. Mohapatra, "Nanostructured TiO<sub>2</sub> thin films prepared by RF magnetron sputtering for photocatalytic applications," *Applied Surface Science*, vol. 422, pp. 953-961, 2017.
- [26] S. P. Krumdieck and R. Raj, "Experimental Characterization and Modeling of Pulsed MOCVD with Ultrasonic Atomization of Liquid Precursor," *Chemical Vapor Deposition*, vol. 7, pp.85-90, 2001.
- [27] J. Pan, G. Liu, G.Q. Lu and H.-M. Cheng, "On the true photoreactivity order of {001}, {010}, and {101} facets of anatase TiO<sub>2</sub> crystals," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 50, pp. 2133-2137, 2011.
- [28] J. N. Wilson and H. Idriss, "Effect of surface reconstruction of TiO<sub>2</sub>(001) single crystal on the photoreaction of acetic acid," *Journal of Catalysis*, vol. 214, pp. 46-52, 2003.
- [29] J. N. Wilson and H. Idriss, "Structure sensitivity and photocatalytic reactions of semiconductors. Effect of the last year atomic arrangement," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 124, pp. 11284-11285, 2002.

ภาคผนวก ข  
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการ



ว/ศ/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย				รายรับ	รายจ่าย					รวม	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ยอดรับ		งบดำเนินงาน						รวม
							งบบุคลากร	ค่าจ้างชั่วคราว	ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ	ค่าสาธารณูปโภค	ค่าคงที่	รายจ่าย
	งบประมาณที่ได้รับยกย่อง (ตามแผน)													-
17/11/58	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%)		1,581,595			696.82								
27/09/59	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)		279,105											
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3)													
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			1,550,351.66			9,300.00	-	9,520.00	131,531.66	-	-	1,400,000.00	1,550,351.66
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			188,168.98			55,800.00	-	2,400.00	129,968.98	-	-	-	188,168.98
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 3)			-			-	-	-	-	-	-	-	-
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 4)			-			-	-	-	-	-	-	-	-
	งบประมาณคงเหลือ		1,860,700		#####	696.82								
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย													
	<b>ครั้งที่ 1</b>													
24 พ.ย. 58	ระบบกำลังกลายแบบโรตารี่	SX5811001195										200,000.00		200,000.00
18 ม.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว	110150002198					9,300.00							9,300.00
3 ก.พ. 59	วัสดุสิ้นเปลือง	IV5902030								33,313.38				33,313.38
10 ก.พ. 59	สารเคมี	IV1602203								7,504.02				7,504.02
27 มี.ค. 59	รายการ Nozzle พร้อมหัวควบคุม	RE201603025										495,327.10		495,327.10
27 มี.ค. 59	รายการ Nozzle พร้อมหัวควบคุม	RE201603033										4,672.90		4,672.90
1 เม.ย. 59	วัสดุสิ้นเปลือง (Tungsten and Mo Sheets)	MB1604033								4,440.50				4,440.50
4 เม.ย. 59	วัสดุในห้องทดลอง (RC)	39079946								3,227.17				3,227.17
26 เม.ย. 59	วัสดุในห้องทดลอง (ศึกษาวิเคราะห์)	59007181								3,098.55				3,098.55
15 พ.ค. 59	วัสดุสิ้นเปลือง	CEI0515/59								8,894.91				8,894.91
3 มิ.ย. 59	วัสดุในห้องทดลอง	CFI0603/59								11,062.73				11,062.73
7 มิ.ย. 59	วัสดุในห้องทดลอง	CEI0676/59								8,692.68				8,692.68
7 มิ.ย. 59	วัสดุสิ้นเปลือง (Heater wire)	RE09000650								1,872.50				1,872.50
21 มิ.ย. 59	เครื่องเคลือบฟิล์มบาง	5904001										700,000.00		700,000.00
30 มิ.ย. 59	วัสดุในห้องทดลอง (vials)	IV59005_0056								10,275.21				10,275.21
5 ก.ค. 59	สารเคมี (TiO2, toluene, methanol)	IV1607116								4,317.66				4,317.66
9 ก.ค. 59	วัสดุสิ้นเปลือง (molten)	IV59-070819								123.05				123.05
12 ก.ค. 59	วัสดุสิ้นเปลือง (Tungsten Sheet)	RI1607064								3,103.00				3,103.00
26 ก.ค. 59	วัสดุในห้องทดลอง (Lab valley)	59-07-2634								7,126.20				7,126.20
30 ก.ค. 59	หนังสือ	2453-122649								4,716.00				4,716.00
4 ส.ค. 59	ก๊าซ	1600976 RP								7,169.00				7,169.00
18 ส.ค. 59	วัสดุในห้องทดลอง (SMC plastic tube)	IV59080029								1,209.10				1,209.10
19 ส.ค. 59	วัสดุในห้องทดลอง (Evoq glass)	5172								10,486.00				10,486.00
12 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	037495-83								50.00				50.00
16 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	#32874-03								50.00				50.00
29 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	042145-67								50.00				50.00
5 ต.ย. 59	ค่าทางด่วน	#79227-100								50.00				50.00
30 ต.ย. 59	ค่าทางด่วน	083904-14								40.00				40.00
11 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	013610-64								50.00				50.00
26 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	#35545-01								50.00				50.00
2 ส.ค. 59	ค่าทางด่วน	14442-21								70.00				70.00
11 ส.ค. 59	ค่าทางด่วน	#38786-09								50.00				50.00
12 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	0117370								30.00				30.00
12 ก.ย. 59	ค่าทางด่วน	137342								30.00				30.00
18 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	0576								600.00				600.00
14 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	40548								600.00				600.00
24 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	16010012028								600.00				600.00
31 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	1371								600.00				600.00
4 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	42613								600.00				600.00
8 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	T11608-01192								600.00				600.00
12 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	10207								600.00				600.00
18 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	T11608-02631								600.00				600.00
23 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	T11608-03404								600.00				600.00
26 ส.ค. 59	ค่าเดินทาง	138312								600.00				600.00
1 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	T11609-00122								600.00				600.00
5 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	T11609-00578								600.00				600.00
9 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	138974								600.00				600.00
14 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	T11609-01834								600.00				600.00
19 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	T11609-02473								600.00				600.00
	<b>รวมทั้งสิ้น ครั้งที่ 1</b>						9,300.00	-	9,520.00	131,531.66	-	-	1,400,000.00	1,550,351.66
	<b>ครั้งที่ 2</b>													
23 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	48050								1,200.00				1,200.00
25 ก.ย. 59	ค่าอุปกรณ์ที่ความร้อน	5909002								26,499.98				26,499.98
25 ก.ย. 59	ค่าชิ้นงาน	5909003								53,500.00				53,500.00
25 ก.ย. 59	ค่าอุปกรณ์ควบคุม	5909004								49,969.00				49,969.00
29 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	#59010122028862								600.00				600.00
29 ก.ย. 59	ค่าเดินทาง	T11609-03389								600.00				600.00
30 ก.ย. 59	ค่าจ้างชั่วคราว 6 เดือน	1100400664345					55,800.00							55,800.00
	<b>รวมทั้งสิ้น ครั้งที่ 2</b>						55,800.00	-	2,400.00	129,968.98	-	-	-	188,168.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ครั้งที่ 3											
10 เม.ย. 60	สารเคมี	IV17-060767								856.00	856.00
21 เม.ย. 60	ค่าเดินทาง	04122						1,710.00			1,710.00
21 เม.ย. 60	ค่าทางด่วน	531655						30.00			30.00
23 เม.ย. 60	ค่าเดินทาง	ศ60101262011822						700.00			700.00
25 เม.ย. 60	Heater Cup	60002							6,600.05		6,600.05
27 เม.ย. 60	ค่าเดินทาง	T11704-03508						600.00			600.00
30 เม.ย. 60	โน้ตบุ้คจอเหลว	IV-6005105							1,605.00		1,605.00
5 พ.ค. 60	ค่าเดินทาง	04670						600.00			600.00
8 พ.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ7856180						50.00			50.00
9 พ.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ7074279						50.00			50.00
17 พ.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ7888561						50.00			50.00
18 พ.ค. 60	ค่าเดินทาง	T11705-02476						700.00			700.00
18 พ.ค. 60	สายไฟ	บิลเงินสด							54.00		54.00
19 พ.ค. 60	ซีพียูซี	บิลเงินสด							90.00		90.00
22 พ.ค. 60	ค่าเดินทาง	T11705-02994						700.00			700.00
25 พ.ค. 60	ค่าทางด่วน	508667						30.00			30.00
28 พ.ค. 60	ค่าเดินทาง	ศ60101262015601						700.00			700.00
29 พ.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ8334890						50.00			50.00
5 มิ.ย. 60	ค่าเดินทาง	T11706-00587						700.00			700.00
9 มิ.ย. 60	ค่าเดินทาง	173464						700.00			700.00
21 มิ.ย. 60	ค่าทางด่วน	ศ8390414						40.00			40.00
29 มิ.ย. 60	ค่าเดินทาง	176670						700.00			700.00
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	0502							467.00		
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	0472							284.00		
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	045-2213							100.00		
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	37-3624							160.00		
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	37-3625							40.00		
29 มิ.ย. 60	ค่าอุปกรณ์ทำเครื่องให้ความร้อน	HS0001532							171.20		
4 ก.ค. 60	ค่าเดินทาง	T11707-04442						700.00			700.00
9 ก.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ4979336							25.00		25.00
11 ก.ค. 60	ค่าเดินทาง	T11707-01294						700.00			700.00
11 ก.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ13641064							50.00		50.00
12 ก.ค. 60	ค่าทางด่วน	0117370							30.00		30.00
17 ก.ค. 60	ค่าเดินทาง	ศ17100941022544						700.00			700.00
24 ก.ค. 60	ค่าเดินทาง	T11707-03182						700.00			700.00
28 ก.ค. 60	ถ้วยใส่อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater Cup)	6007003							4,400.01		4,400.01
31 ก.ค. 60	ค่าเดินทาง	03036						600.00			600.00
2 ส.ค. 60	ค่าทางด่วน	1440221							70.00		70.00
4 ส.ค. 60	ค่าเดินทาง	168268						700.00			700.00
5 ส.ค. 60	ค่าเดินทาง	13228						1,660.00			1,660.00
9 ส.ค. 60	Thermocouple and plugs	39124109							2,436.23		2,436.23
10 ส.ค. 60	ค่าเดินทาง	03373						940.00			940.00
11 ส.ค. 60	รถอีทิตเตอร์	1659							3,445.00		3,445.00
11 ส.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ3878609							50.00		50.00
15 ส.ค. 60	ค่าจ้างชั่วคราว ป.ตรี 4 เดือน						60,000.00				60,000.00
16 ส.ค. 60	Ferrules	06553							996.17		996.17
16 ส.ค. 60	ค่าทางด่วน	ศ62931							50.00		50.00
17 ส.ค. 60	ค่าเดินทาง	03584						777.00			777.00
18 ส.ค. 60	กล่องใส่ชิ้นงานและปลั๊กตั้งเวลา	187923							348.00		348.00
	<b>รวมครั้งที่ 3</b>						60,000.00		15,862.00	22,053.06	96,692.86
ครั้งที่ 4											
5 ก.ย. 60	ค่าเดินทาง	04307							950.00		950.00
12 ก.ย. 60	Heat Shield	T60-09-0002							6,741.00		6,741.00
14 ก.ย. 60	ค่าเดินทาง	04247							980.00		980.00
20 ก.ย. 60	ค่าจ้างชั่วคราว ป.ตรี 2 เดือน						30,000.00				30,000.00
20 ก.ย. 60	ค่าวิเคราะห์ชิ้นงาน								200,090.00		200,090.00
21 ก.ย. 60	ลูกเต๋า								270.00		270.00
25 ก.ย. 60	ค่าทางด่วน	ศ42754							50.00		50.00
25 ก.ย. 60	โน้ตบุ้คจอเหลว								2,193.71		2,193.71
	<b>รวมครั้งที่ 4</b>						30,000.00		202,070.00	9,204.71	241,274.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำ

สังกัด วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หมายเลขโทรศัพท์ 02 329 8264 ต่อ 2182

E-mail vilailuck.si@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- ปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมเครื่องกล, University of Canterbury, ประเทศนิวซีแลนด์
- ปริญญาโทสาขาพลังงานและการจัดการ, University of Applied Sciences Offenburg, ประเทศเยอรมนี
- ปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเคมีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

### สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

- การเคลือบฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ด้วยกรรมวิธี PP-MOCVD เพื่อการใช้งานในด้านต่างๆ
- การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมและอลูมินาในงานต่างๆ

### ประสบการณ์

- พ.ศ.2557-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ ที่วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประเทศไทย
- พ.ศ.2560-2561 หัวหน้าภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประเทศไทย
- พ.ศ.2554-2557 วิศวกรอาวุโสที่บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด, ประเทศไทย
- พ.ศ.2553-2554 ผู้ช่วยวิจัยที่ University of Canterbury ประเทศนิวซีแลนด์
- พ.ศ.2550-2552 ผู้ช่วยสอนที่ University of Canterbury ประเทศนิวซีแลนด์
- พ.ศ.2547-2548 ช่างเทคนิคที่บริษัท คลาเรียนท์ เคมิคอลซ (ประเทศไทย) จำกัด, ประเทศไทย
- พ.ศ.2544-2545 วิศวกรที่บริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด, ประเทศไทย

### ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

1. การศึกษาความทนทานต่อการสึกหรอของฟิล์มอลูมินาและไทเทเนียมบนใบพัดสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร โดยใช้กระบวนการ PP-MOCVD ซึ่งได้รับทุนจาก Advanced Energy and Materials System Laboratory, ประเทศนิวซีแลนด์ (พ.ศ. 2553-2554)
2. การศึกษาความสม่ำเสมอของฟิล์มไทเทเนียมบางบนตัวอย่างสามมิติขนาดไมโครเมตรและนาโนเมตร โดยใช้กระบวนการ PP-MOCVD ซึ่งได้รับทุนปริญญาเอกจาก University of Canterbury, ประเทศนิวซีแลนด์ (พ.ศ. 2550-2553)
3. การผลิตไฮโดรเจนจากกรดไขมันระเหยในน้ำเสียจากการเกษตรโดยใช้แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน ซึ่งได้รับทุนจาก Technical University of Denmark, ประเทศเดนมาร์ก (พ.ศ. 2548-2549)

### งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. **Siriwongrungson, V.**, Krumdieck, S., Alkai, M., Conformality Investigation of Titanium Dioxide Thin Films on 3-D Micrometer- and Nanometer-scale Features by Pulsed-Pressure Metal-organic CVD, *Chemical Vapor Deposition*, 17 (2011) 1-11.
2. Krumdieck, S., **Siriwongrungson, V.**, Reyngoud, B., Barnett, A., Bio-integration Ceramics on 3D Specimens by Pulsed-Pressure Metal-Organic CVD, *Chemical Vapor Deposition*, 16 (2010) 15-18.
3. **Siriwongrungson, V.**, Krumdieck, S.P., Alkai, M.M., Pulsed-Pressure MOCVD Processing Investigation for TiO<sub>2</sub> Films on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Substrate from TTIP, *ECS Transactions*, 25 (2009) 987-990.
4. **Siriwongrungson, V.**, Alkai, M., Krumdieck, S., Step coverage of thin titania films on patterned silicon substrate by pulsed-pressure MOCVD, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2007) 8944-8949.
5. **Siriwongrungson, V.**, Zeng, R.J., Angelidaki, I., Homoacetogenesis as the alternative pathway for H<sub>2</sub> sink during thermophilic anaerobic degradation of butyrate under suppressed methanogenesis, *Water Research*, 41 (2007) 4204-4210.

## ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ ชุ่มชื่น

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์พิเศษ

สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และหัวหน้าศูนย์วิจัยน้ำและภูมิอากาศ

โทรศัพท์: 02 988 3666 ต่อ 3219

E-mail siriluk@mut.ac.th

## **ประวัติการศึกษา**

- ปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, University of New South Wales, ประเทศออสเตรเลีย
- ปริญญาโทสาขาการพัฒนแหล่งน้ำ, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, ประเทศไทย
- ปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมชลประทานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย

## **สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**

- การวัดปริมาณฝนจากข้อมูลเรดาร์, ทำนายฝนโดยใช้เรดาร์, การทำนายฝน, การประยุกต์ใช้ข้อมูลเรดาร์ในแบบจำลอง น้ำฝน-น้ำท่า
- การศึกษาความเหมาะสมของโครงการป้องกันน้ำท่วมและออกแบบระบบระบายน้ำ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานทางด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำ
- ระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วม
- การประกันภัยพืชผลเนื่องจากภัยธรรมชาติ, การประเมินความเสียหายของการเพาะปลูกเนื่องจากภัยแล้งและโดยวิธีการใช้ดัชนีภูมิอากาศ
- การบริหาร โครงการ
- การวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านอุทก-อุทกวิทยา

## **ประสบการณ์**

พ.ศ.2555-ปัจจุบัน	บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด ตำแหน่ง กรรมการบริหาร/ผู้เชี่ยวชาญด้านอุทกวิทยา/อุทกภัย/ภัยแล้ง
พ.ศ.2543-ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พ.ศ.2554-ปัจจุบัน	ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยน้ำและภูมิอากาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พ.ศ.2550-2551	บริษัท แอสตีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด

	ที่ปรึกษาพิเศษ ผู้เชี่ยวชาญด้านอุตุ-อุทกวิทยา การพยากรณ์ฝน และการวิเคราะห์ความเสี่ยงน้ำท่วม
พ.ศ.2547-2548	บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด
	ที่ปรึกษาพิเศษ ผู้เชี่ยวชาญด้านอุตุ-อุทกวิทยา และการพยากรณ์ฝน
พ.ศ.2539-2540	บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเมนท์ จำกัด
	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
พ.ศ.2537-2538	บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด
	วิศวกรแหล่งน้ำ

**ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ**

1. ผู้เชี่ยวชาญด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยร่วมดำเนินการโครงการวิจัยกับ ศูนย์วิจัยและพัฒนา วิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการความเป็นไปได้ และความถี่ของการเกิดอุทกภัย/ดินถล่มจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ/ภาวะโลกร้อน: พื้นที่ศึกษา ภาคเหนือ”ซึ่งได้รับทุนวิจัยจาก กรมทรัพยากรน้ำโดยรับผิดชอบวิจัยในหัวข้อ “การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย” (พ.ศ. 2556-2557)
2. หัวหน้าคณะวิจัยใน โครงการวิจัยเรื่อง “โครงการประเมินปริมาณน้ำฝนด้วยเรดาร์ภาคเหนือ” ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร(พ.ศ. 2555-2556)
3. หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการจัดทำแผนที่ความถี่และความลึกของน้ำท่วมในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ตอนล่าง” มีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผน, คิดค้นระเบียบวิธีการวิจัยวิเคราะห์ผลการวิจัย และบริหารโครงการ ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานอัตรเบียบประกันวินาศภัย (พ.ศ. 2555)
4. ผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินและคาดการณ์ปริมาณน้ำฝน โดยร่วมดำเนินโครงการวิจัยกับภาควิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในโครงการวิจัยเรื่อง “การบูรณาการข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยาในลุ่มน้ำชี-มูลเพื่อจัดทำระบบช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการวิกฤติน้ำท่วม และดินถล่ม” ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โดยรับผิดชอบวิจัยในหัวข้อ “การประเมินฝนและทำนายฝนโดยใช้ข้อมูลเรดาร์” (พ.ศ. 2554-2556)
5. หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “โครงการสำรวจความรู้ความเข้าใจเรื่อง ประกันภัยพืชผลและประเมินความพึงพอใจของเกษตรกรตามโครงการประกันภัยข้าวนาปี พ.ศ.2554” ซึ่งได้รับทุนจากสำนักงานเศรษฐกิจการคลัง (พ.ศ. 2554)

6. หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ดัชนีภูมิอากาศ และแผนที่เสี่ยงภัยแล้งและแผนที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมของพื้นที่โครงการนำร่องที่มีความรุนแรงต่างๆ ตามดัชนีภูมิอากาศ” ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากกรมส่งเสริมการเกษตร (พ.ศ. 2553-2554)
7. หัวหน้าคณะวิจัยในโครงการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ประเมินผลการปฏิบัติการฝนหลวงกรณีศึกษา: การประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์ตรวจอากาศ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย” ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร (พ.ศ. 2552-2553)
8. นักวิจัย โดยได้รับทุน Visiting research fellowshipsจาก มหาวิทยาลัย New South Wales เพื่อร่วมทำวิจัย ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย New South Wales ประเทศออสเตรเลีย ในหัวข้อเรื่อง “Application of weather radar data for evaluating effectiveness of cloud seeding” (ตุลาคม พ.ศ. 2552)
9. หัวหน้าคณะวิจัยในโครงการวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ประเมินผลการปฏิบัติการฝนหลวง กรณีศึกษา: การประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์ตรวจอากาศ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย” ซึ่งได้รับทุนวิจัยจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร (พ.ศ. 2550-2551)
10. นักวิจัย โดยได้รับทุน Visiting research fellowshipsจาก มหาวิทยาลัย New South Wales เพื่อร่วมทำวิจัย ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย New South Wales ประเทศออสเตรเลีย ในหัวข้อเรื่อง “A Storm Classification Approach for Real-Time Radar Rainfall Estimation” (ตุลาคม พ.ศ.2550)

#### งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

##### - วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. Hanchoo Wong, R., Weesakul, U. and **Chumchean, S.**, (2012) “Bias Correction of radar estimates based on geostatistical technique”. *Journal ScienceAsia*, Vol.38, pages 373-385.
2. Lowanichchai, S., Weesakul, U., Chatdarong, V., **Chumchean, S.** (2010). Application of the Multi-resolution Viscous Alignment (MVA) Technique on Hourly Radar Rainfall Estimation”. *Journal ScienceAsia*, Vol.36, pages 59-67.
3. Mapium, P., Sriwongsitanon, N., **Chumchean, S.**, and Sharma, A. (2009). “Effect of rain-gage temporal resolution on the specification of a Z-R relationship”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 26, pages 1302-1314.
4. **Chumchean, S.**, Seed, A. and Sharma, A. (2008). “A storm classification approach for real time radar rainfall estimation” *Journal of Hydrology*, Vol. 363, pages 1-17.

5. **Chumchean, S.,** Seed, A. and Sharma, A. (2006). “Correcting of radar mean field bias using Kalman filtering approach” *Journal of Hydrology*, Vol.317, pages 123-137.
  6. **Chumchean, S.,** Sharma, A. and Seed, A. (2006). “An integrated approach to error correction for real-time radar rainfall estimation”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.23, No. 1, pages 67-79.
  7. **Chumchean, S.,** Seed, A. and Sharma, A. (2004). “Application of scaling in radar reflectivity for correcting range dependent bias in climatological radar rainfall estimates”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 1545-1556.
  8. **Chumchean, S.,** Sharma, A. and Seed, A. (2003). “Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration”. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 28, pages 27-39.
- การประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ
1. **Chumchean, S.,** Lertlum, C., Maporn, N. and Kammalet, S. (2014) “Managing Future Flood Risk in Thailand”, *Asia 2014 - Fifth International Conference on Water Resources and Renewable Energy Development in Asia*, Colombo, Sri Lanka, 11-13 March 2014.
  2. **Chumchean, S.** and Euwangso, P. (2013) “Quantitative Precipitation Estimation Based on Dual Polarization Radar”. *6th conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, Seoul, Korea, 19-21 August 2013.
  3. Bunthai, W. and **Chumchean, S.** (2013) “The Appearance of Effects of Cloud Seeding on Rainfall Occurring”. *6th conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, Seoul, Korea, 19-21 August 2013.
  4. **Chumchean, S.** and Bunthai, W. (2011) “Testing Efficacy of Rainmaking Activities in the Northeast of Thailand”. *10th WMO Scientific Conference on Weather Modification, Bali, Indonesia, 4-7 October 2011.*
  5. **Chumchean, S.,** Hanchoo Wong, R. and Bunthai, W. (2010) “Comparison between Rainmaking and Natural Rainfall in the Northeast of Thailand”. *Proc., 5th conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, Hanoi, Veitnam.

6. Bunthai, W. and **Chumchean, S.** (2010) “Study of Characteristic Differences between Natural and Cloud-Seeding Rain-Cells Using Radar Data”. *Proc., 5th conference of Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources*, Hanoi, Veitnam.
7. **Chumchean, S.**, Aungsuratana P., Khommuang A. and Hanchoo Wong R. (2009) “Study of Rain-Cloud Characteristics Using Weather Radar Data”. *Proc., 18th MODSIM 2009 Congress*, Cairns, Australia.
8. Mapiam, P.P., Sharma, A., **Chumchean, S.**, Sriwongsitanon N. (2009) “Runoff Estimation Using Radar and Rain Gage Data”. *Proc., 18th MODSIM 2009 Congress*, Cairns, Australia.
9. **Chumchean, S.**, Seed, A. and Sharma, A. (2008) “A storm classification approach for real-time radar rainfall estimation”. *Proc., International Symposium on Weather Radar and Hydrology 2008*, Grenoble, France.
10. Seed, A., Leahy, P, Duthie, E and **Chumchean, S.** (2008) “Rainfields: The Australian Bureau of Meteorology System for Quantitative Precipitation Estimation, and It’s Use in Hydrological Modelling” *Proc., Water Down Under 2008*, Australia.
11. **Chumchean, S.**, Einfalt, T. and Pahonepipat, K. (2007) “Quantitative rainfall estimation for Bangkok metropolitan area using C-band minimax radar”, AOGS2007, *4th Annual Assembly of Asia and Oceania Geosciences Society*, 30 July – 4 August 2007, Bangkok, Thailand.
12. Einfalt, T. and **Chumchean, S.** (2007) “Influence of raingauge data quality on adjustment of radar data”, AOGS2007, *4th Annual Assembly of Asia and Oceania Geosciences Society*, 30 July – 4 August 2007, Bangkok, Thailand.
13. **Chumchean, S.**, Einfalt, T., Vibulsirikul, P. and Mark, O. (2005) “To Prevent Floods in Bangkok: An operational radar and RTC application – Rainfall forecasting”, *Proc., 10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark.
14. **Chumchean, S.**, Seed, A. and Sharma, A. (2004). “Correcting of radar mean field bias using Kalman filtering approach”, *Proc., 6th International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, Melbourne, Australia.
15. **Chumchean, S.**, Seed, A. and Sharma, A. (2003). “Effect of storm types on radar rainfall estimates”, *Proc., MODSIM 2003 Congress*, Townsville, Australia, 1, pp 136-141.

16. **Chumchean, S.**, Seed, A. and Sharma, A. (2003). "Effect of radar beam geometry on radar rainfall estimation", IAHS Publ. no. 282, *Proceeding of the IUGG2003: Information from Weather Radar and Distributed Hydrological Modelling*, Sapporo, Japan.
17. **Chumchean, S.**, and Sharma, A. (2002). "Uncertainty in radar rainfall calibration: Effect of range from the radar site", *Proc., 27th Hydrology and Water Resources Symposium of the Institution of Engineers*, Melbourne, Australia.
18. **Chumchean, S.**, and Sharma, A. (2001). "Comparison of calibration algorithms for estimation of rainfall using weather radar", *Proc., MODSIM 2001 Congress*, Canberra, Australia, 1, 275-280.

- การประชุมวิชาการในระดับชาติ

1. Hanchoo Wong, R., **Chumchean, S.** and Bunthai, W., (2014) "Increasing of accuracy of hourly radar rainfall estimation". *19th National Convention in Civil Engineering*, 14-16 May 2014, Khon Kaen, Thailand.
2. Euwangso, P. and **Chumchean, S.** (2013) "Quantitative Precipitation Estimates Based on Dual-Polarization Radar", *18th National Convention in Civil Engineering*, 8-10 May 2013, Chiang Mai, Thailand.
3. **Chumchean, S.**, Hanchoo Wong, R. and Bunthai, W. (2012) "Analysis of Flood Hazard Map at Different Severity Levels Case Study : Muang District of Khon Kaen Province", *17th National Convention in Civil Engineering*, 9-11 May 2012, Udonthani, Thailand.
4. Bunthai, W. and **Chumchean, S.** (2012) "Reviewing of Methods to Evaluate Effectiveness of Rainmaking Activities", *17th National Convention in Civil Engineering*, 9-11 May 2012, Udonthani, Thailand.
5. Ninprom S., and **Chumchean, S.** (2012) "An Application of Satellite Images for Flood Depth in Bangkok Metropolitan Area", *17th National Convention in Civil Engineering*, 9-11 May 2012, Udonthani, Thailand.
6. **Chumchean, S.** and Hanchoo Wong, R. (2011) "Analysis of Drought Risk Maps for Rainfed Rice-Growing" *Proc., 16th National Convention in Civil Engineering*, Pattaya, Thailand.

7. Chuton, W. and **Chumchean, S.** (2011) “Application of Weather Radar Data for Runoff Estimation Case Study : Lamthakong Basin” *Proc., 16th National Convention in Civil Engineering*, Pattaya, Thailand.
8. Wangnaikul, A. and **Chumchean, S.** (2011) “Study of relationships between upper air data and rainfall characteristics” *Proc., 16th National Convention in Civil Engineering*, Pattaya, Thailand.
9. **Chumchean, S.** and Hanchoo Wong, R. (2010) “Adjustment of Radar Rainfall Using Rain Gauge Measurement” *Proc., 15th National Convention in Civil Engineering*, Ubol-Ratchathane, Thailand.
10. Hanchoo Wong, R., **Chumchean, S.** and Weesakul, U., (2010) “Range Dependent Errors in Radar Rainfall Estimations” *Proc., 15th National Convention in Civil Engineering*, Ubol-Ratchathane, Thailand.
11. Bunthai, W. and **Chumchean, S.** (2010) “Characteristic Differences between Natural and Rainmaking Rain-Cloud. *Proc., 15th National Convention in Civil Engineering*, Ubol-Ratchathane, Thailand. **Chumchean, S.**, Hanchuwong, R. and Hommuang, A. (2009) “Variation of Z-R relationships of different rain-cloud types”. *Proc., 14th National Convention in Civil Engineering*, Nakorn-Ratchasima, Thailand.
12. Hommuang, A and **Chumchean, S.** (2009) “Study of criteria for classifying cloud types using weather radar data”. *Proc. 14th National Convention in Civil Engineering*, Nakorn-Ratchasima, Thailand.
13. Ninprom S., and **Chumchean, S.** (2009) “Effectiveness of bias adjustment technique to reduce errors in MM5 rainfall forecasting on flood forecasting results of the Upper Ping river basin”. *Proc., 14th National Convention in Civil Engineering*, Nakorn-Ratchasima, Thailand.
14. Ninprom S., and **Chumchean, S.** (2008), “Study of adjustment methods to reduce errors in MM5 rainfall forecasting results using information from rain gauge data”, *Proc., 13th National Convention in Civil Engineering*, Pattaya, Thailand.
15. **Chumchean, S.** (2007), “Investigation of climatological Z-R Relationship for Pachijareon Radar”, *Proc., 2nd National Convention in water resources engineering*, Bangkok, Thailand.
16. Einfalt, T. and **Chumchean, S.** (2007) “Influence of raingauge data quality on adjustment of radar data”, AOGS2007, *4th Annual Assembly of Asia and Oceania Geosciences Society*, 30 July – 4 August 2007, Bangkok, Thailand.

17. **Chumchean, S.** (2006). “Effect of raingauge quality control on radar rainfall estimation”, *Proc., 11th National Convention in Civil Engineering, Phuket, Thailand.*
18. **Chumchean, S.** and Einfalt, T. (2005). “Real-time radar rainfall estimation for Bangkok Metropolitan area”, *Proc., 10th National Convention in Civil Engineering, Thailand.*

