

การศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์
ในการบำบัดน้ำเสีย

Investigation of Photocatalysis of Titania
For Wastewater Treatment



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการบำบัดน้ำเสีย

Investigation of Photocatalysis of Titania

For Wastewater Treatment



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 147132
รับเดือนปี... 3 ก.ค. 2560

๕๕๘๔๙๙๙
b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Investigation of Photocatalysis of Titania For Wastewater Treatment



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
(MANUFACTURING SYSTEM ENGINEERING)

DEPARTMENT OF MANUFACTURING SYSTEM TECHNOLOGY
COLLEGE OF ADVANCED MANUFACTURING INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการ
บำบัดน้ำเสีย

Investigation of Photocatalysis of Titania for Wastewater
Treatment

ชื่อนักศึกษา

นางสาว โสมนันท์ ชนภิญโญ รหัสนักศึกษา 55120040

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)

ภาควิชา

เทคโนโลยีระบบการผลิต

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
(วิศวกรรมระบบการผลิต) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ ประธานกรรมการ	ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ
ดร.วรวิฑูรี มรรคเจริญ กรรมการ	ดร.วรวิฑูรี มรรคเจริญ
ดร.ฉัตรพล ภาคศิริ กรรมการ	ดร.ฉัตรพล ภาคศิริ
ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์
ในการบำบัดน้ำเสีย
Investigation of Photocatalysis of Titania for Wastewater
Treatment

ชื่อนักศึกษา นางสาว โสมนันท์ ธนภิญโญ รหัสนักศึกษา 55120040

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)

ภาควิชา เทคโนโลยีระบบการผลิต

มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) บนสแตนเลสและกระจก สไลด์ด้วยเทคนิคดีซีสปัตเตอร์ริง เพื่อศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน (O_2) ในช่วง ความเข้มข้น 5% ถึง 20% ต่อการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางผลึก ของฟิล์มด้วยเทคนิค XRD ความหนาและลักษณะพื้นผิวศึกษาด้วยเทคนิค AFM และการเกิดปฏิกิริยา การเร่งด้วยแสงด้วยค่าการดูดซับแสงที่ทดสอบด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer ผลการศึกษา พบว่า สีของฟิล์มที่เคลือบได้มีทั้งหมด 4 สี ได้แก่ ม่วง เหลือง ฟ้า และฟ้าอ่อน สำหรับฟิล์มที่เคลือบที่ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน 5, 10, 15 และ 20% ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกว่าอัตราการเติบโตของ ฟิล์มที่มีปริมาณร้อยละออกซิเจนต่ำสุดจะมีการเติบโตของฟิล์มสูงสุด ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึก แบบอะนาเทส ค่าการดูดซับแสง(Absorbance) ที่ทำการวัดโดยใช้เทคนิค UV-VIS เมื่อเวลา 3 ชั่วโมง พิจารณาที่ความยาวคลื่น(Wavelength) 650 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มี ความเข้มข้นของออกซิเจน 5%, 10%, 15% และ 20% สามารถวัดค่าการดูดซับแสงได้เท่ากับ 0.1159, 1.0983, 1.0136, 1.1507 และ 1.0701 ตามลำดับ โดยผลการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงที่ ดีที่สุดคือ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณออกซิเจน 15% ซึ่งมีค่าการดูดซับแสงน้อยที่สุด

คำสำคัญ กระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส, การเคลือบฟิล์มบาง, เทคนิคดีซี สปัตเตอร์ริง, ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์, อนาเทส

Title Investigation of Photocatalysis of Titania for Wastewater Treatment

Students Miss Sommanan Tanapinyo Student ID 55120040

Degree Bachelor of Engineering
(Manufacturing System Engineering)

Department Manufacturing System Technology

Faculty College of Advanced Manufacturing Innovation

University King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

Academic Year 2015

Advisor Dr.Vilailuck Siriwongrungson

ABSTRACT

In this study, titanium dioxide (TiO_2) thin films were deposited on stainless steel by DC sputtering technique. The effect of oxygen gas (O_2) concentration range from 5% to 20% on the photocatalysis was investigated. The crystal structure was characterized by XRD technique. The thickness and surface morphology of as-deposited thin films were evaluated by AFM technique and the photocatalysis was estimated by UV-VIS technique. The results show that the as-deposited films have 4 colors: purple, yellow, sky blue and light blue following oxygen concentration of 5, 10, 15 and 20% respectively. This implies that the growth rate of the film at the lowest oxygen concentration is the highest value. The crystallite structure of the as-deposited films was anatase. The absorbance value measured by UV-VIS technique at 3 hours; at wavelength 650 nanometer were 0.1159, 1.0983, 1.0136, 1.1507 and 1.0701 for the titanium dioxide (TiO_2) thin films with the concentration of oxygen gas (O_2) 5%, 10%, 15% and 20%, respectively. The best photocatalysis effect is the Titanium Dioxide deposited at the oxygen concentration of 15%.

Keyword Photocatalysis, Coating, Thin film, Titanium dioxide, DC sputtering, Anatase

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาพนธ์ รวมถึง ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญาพนธ์เล่มนี้ อีกทั้งยังช่วย แก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย นอกจากนี้ขอบพระคุณ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยให้ กำลังใจและคำปรึกษาเพิ่มเติม

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ตรวจสอบเอกสาร และให้คำปรึกษามาด้วยดีตลอด สุดท้ายนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



โสมนันท์ ธนภิญโญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูปภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาขอโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 กรอบแนวคิด/ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)....	3
2.1.2 ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect).....	8
2.1.3 กระบวนการสปีดเตอริงและการเคลือบฟิล์มบาง.....	10
2.1.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM).	13
2.1.5 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer).....	14
2.1.6 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD).	14
2.1.7 Methylene Blue.....	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	18
3.1 กำหนดการและระยะเวลาในการดำเนินการ.....	18
3.2 เครื่องมือและหลักการในการทดลอง.....	19
3.3 หลักวิธีการทดลองและการวัดผล.....	28

3.4	ระยะเวลาในการทดลอง.....	31
3.5	วิธีการทดลอง.....	31
บทที่ 4	ผลและการอภิปรายผล.....	35
4.1	ผลจากการปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	35
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	45
5.1	สรุปผล.....	45
5.2	ปัญหาในการทำโครงการ.....	45
5.3	ข้อเสนอแนะในการแก้ไขและพัฒนา.....	46
เอกสารอ้างอิง.....		47



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
3.1	แสดงกำหนดการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	18
4.1	แสดงค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระจกสไลด์	37
4.2	แสดงค่าความขรุขระและค่ามุมสัมผัส.....	31



สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1 (ก)	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์(อะนาเทส).....	5
2.1 (ข)	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์(รูไทล์).....	5
2.1 (ค)	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์(บรูคไคต์).....	5
2.2	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	8
2.3	กระบวนการสปัตเตอร์ริงเชิงฟิลิกส์.....	11
2.4	ชุดเครื่องมือเคลือบฟิล์มบาง ดีซี สปัตเตอร์ริง.....	13
2.5	โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	15
3.1	เครื่องสปัตเตอร์ริงแบบ DC Magnetron Sputtering.....	19
3.2	ส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ.....	20
3.3	องค์ประกอบหลักของเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง.....	21
3.4	เครื่อง Regulation Control Unit.....	22
3.5	แสดงส่วนประกอบเครื่องควบคุมการป้อนแก๊ส.....	23
3.6	เครื่อง Control Unit.....	24
3.7	ระบบหล่อเย็น.....	25
3.8	เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance ของBruker.....	26
3.9	เครื่อง Atomic Force Microscope MODEL (AFM) :Park system XE 100	26
3.10	เครื่องวัดค่ามุมสัมผัส (Contact Angle).....	27
3.11	เครื่อง UV-VIS Spectroscopy HITACHI รุ่น U2900.....	27
3.12	กระจกสไลด์.....	29
3.13	ชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบคือSS304.....	29
3.14	อุปกรณ์และสารละลายในการทดสอบปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง.....	30
3.15	นำกระจกสไลด์และชิ้นงาน SS304 วางในChamber.....	31
3.16	การหยดน้ำลงบนชิ้นงานเพื่อทดสอบวัดค่ามุมสัมผัส.....	32
3.17	เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ให้มีความเข้มข้น 5mg/l โดยใส่บีกเกอร์ละ 40ml	33
3.18	การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้เมทิลีนบลู.....	34
3.19	ชุดการทดลองในกล่องดำ.....	34
4.1	XRD patterns of untreated 304 SS.....	35

4.2	แสดงผลสัญญาณ XRD ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนต่างกัน.....	36
4.3	ชิ้นงานที่ปลูกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนก๊าซออกซิเจน 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ.....	36
4.4 (ก)	แสดงขนาดของเกรนและลักษณะความขรุขระพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) ที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน 5%.....	37
4.4 (ข)	แสดงขนาดของเกรนและลักษณะความขรุขระพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน 10%.....	38
4.4 (ค)	แสดงขนาดของเกรนและลักษณะความขรุขระพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน 15%.....	38
4.4 (ง)	แสดงขนาดของเกรนและลักษณะความขรุขระพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นก๊าซออกซิเจน 20%.....	38
4.5 (ก)	แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจน 5%.....	39
4.5 (ข)	แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจน 10%.....	39
4.5 (ค)	แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจน 15%.....	40
4.5 (ง)	แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ปริมาณออกซิเจน 20%.....	40
4.6	แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	42
4.7	แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	43
4.8	แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	43

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีความสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ได้มีการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การแพทย์ วิศวกรรม เกษตรกรรม เทคโนโลยีชีวภาพ เคมีคลินิก และทางเคมี วัสดุนาโนนี้คือวัสดุที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-100 นาโนเมตรที่สังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีนาโนนั่นเอง ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นหนึ่งในบรรดาวัสดุที่สามารถสังเคราะห์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้และจัดเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ยินนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารเคลือบในสีทาอาคาร ใช้เคลือบสิ่งทอ เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ไอออน ส่วนประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้เป็นตัวตรวจจับไอของแก๊สไฮโดรเจน เป็นวัสดุในการแลกเปลี่ยนไอออน และสามารถกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อโรคบางชนิดได้ เป็นต้น สาเหตุที่มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 eV เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงานจะเกิดอิเล็กตรอนกับช่องว่างอิเล็กตรอน (Hole) และสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ทำให้สามารถย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ จึงมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการบำบัดน้ำเสียภายใต้แสง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสและรูไทล์ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงมากกว่าบรูคไคต์เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอน-ช่องว่างอิเล็กตรอนน้อยกว่าบรูคไคต์และมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงกว่าบรูคไคต์ นอกจากนี้พบว่าถ้ามีการเจือด้วยออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ประเภทต่างๆจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่ว่องไว (Active site) เกิดจากตำหนิในโครงสร้างของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ [1]

น้ำเสียเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อประชาชน ซึ่งสิ่งปนเปื้อนในน้ำและน้ำเสียจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และเชื้อโรค เนื่องจากสารอินทรีย์บางชนิดมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี สารอนินทรีย์บางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ จึงทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหรือโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalyst) ที่เป็นที่นิยมมากที่สุดตัวหนึ่งในด้านสิ่งแวดล้อมคือไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียหรือ TiO_2 เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ เช่น ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ไม่เอ็กสพลัยน้ำ เกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดี มีความเสถียรทางเคมี และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [2] ในด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาคุณสมบัติโครงสร้างทางผลึกของฟิล์มกับปริมาณความเข้มข้นออกซิเจน ในการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคดีซี สปีดเทอริง
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ กับคุณสมบัติโครงสร้างทางผลึกผ่านการกำจัดสารอินทรีย์หรือเชื้อโรคบางชนิดที่ปนเปื้อนมากับน้ำ

1.3 กรอบแนวคิด/ขอบเขตของโครงการ

- 1) สังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคดีซี สปีดเทอริง โดยเปลี่ยนปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการ จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้
- 2) เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จะกระทำลงบนชิ้นงานสองประเภท คือกระจกสไลด์และเหล็กกล้า SS304
- 3) ทดสอบสมบัติโครงสร้างผลึกของฟิล์ม เช่น เฟส มุมสัมผัส ความขรุขระ ขนาดของผลึก ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM), เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer: XRD) และ เครื่องวัดมุมสัมผัส Contact angle
- 4) ทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (โฟโตแคตาไลติก) ในการกำจัดสีย้อม โดยการใช้เมทิลีนบลูซึ่งเป็นสารอินทรีย์และเปรียบเทียบกับไทเทเนียมที่ใช้ในทางการค้าคือ Degussa P25

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบชนิดของโครงสร้างทางผลึกที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ
- 2) ได้ทราบความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค ดีซี สปีดเตอริง ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายกระบวนการที่สามารถปลูกฟิล์มได้ ผู้วิจัยกล่าวถึงคุณสมบัติของ ไทเทเนียมไดออกไซด์และกระบวนการเกิดฟิล์มโดยเทคนิคดีซี สปีดเตอริง เป็นอันดับแรก จากนั้นเริ่มเข้าสู่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในอดีต

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

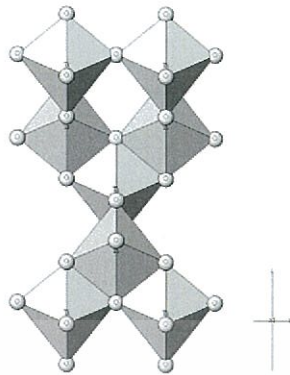
ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากมีค่าดรชนีการหักเหของแสงสูง 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 คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงรวมเนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนใน

เอกสารนี้เป็นโครงสร้างผลึกไทเทเนียจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

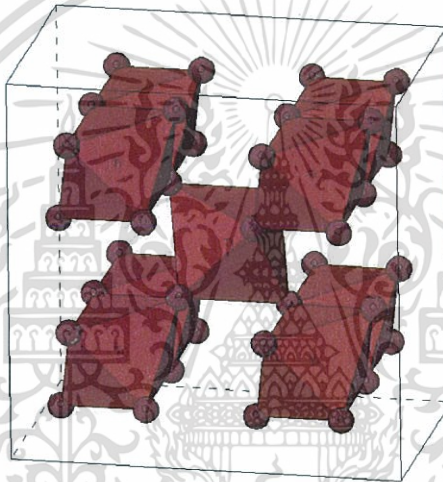
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีความยาวเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบแวลเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 2.1 คือรูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และบรูคไคต์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ตารางที่ 2.1 แสดงอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตแคตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ อัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเป็นคู่กันเช่นในระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ส่งผลให้มีการแยกของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกจากการเหนี่ยวนำ (Photo induced electron-hole pair) และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย[3]

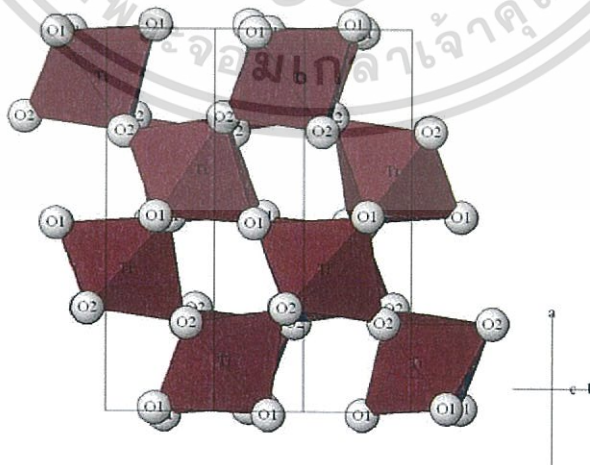
(ก) อะนาเทส



(ข) รูไทล์



(ค) บรูคไคต์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์

(ที่มา : <https://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง ไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: E.P. Meagher and G.A. Lager, The Canadian Mineralogist, 17, 77(1979).

Material name		Rutile				
Composition		TiO ₂				
System		Tetragonal				
Temperature (°C)		25				
a(Å), b(Å), c(Å)		4.593(2)	4.593(2)	2.959(2)		
α(deg), β(deg), γ(deg)		90	90	90		
Unit cell volume(Å ³)		62.42				
D _x (g/cm ³)		4.25				
Space group		P4 ₂ /mnm (No.136)				
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B(Å ²)
Ti	2a	1	0	0	0	0.42(6)
O	4f	1	0.3051(7)	0.3051(7)	0	0.6(6)

(ที่มา: E.P. Meagher and G.A. Lager, The Canadian Mineralogist, 17, 77(1979).)

Material name		Anatase				
Composition		TiO ₂				
System		Tetragonal				
Temperature (°C)		25				
a(Å), b(Å), c(Å)		3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)		
α(deg), β(deg), γ(deg)		90	90	90		
Unit cell volume(Å ³)		136.3				
D _x (g/cm ³)		3.89				
Space group		I4 ₁ /amd (No.141)				
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B(Å ²)
Ti	4a	1	0	0	0	0.390(63)
O	8e	1	0	0	0.2081(2)	0.613(90)

(ที่มา: M. Horn, C.F. Schwerdtfeger, and E.P. Meagher, Zeitschrift fur Kristallographic, 136, 273(1972).)

Material name		Brookite				
Composition		TiO ₂				
System		Orthorhombic				
Temperature (°C)		25				
a(Å), b(Å), c(Å)		9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)		
α(deg), β(deg), γ(deg)		90	90	90		
Unit cell volume(Å ³)		257				
D _x (g/cm ³)		4.13				
Space group		Pbca (No.61)				
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B(Å ²)
Ti	8c	1	0.1289(1)	0.0972(1)	0.8628(1)	0.37(3)
O1	8c	1	0.0095(4)	0.1491(5)	0.1835(5)	0.46(6)
O2	8c	1	0.2314(4)	0.1110(4)	0.5366(6)	0.53(7)

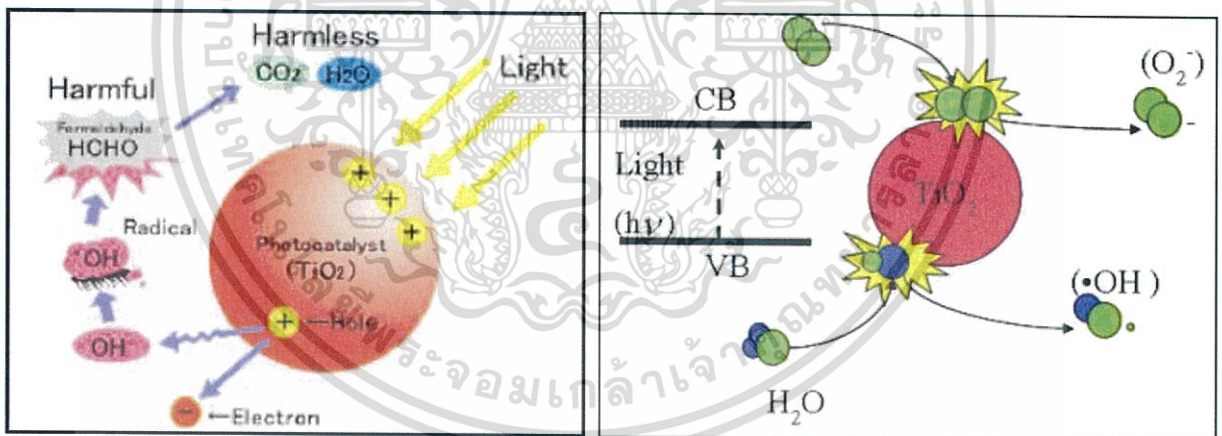
(ที่มา: E.P. Meagher and G.A. Lager, The Canadian Mineralogist, 17, 77(1979).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยองค์การนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนสวทช.) และให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตแคตะลิสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ หลักการเกิดปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติกเมื่อวัสดุโฟโตแคตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นและจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำทำให้แถบเวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวกขึ้นเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (O_2^-) ดังแสดงในสมการ (2.1) - (2.3) โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตแคตะลิสต์[5]



ไฮดรอกซิลเรดิคอลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: www.antonio.licciulli.unisalento.it)

- ปฏิกิริยาโฟโตแคลาไลติกต้องมีองค์ประกอบ คือ
 - 1) แคตาลิสต์ เช่นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
 - 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานฟotonของตัวแคตาลิสต์
 - 3) น้ำ
 - 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ อื่นๆ

เอกสารนี้เป็น รังสียูวี แสงช่วงความยาวคลื่นออกได้เป็น 3 ช่วง คือนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) คลื่นยาว (Long wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 320-400 นาโนเมตร
- 2) คลื่นยาว (Middle wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 280-315 นาโนเมตร
- 3) คลื่นยาว (Short wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 100-280 นาโนเมตร

- ชนิดของโฟโตแคตตาไลติก

โฟโตแคตตาไลติกสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตตาลิสต์ ดังนี้

- 1) โฟโตแคตตาไลติกแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitroluene โดยใช้ UV/H_2O_2
- 2) โฟโตแคตตาไลติกแบบสถานะต่าง (Heterogeneous photocatalysis) ซึ่งเป็นการกระบวนการที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO_2

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ เทคนิคโฟโตแคตตาไลติก

- 1) ความเข้มของแสง (Light intensity) การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงตัว
- 2) ปริมาณตัวแคตตาลิสต์ (Catalyst dosage) เนื่องจากตัวแคตตาลิสต์ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกเกิดขึ้นที่ผิวของแคตตาลิสต์ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณแคตตาลิสต์ก็จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกเพิ่มขึ้น
- 3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยา โฟโตแคตตาไลติกจะลดลงทั้งนี้อาจสามารถสรุปได้ในหลายๆเหตุผล นั่นคือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินเตอร์มีเดียเพิ่มขึ้นซึ่งสารพวกนี้จะเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย
- 4) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆจะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่งซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลนี้อาจทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงตัวหนึ่งตามปกติแล้วออกซิเจนมีความจำเป็นสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แบบและไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของตัวแคตตาไลสต์ มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเกิดโฟโตแคตตาไลติคออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนจนได้บทสรุปว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

- 5) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงการลดลงของ pH ในปฏิกิริยาอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 สาเหตุ คือ
 - การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออน เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับไฮลเป็นไฮดรอกซิลเรติคอลล
 - ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส
 - ผลลัพธ์สุดท้ายของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติคออกซิเดชันแต่ก็เป็นการยากที่จะสรุปรวมกว่า pH มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติคอย่างเห็นได้ชัดแต่บางสารประกอบก็มีผลน้อยมาก
- 6) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนบางตัวก็อาจจะถูกดูดติดบนผิวแคตตาไลสต์ได้ ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้จึงถือเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาดังนั้นไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส[6]

2.1.3 กระบวนการสปีดเตอริงและการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนวัสดุรองรับ โดยที่คุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์มขึ้นอยู่กับวิธีการเคลือบ การเคลือบฟิล์มบางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical vapor deposition process, CVD) เช่น วิธี Plasma CVD, MOCVD และ Laser CVD เป็นต้น และการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition process, PVD) เช่น วิธีไอออนเพลตติง (Ion plating) และวิธีสปีดเตอริง เป็นต้น[]

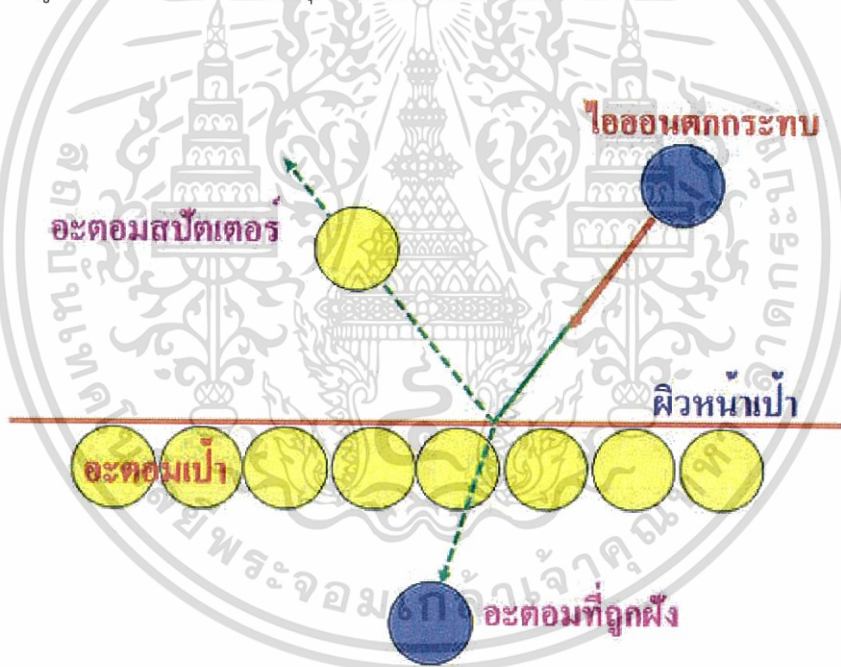
● ทฤษฎีเบื้องต้นของสปีดเตอริง

สปีดเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากการทำให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่ง

ต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสาร เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราที่สูง หรือผลิตได้จากใช้กระบวนการโกลวดิสชาร์จ (Glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC magnetron sputtering) เป็นต้น[7]

กระบวนการสปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริงเป็นผลของลำดับชั้นการชน (Collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากผิวเป้าถูกชนด้วยไอออนบวก อะตอมซึ่งเกิดเนื่องกับการชนจะเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากเป้าไม่มากนัก โดยประมาณไม่เกิน 10 อังสตรอม และอะตอมของผิวเป้าซึ่งถูกสปัตเตอร์ริงจะเป็นขั้นสุดท้ายในลำดับการชน

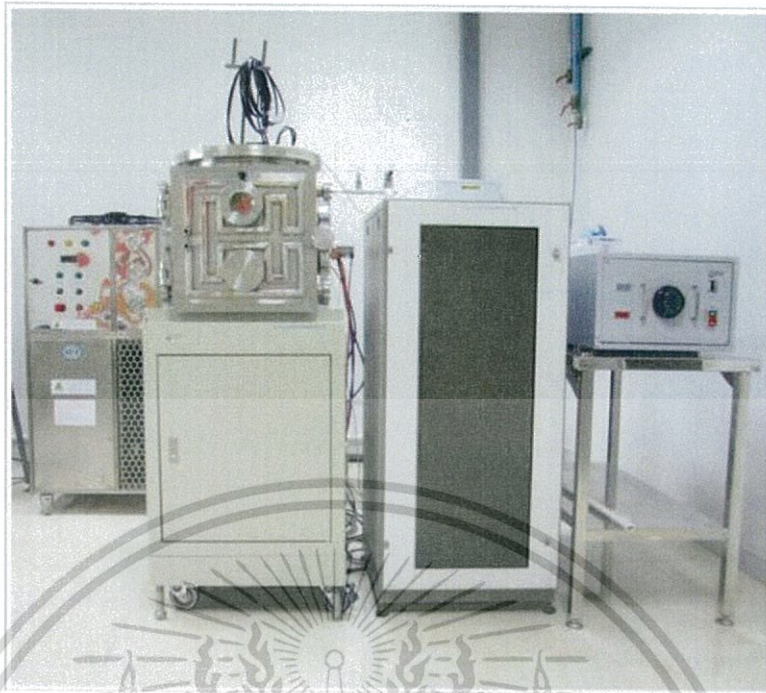


รูปที่ 2.3 กระบวนการสปัตเตอร์ริงเชิงฟิสิกส์-

อันตรกิริยาระหว่างผิวเป้าสารเคลือบกับไอออนที่วิ่งเข้าชนด้วยพลังงานต่างๆกันจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.3

1. ไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมของเป้าแบบยึดหยุ่นจะสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเป้า ซึ่งส่วนใหญ่รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบและสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นการกลางทางไฟฟ้า
2. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงมากเมื่อชนกับเป้าสารเคลือบอาจฝังตัวในเป้าสารเคลือบโดยที่ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันตรงกับพลังงานของไอออนที่เข้าชน
3. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้การปลดปล่อยอะตอมของเป้าสารเคลือบ เรียกกระบวนการนี้ว่า “สปัตเตอริง”
4. ไอออนบวกที่มีพลังงานสูงพอที่เข้าชนอะตอมของเป้า ทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้การปลดปล่อยอะตอมของเป้าสารเคลือบ รวมทั้งมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ด้วย

กลไกการถ่ายเทโมเมนตัมที่สามารถนำไปสู่การสปัตเตอริง เริ่มต้นจากไอออนบวกชนเป้า แล้วถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่นิ่ง อะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะการชนแบบพลังงานต่ำจะได้รับองค์ประกอบโมเมนตัมในแนวขนานกับผิวเป้าเป็นส่วนใหญ่จึงเคลื่อนตัวออกในแนวเฉียงด้านข้าง และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดจากผิวเป้าได้จากการชนเพียงลำดับแรก การชนกันระหว่างไอออนบวกกับอะตอมนี้เรียกว่า การชนปฐมภูมิ (Primary knock-on) ส่วนอะตอมที่ได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่จะเคลื่อนตัวลึกลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป และอาจจะสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกได้ หรือทำให้เกิดการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมเป้าสารเคลือบ จนกระทั่งทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกที่ตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถย้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด โดยเครื่องสปัตเตอริงแบบดีซี แมกนีตรอน มีลักษณะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ชุดเครื่องมือเคลือบฟิล์มบาง ดีซี สปีดเตอริง
ของศูนย์เครื่องมือวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

2.1.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว AFM สำหรับโครงการนี้ทำการวิเคราะห์เพื่อทดสอบความราบเรียบของพื้นกระจกสไลด์ และคำนวณหาความขรุขระของฟิล์มด้วยเครื่อง AFM ซึ่งมีความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบหลายแบบเช่น Contact Mode, Non contact Mode, VE-AFM / VE-DFM, Magnetic Force Microscope และ AFM, DFM in Vacuum And Control Temperature โดยการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้แบบ DFM (Dynamic Force Microscope: Non contact Mode) เป็นโหมดสำหรับวัดคุณสมบัติทางด้านกายภาพโดยที่หัววัดจะไม่สัมผัสกับผิวของตัวอย่าง เหมาะกับลักษณะผิวตัวอย่างที่อ่อนนุ่ม เช่น พอลิเมอร์ เป็นต้น สามารถวิเคราะห์หาค่า Ra (Roughness), phase Analysis, particle & grain analysis, pitch & height measurement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งาน

1. วิเคราะห์พื้นผิวโลหะ เช่น ผิวของวัสดุพวกเหล็ก อะลูมิเนียม เพื่อดูลักษณะพื้นผิวและความขรุขระ
2. วิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง เพื่อดูความขรุขระ และดูการกระจายตัวของสารเคลือบบนผิวฟิล์มบาง
3. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างทางด้านชีวภาพ เช่น ลักษณะของตัวอย่างดีเอ็นเอเมื่อมีการนำสารพวกพอลิเมอร์เข้าไปผสม หรือดูลักษณะของเซลล์แบคทีเรีย เป็นต้น
4. วิเคราะห์ความหนาของแผ่นฟิล์ม หรือวิเคราะห์ความลึกของรอยตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น วิเคราะห์ความลึกของสารเคลือบบนแว่นตา วิเคราะห์ความหนาของสารเคลือบฟิล์มในระดับนาโนเมตรของกระจกรถยนต์ เป็นต้น
5. วิเคราะห์ลักษณะของสนามแม่เหล็กบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ หรือเครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้แถบแม่เหล็กต่างๆ
6. วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ที่เคลือบเกาะบนผิวของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคไทเทเนียมนาโนบนผิวของกระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ เป็นต้น
7. วิเคราะห์ดูการกระจายตัวของสารหลายๆ ชนิดที่รวมตัวหรือกระจายตัวกันอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยสารพอลิเมอร์หลายๆ ชนิดจะสามารถเห็นการรวมตัวหรือการกระจายตัวกันของสารได้[8]

2.1.5 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง (Ultraviolet – Vis spectrophotometer)
 เครื่อง UV – Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV – Vis spectrophotometer ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV – Vis spectrophotometer โดยทั่วไปแล้ว จะมีส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติ้งหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและเครื่องตรวจทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความเข้มขั้นสี่เมทิลินบูล เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงยูวี (310 – 400 นาโนเมตร) โดยเลือกความยาวคลื่น 644 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เมทิลินบูลสามารถดูดกลืนได้[10]

2.1.6 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ มาใช้

เอกสารนี้เป็นวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้าง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งเทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ในศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึกและความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย[11]

2.1.7 Methylene Blue

เมทิลีนบลูเป็นสีพื้นฐาน (Basic dyes) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic dyes) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ นอกจากนี้พิษของเมทิลีนบลูอาจทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ และบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากระบบสปัตเตอร์ริง ในขั้นตอนเดียวแบบไม่ให้ความร้อน โดยใช้เทคนิควางวัสดุรองรับที่ตำแหน่งต่างกัน [12]ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมด้วยระบบ ดีซี รีแอคทีฟ สปัตเตอร์ริงบนกระจกสไลด์และซิลิกอนในขั้นตอนเดียว โดยไม่ให้ความร้อนกับวัสดุรองรับขณะเตรียม ภายใต้บรรยากาศของแก๊สผสมอาร์กอนกับออกซิเจน ผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งวางวัสดุรองรับมีผลอย่างยิ่งต่อลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ ฟิล์มที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (101)/รูไทล์ (110) และอนาเทส (101) ระนาบผลึกเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดเกรนความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มลดลง เมื่อวางวัสดุรองรับที่ตำแหน่งในแนวนอน (dx) เพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางแสงพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีความใสสามารถส่งผ่านแสงในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ดี การเตรียมฟิล์มไทเทเนียมเฟสอนาเทสและการประยุกต์ใช้ทำลายเชื้อแบคทีเรียโดยการฉาย [13] ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) — เตรียมลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีการเคลือบแบบรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ฟิล์มเคลือบที่ความหนาประมาณ 300 nm มีลักษณะโปร่งใส ก่อตัวเป็นผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอนาเทสเพียงเฟสเดียว โดยพื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะก่อตัวเป็นเกรนมีขนาดประมาณ 40 nm และมีความหยาบผิว (rms) ประมาณ 4 nm เมื่อศึกษาความสามารถในการทำลายเชื้อแบคทีเรียทั่วไปภายใต้แสง near-UV ที่ 0.5 mW/cm^2 ที่ความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 365 nm พบว่ากระจกที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่ากระจกที่ไม่เคลือบประมาณ 50%

สมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ แบบเจือไนโตรเจนที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง [9]ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน (N-doped TiO_2) เคลือบบนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอน ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ผลของเงื่อนไขการเคลือบ ได้แก่ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนได้ถูกศึกษา โดยสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบได้ ได้แก่ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนาและค่าการส่งผ่านแสง ผลการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับเป้าสารเคลือบกระแสไฟฟ้า และอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 nm พบว่า มีดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดับสูญ (k) เท่ากับ 2.35-2.53 และ 0.001-0.002 ตามลำดับ สำหรับค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน พบว่า มี 2 ช่วง คือ 3.15-3.20 eV (ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส) และ 2.25 eV-2.65 (ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน) โดยฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์เจือไนโตรเจนที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงสมบัติไฮโดรฟิลิกได้เมื่อสัมผัสแสงในช่วงตามองเห็น

การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตตาลิก สำหรับแบบชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลีนบลูในน้ำเสีย [6]การทดลองการกำจัดสารเมทิลีนบลูในน้ำโดยอาศัยกระบวนการโฟโตแคตตาลิก ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตตาลิสต์ โดยการศึกษา จาก Brunauer Emmett-Teller (BET) สารเมทิลีนบลูถูกใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารกับ NaOH และ HClO₄ ทำการผสมสารละลายเมทิลีนบลูในหลอด Polymerization มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจน โดยการกวนสารละลายสม่ำเสมอควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างด้วย pH-meter พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลีนบลูจาก 6.6×10^{-6} เป็น 3.6×10^{-5} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัม ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างที่ 3 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้เท่ากับ 1.79×10^4 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบไอออนของสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์, ไนเตรต และแอมโมเนีย เมื่อเพิ่มปริมาณแคตตาลิสต์จาก 0.003 เป็น 0.05 กรัม ต่อสารละลาย 75 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู 1.0×10^{-5} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแคตตาลิสต์ และจะเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณแคตตาลิสต์ถึง 0.1 กรัม



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 กำหนดการและระยะเวลาในการดำเนินการจนแล้วเสร็จ

ตารางที่ 3.1 แสดงกำหนดการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ลำดับ	หัวข้องาน (ภาคเรียนที่ 1)	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน
1	ปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษาเกี่ยวกับหัวข้อ โครงการพิเศษ	/ / / /			
2	วางแผนและเตรียมความพร้อมสำหรับการทำ โครงการพิเศษ		/ / / / / /		
3	ศึกษาและออกแบบขั้นตอนการทดลองจาก วรรณกรรมและกรอบแนวคิดต่างๆ			/ /	
4	จัดทำรูปเล่ม(บทที่ 1-3)				/ / /
5	นำเสนอโครงการพิเศษครั้งที่ 1				/

ลำดับ	หัวข้องาน (ภาคเรียนที่ 2)	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
1	เตรียมชิ้นงานโดย วิธีการดีซี สปีดเตอริง	/ / / / / / / /				
2	ทดสอบชิ้นงานโดยใช้วิธีการต่างๆ				/ / / / /	
3	บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง				/ / / /	
4	จัดทำเล่มรายงาน				/ / / /	
5	นำเสนอโครงการพิเศษ					/

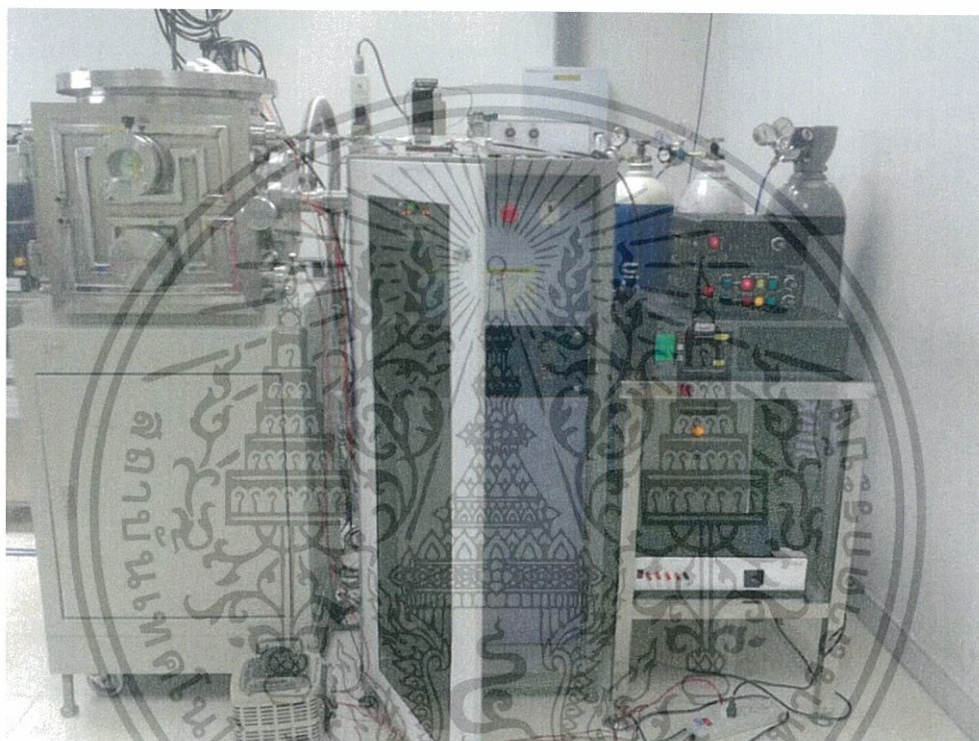
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและหลักการในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการประกอบไปด้วยเครื่องมือต่างๆดังนี้

3.2.1.1 เครื่องเคลือบฟิล์มบาง

เครื่องเคลือบฟิล์มบางในการทดลองนี้เป็นชุดเครื่องมือซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการสร้างระบบสุญญากาศ และส่วนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนีตรอน



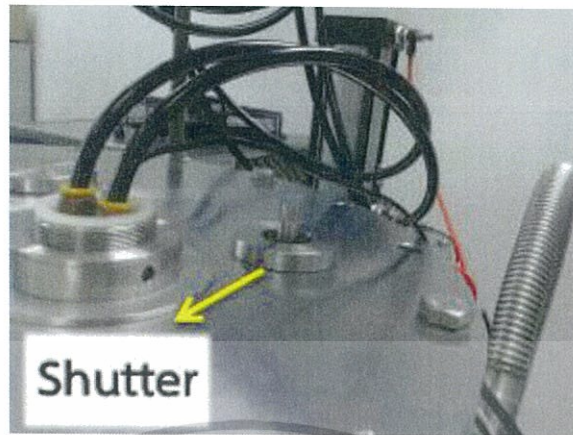
รูปที่ 3.1 เครื่องสปัตเตอริงแบบ DC Magnetron Sputtering

ส่วนประกอบของเครื่อง DC Sputtering

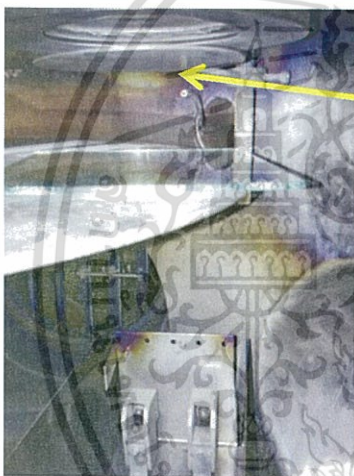
1) ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

การเคลือบฟิล์มบางจะกระทำอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าโดยมีฝาปิด/เปิดเพื่อใส่ชิ้นงานอยู่ด้านหน้า มีช่องหน้าต่างกระจกเพื่อให้สังเกตดูระหว่างกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อสามารถควบคุมการทำงานระหว่างกระบวนการได้ มีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.2

(ก) ด้านบนของภาชนะสุญญากาศ

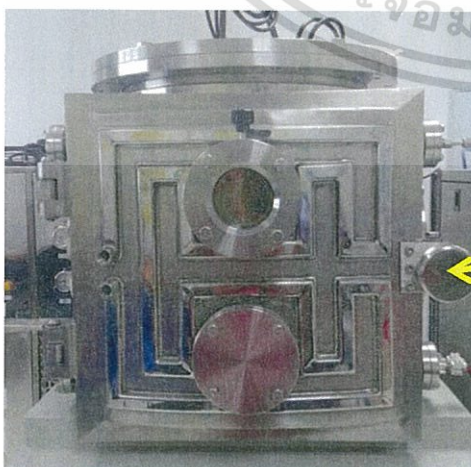


(ข) ส่วนประกอบภายในภาชนะสุญญากาศ



ถ้าปิดชัตเตอร์จะมีแผ่นมาบัง
ระหว่างชิ้นงานกับ Target

(ค) ด้านหน้าของภาชนะสุญญากาศ



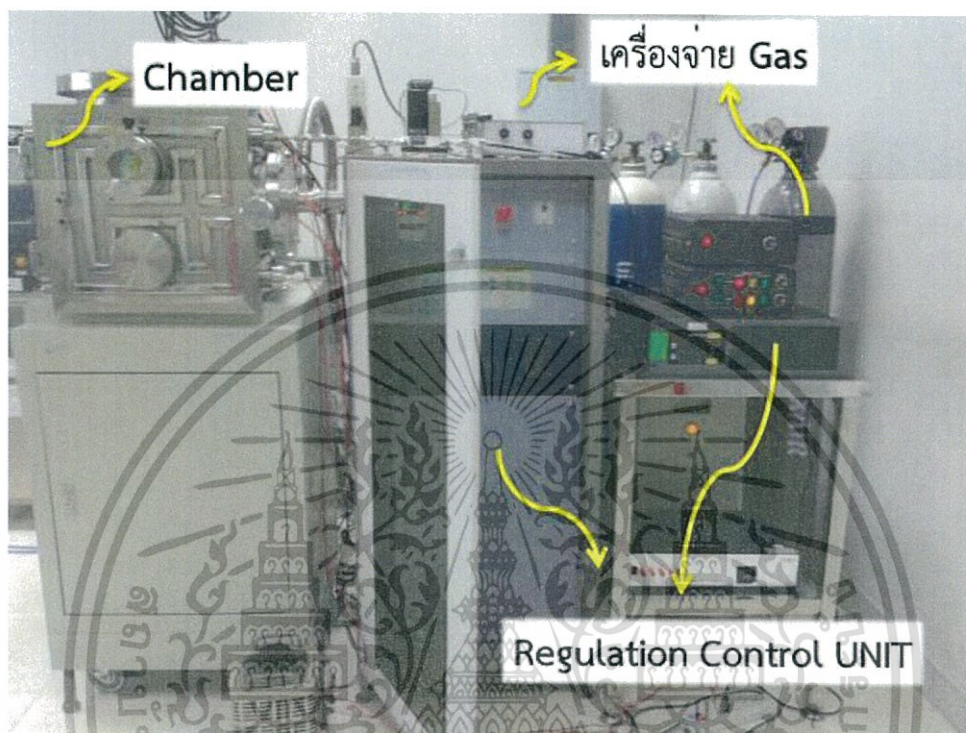
ที่ล็อก Chamber

รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระบบเครื่องสูบลูสุญญากาศ

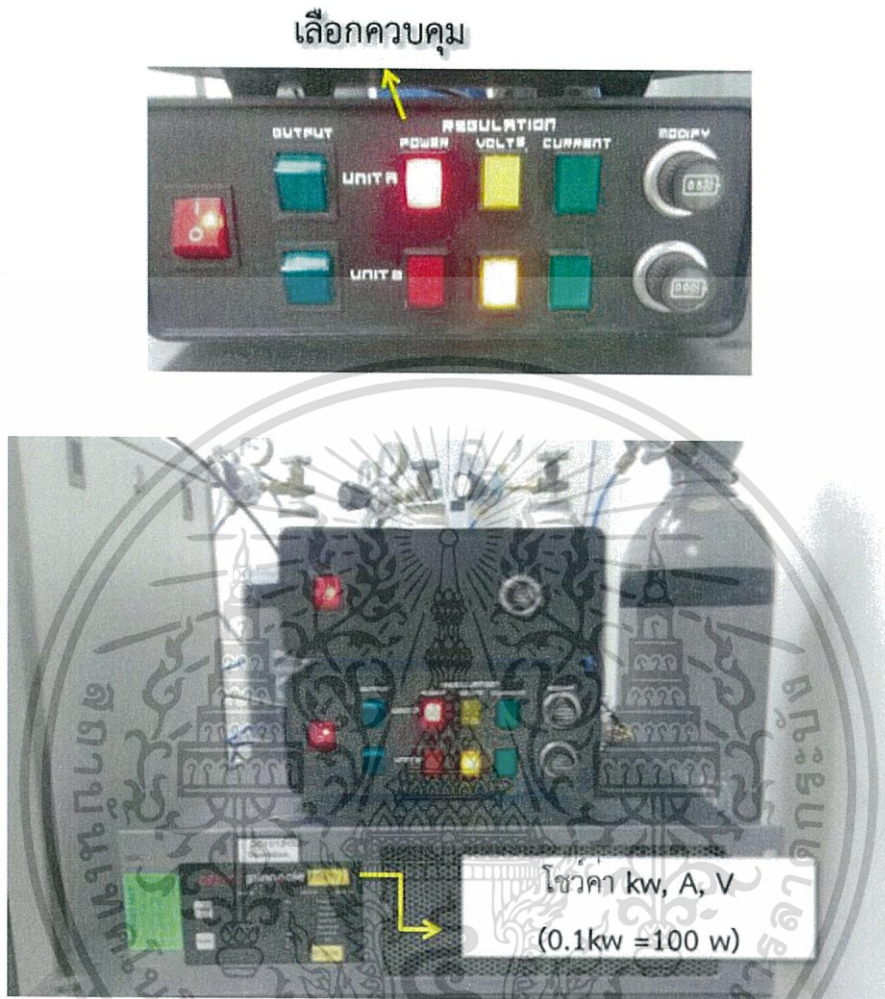
ระบบทำหน้าที่สูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศเพื่อให้ได้ความดันภายในตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องดีซี สปีดเตอร์ริง

3) แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Magnetron Drive)

มีหน้าที่เป็นแหล่งให้กำลังงานไฟฟ้าแก่ส่วนหัวแมกนีตรอนคาโทด โดยจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง $0-1000V$ เพื่อให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวเป็นไอออนและสนามไฟฟ้านี้จะเร่งไอออนที่เกิดขึ้นนำไปสู่การเกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริง ซึ่งส่วนนี้อาจเรียกอีกชื่อคือ Regulation Control Unit ดังในรูปที่ 3.3และ3.4



รูปที่ 3.4 เครื่อง Regulation Control Unit

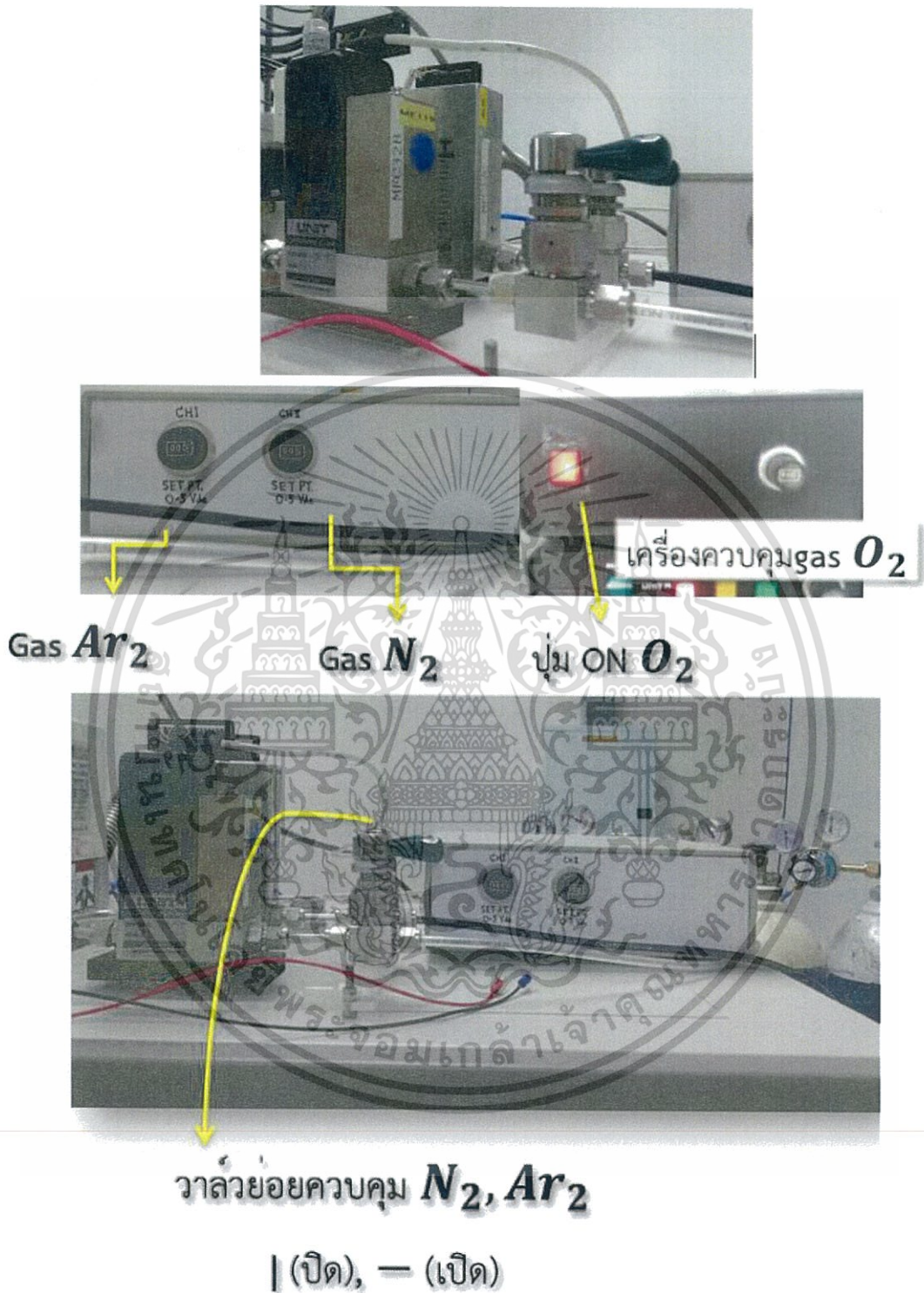
4) อิเล็กโทรดและหัวแมกนีตรอน

หัวแมกนีตรอนเป็นแบบทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 cm. ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรและขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำจากทองแดง และส่วนทองแดงนี้จะใช้สำหรับติดตั้งเป่าสารเคลื่อน

5) เครื่องควบคุมการป้อนแก๊ส (Mass Flow Controller)

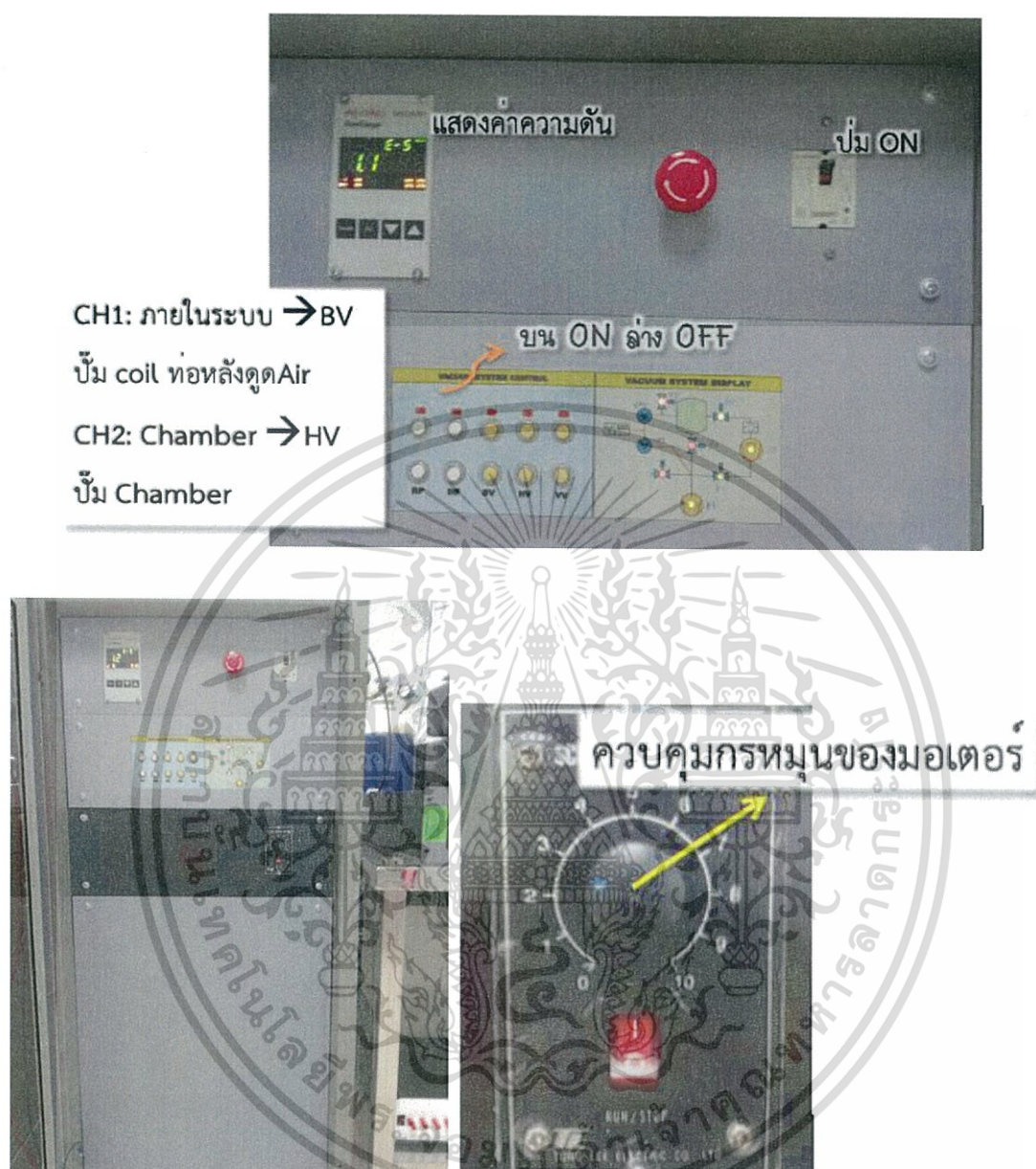
ทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราไหลหรือการจ่ายก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีมอเตอร์ควบคุมการเปิด/ปิดวาล์ว ดังในรูปที่ 3.3 และ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบเครื่องควบคุมการป้อนแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

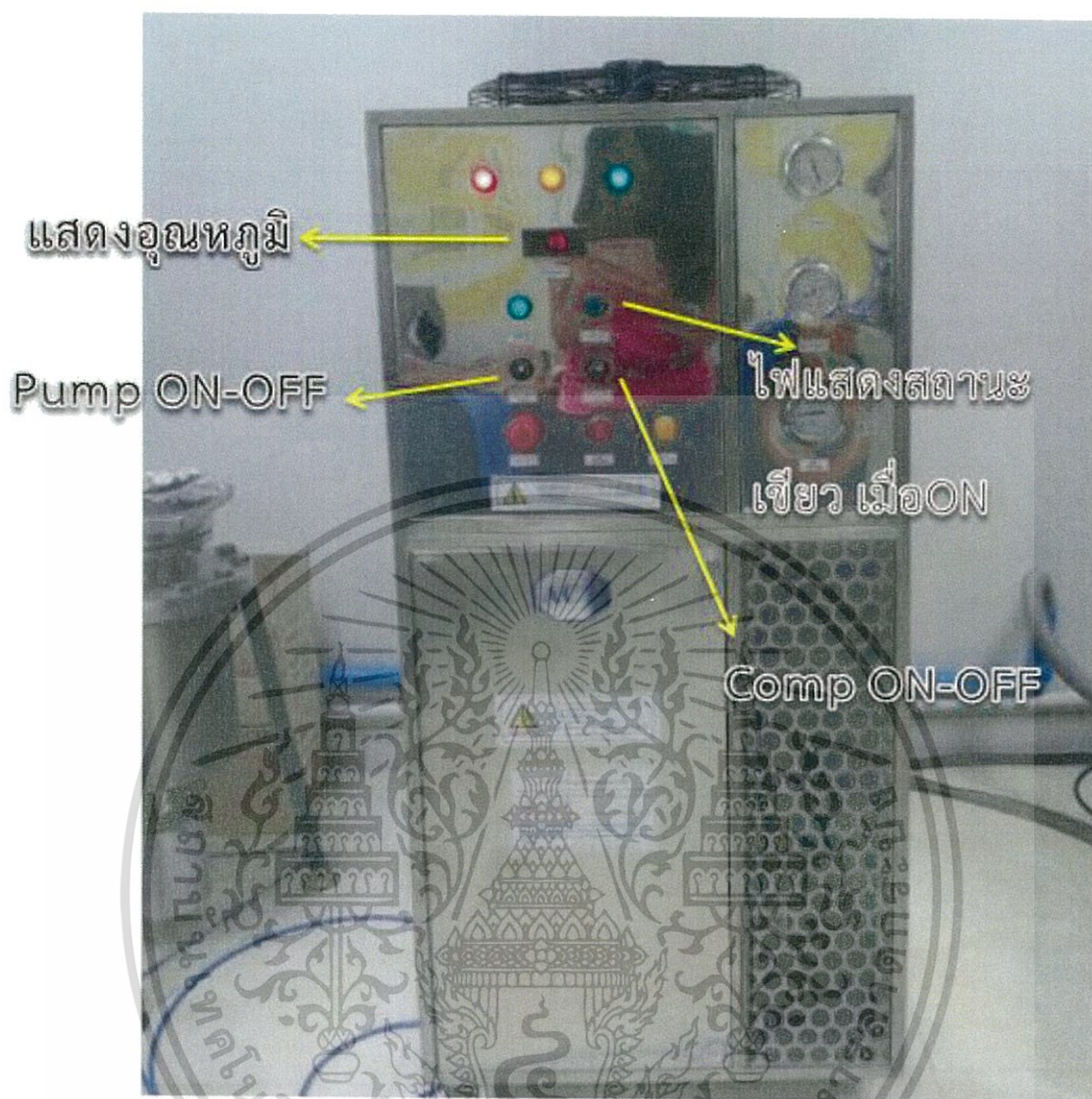


รูปที่ 3.6 เครื่อง Control Unit

6) ระบบหล่อเย็น (Cooling)

ระบบหล่อเย็นนี้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่สามารถที่จะปรับระดับได้ ให้เกิดการไหลเวียนของน้ำเย็นระหว่างเครื่องสูบแพรรไอ หัวแมกนีตรอนและเป้าสารเคลือบกับถังน้ำหล่อเย็น มีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ระบบหล่อเย็น

7) เป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับ

- เป้าสารเคลือบเป็นไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.99% มีลักษณะเป็นแผ่นกลม
- วัสดุรองรับใช้ SS304 และกระจกสไลด์มีผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อวัดผลหาเฟสของโครงสร้างฟิล์มบาง
ลักษณะเครื่องเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance ของ Bruker

3.2.1.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว
ของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่าง
อะตอม (Atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร



รูปที่ 3.9 เครื่อง Atomic Force Microscope MODEL (AFM) : Park system XE 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.4 เครื่องวัดมุมสัมผัส เพื่อสังเกตความชอบน้ำของพื้นผิวของวัสดุ



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่ามุมสัมผัส (Contact Angle)

3.2.1.5 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสงงาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV - Vis spectrophotometer



รูปที่ 3.11 เครื่อง UV-VIS Spectroscopy HITACHI รุ่น U-2900

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตาได้เห็นใบแจ้งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หลักวิธีการทดลองและการวัดผล

<u>ตัวแปรต้น</u>	ปริมาณแก๊สออกซิเจน
<u>ตัวแปรตาม</u>	เฟสของโครงสร้าง ความหนา ความขรุขระของพื้นผิว ความชอบน้ำ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
<u>ตัวแปรควบคุม</u>	ระยะห่างระหว่างเป้าไทเทเนียมกับฐานวางชิ้นงาน ความดัน ชนิด และปริมาณของสารสีย้อมที่จะใช้ทดสอบประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิทั้งภายในเครื่องและภายนอก

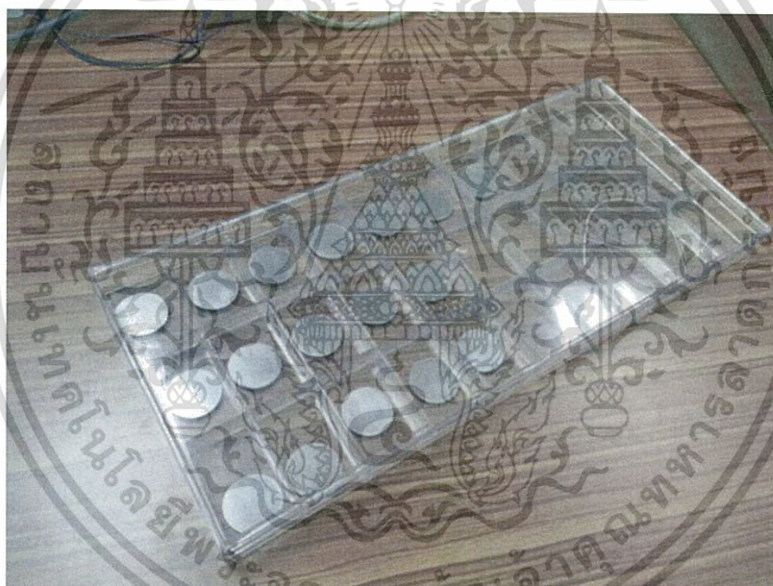
อุปกรณ์และเครื่องมือในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และ
การทดสอบปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง

1. เครื่องเคลือบสุญญากาศระบบสเปดเตอร์ริงจากเป้าไทเทเนียม
2. กระจกสไลด์
3. ชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบคือ SS304
4. ก่อ่งใส่ชิ้นงาน
5. ถังมือ
6. คีบหนีบ
7. หลอด Vial
8. บีกเกอร์ขนาด 100 ml และ 250 ml
9. ธาตุไทเทเนียม
10. แก๊สอาร์กอน
11. แก๊สออกซิเจน
12. สารเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



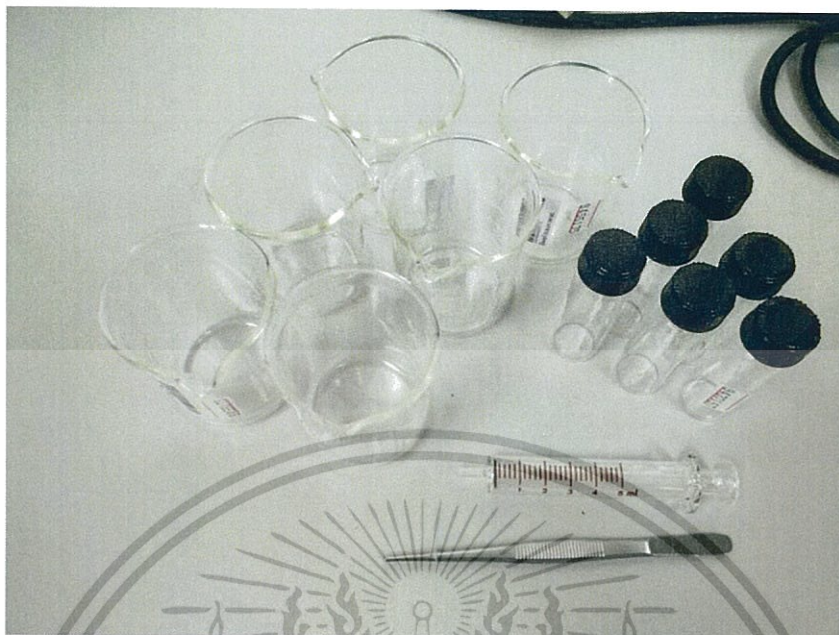
รูปที่ 3.12 กระจกสไลด์



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบคือ S304L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) อุปกรณ์และเครื่องมือในการเคลือบฟิล์มบางลงแผ่นกระจก



(ข) อุปกรณ์และเครื่องมือในการเตรียมสารละลาย



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์และสารละลายในการทดสอบปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ระยะเวลาในการทดลอง

ประมาณ 6 เดือน หรือ 2ภาคการศึกษา

3.4 วิธีการทดลอง

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษานี้เตรียมด้วยวิธี ดีซี สปีดเตอริง โดยใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สสปัตเตอร์และแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สไวกรียา ดังขั้นตอนต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 นำกระจกสไลด์และชิ้นงาน SS304 วางใน Chamber

- 1) นำกระจกสไลด์ (สำหรับวัดสมบัติโฟโตแคตตาไลซิส) และแผ่นss304 (สำหรับศึกษาโครงสร้างผลึกและลักษณะผิว) ที่ทำความสะอาดแล้วเข้าห้องเคลือบ
- 2) จัดแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากเป้าสารเคลือบ 4 เซนติเมตร
- 3) เมื่อเริ่มทำการปลูกฟิล์มบางจะต้องอุ่นเครื่องก่อน โดยเปิดCooling เพื่อช่วยความร้อนและช่วยให้สามารถปั๊มความดันลงได้มาก
- 4) เปิดRP ที่ระบบควบคุม
- 5) จากนั้นลดความดันในภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันพื้น (Base pressure) เท่ากับ $-3e^{-2}$ mbar โดยกดเปิด BV สลับกับRV
- 6) เปิด DIF ที่ระบบควบคุมประมาณ 20 นาที เพื่ออุ่นขดลวด
- 7) ปรับHeater ไปที่สเกล100 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในภาชนะสุญญากาศให้เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส รอประมาณ 40นาที แล้วค่อยปิดHeater
- 8) ล้างchamber ด้วยก๊าซอาร์กอนที่ความดัน $4e^{-3}$ เปิด 5นาที ปิด 5นาที ทำ 2ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) เตรียมจ่ายไฟในการสเปตเตอริง โดยการเปิด Supply กำลังไฟฟ้าให้คงที่เท่ากับ 50 วัตต์
 - 10) ปล่อกแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สออกซิเจน เป็นสัดส่วนกัน โดยการทดลองแต่ละครั้งมี ปริมาณออกซิเจน 5% 10% 15% 20% ตามลำดับ โดยควบคุมความดันรวมขณะ เคลือบ เท่ากับ (Total pressure) $3e^{-3}$ mbar และ 125 W ใช้เวลาใน การเคลือบฟิล์ม 30 นาที
 - 11) โดยการสเปตเตอริงจะทำ 10 นาทีแล้วพัก 5 นาที ทำจนครบ 30 นาที
 - 12) จากนั้นปิดเครื่อง ปิดระบบแล้วรอให้ขดลวดเย็นลงก่อนจึงจะสามารถเปิดchamber เพื่อนำชิ้นงานออกมาได้
2. การตรวจสอบคุณลักษณะและโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ บน กระจกสไลด์และSS304 ที่ได้
 - 2.1 ใช้เครื่อง AFM ในการตรวจสอบผลขนาดเกรนและค่าความขรุขระของ พื้นผิวฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์
 - 2.2 ใช้เครื่อง XRD ในการตรวจสอบเฟสโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ไทเทเนียมไดออกไซด์
 - 2.3 ใช้กระบวนการContact Angle ในการวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวฟิล์ม



รูปที่ 3.16 การหยดน้ำลงบนชิ้นงานเพื่อทดสอบวัดค่ามุมสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง โดยใช้เมทิลีนบลู
 - 1) เตรียมอุปกรณ์ เพื่อสร้างกล่องดำที่ใช้ในการทดลอง
 - 2) สร้างกล่องดำและติดตั้งหลอด UVC
 - 3) ล้าง ปีกเกอร์ขนาด 100ml vial และ Syringe ด้วยน้ำ DI และ ACETONE
 - 4) เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ให้มีความเข้มข้น 5mg/l โดยใส่ปีกเกอร์ละ 40ml จำนวน 6 ปีกเกอร์

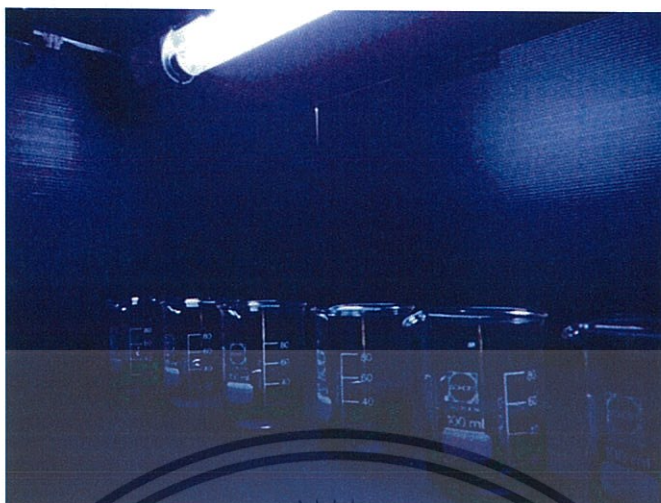


รูปที่ 3.17 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลู ให้มีความเข้มข้น 5mg/l โดยใส่ปีกเกอร์ละ 40ml

- 5) เตรียมชุดการทดลองโดยที่แต่ละปีกเกอร์ทำการทดสอบดังนี้

ปีกเกอร์ที่1	ไม่ใส่สารใดๆ
ปีกเกอร์ที่2	ใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa 25)
ปีกเกอร์ที่3	ใส่ ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 5%
ปีกเกอร์ที่4	ใส่ ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 10%
ปีกเกอร์ที่5	ใส่ ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 15%
ปีกเกอร์ที่6	ใส่ ชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบาง TiO_2 ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้เมทิลีนบลู

- 6) ใส่ชุดการทดลองในกล่องดำ แล้วเปิดหลอดUVA แล้วจึงเก็บตัวอย่างสารละลาย เมทิลีนบลูทุกๆ 1 ชั่วโมง ตัวอย่างของแต่ละบีกเกอร์ อย่างละ 5ml เพื่อนำไปวัดหาค่าการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.19 ชุดการทดลองในกล่องดำ

- 7) นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บมาได้ไปวัดค่า Absorbance จากเครื่องUV-Vis spectrophotometer แล้วนำค่ามาเปรียบเทียบ อภิปรายผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

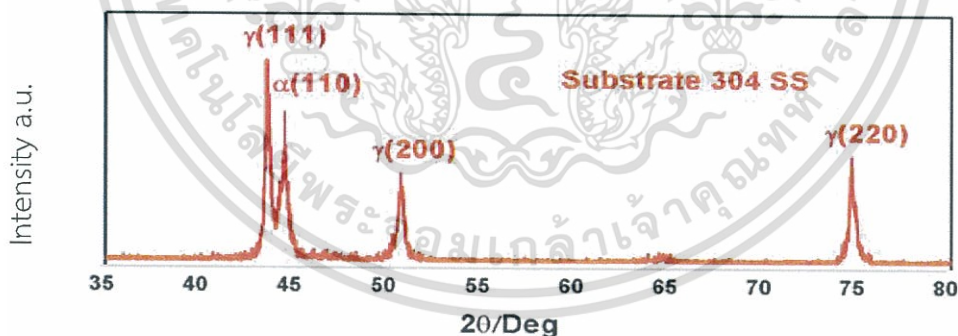
ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลจากการปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

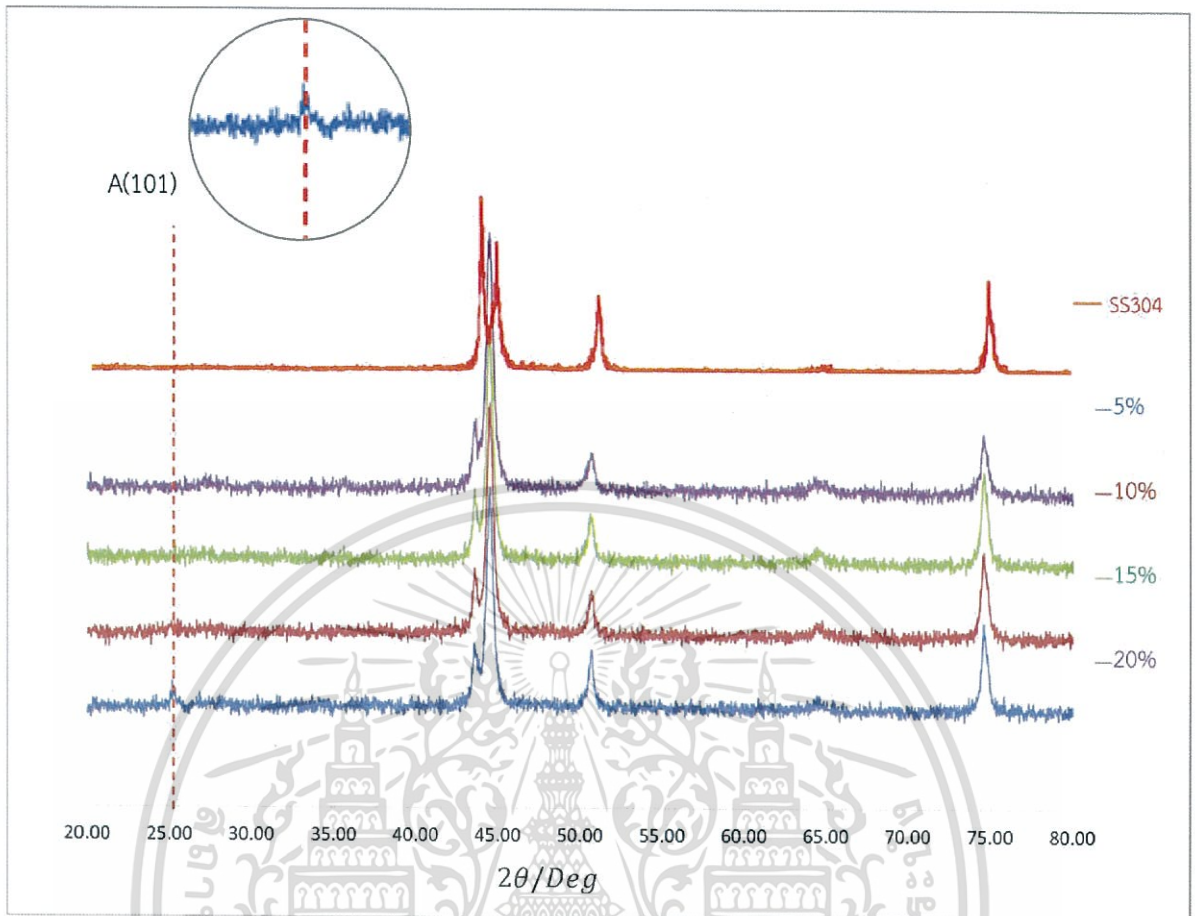
งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการปลูกฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีดีซี สปัตเตอร์ริง ที่ภายในระบบมีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสก่อนทำการปลูกฟิล์มบาง โดยใช้กำลังในการปลูกที่ 50 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที โดยแต่ละครั้งให้มีการควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกัน จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลดังนี้

4.1.1 เฟส

เมื่อนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างเป็นเฟสอะนาเทส ซึ่งสัญญาณจะเห็นชัดที่ความเข้มข้นของออกซิเจน 5% ดังรูปที่ 4.2 ทั้งนี้ คาดว่าที่ความเข้มข้นของออกซิเจนอื่นๆ ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะเป็นอะนาเทสเช่นกัน แต่สัญญาณเห็นไม่ชัดเนื่องจากฟิล์มมีความบางกว่า ซึ่งเฟสอะนาเทสนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในโครงการนี้ในการนำไปกำจัดสารอินทรีย์ เนื่องจากช่องว่างของชั้นพลังงานที่เหมาะสมกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอื่น ส่วนสัญญาณอื่นๆ จะพบว่าจากรูปที่ 4.1 จะเป็นชั้นงานที่ทำจากสแตนเลสเกรด 304



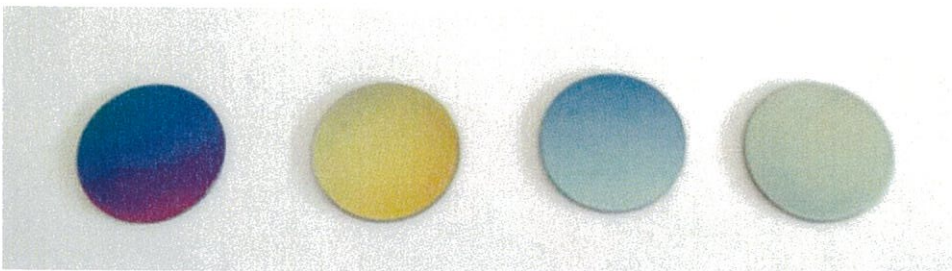
รูปที่ 4.1 XRD patterns of untreated SS304



รูปที่ 4.2 แสดงผลของสัญญาณ XRD ที่วัดได้ที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่างๆ กัน

4.1.2 ความหนา

สีที่เปลี่ยนไปบนชิ้นงานจากฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำมาประมาณความหนาของฟิล์มบนชิ้นงานได้ โดยฟิล์มจะเริ่มเปลี่ยนสีตามความหนาดังนี้ คือ สีเหลือง สีม่วง สีฟ้า ไม่มีสี สีเหลือง สีม่วง สีฟ้า สีเขียวสลับกับสีแดง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการศึกษา จึงสามารถประมาณได้ว่าอัตราการเจริญเติบโตของฟิล์มแปรผกผันกับปริมาณของออกซิเจน โดยฟิล์มที่มีความหนามากที่สุดไปน้อยที่สุดตามสัดส่วนของก๊าซออกซิเจน 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ชิ้นงานที่ปลูกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนก๊าซออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์แหวงวณเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
5%, 10%, 15% และ 20%ตามลำดับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

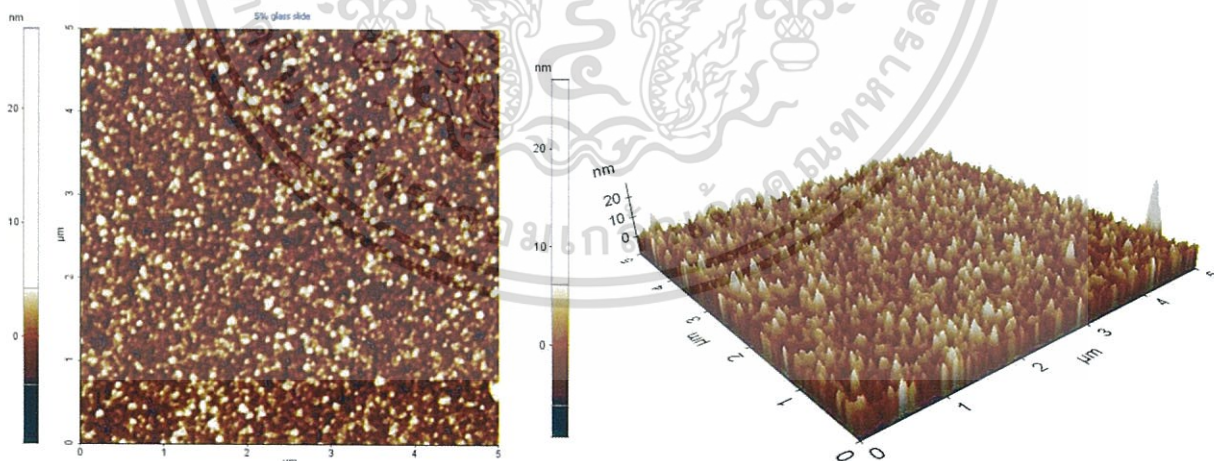
4.1.2 ความขรุขระ

จากการทดสอบพบว่าสามารถเห็นลักษณะของผิวฟิล์มได้อย่างชัดเจน การวิเคราะห์ด้วยAFM จะได้เป็นภาพ 3 มิติ ซึ่งพบว่า ฟิล์มมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระโดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ปริมาณแก๊สออกซิเจนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ดังสรุปตามตารางที่ 4.2 โดยพิจารณาจากฟิล์มที่ปลูก บนกระจกสไลด์ เนื่องจากฟิล์มที่ปลูกบนชิ้นงานสแตนเลสมีความขรุขระอันเนื่องมาจากพื้นผิว ซึ่งจะทำให้การแปลงผลการทดสอบมีโอกาสผิดพลาดได้สูง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระจกสไลด์

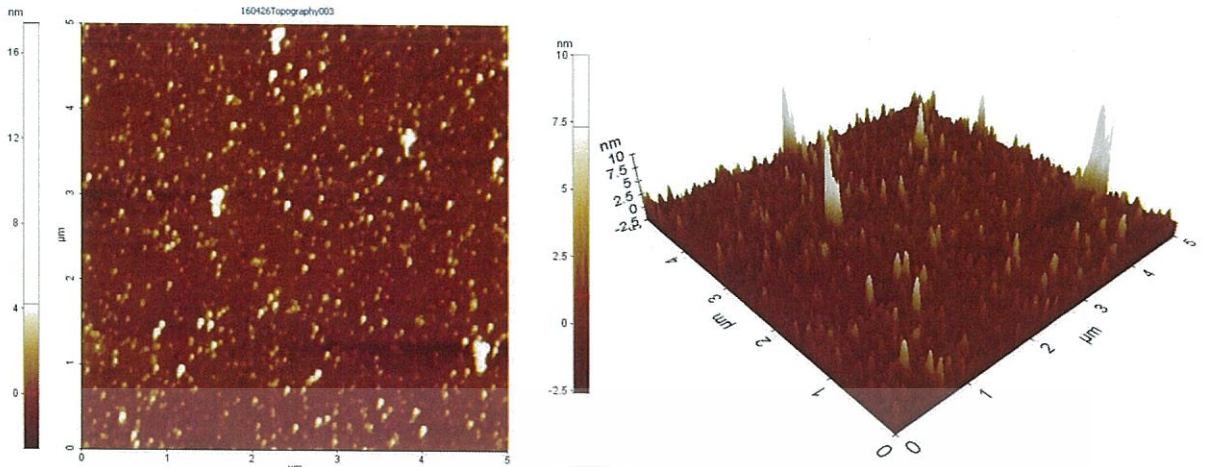
ปริมาณออกซิเจนที่ใช้	มีค่าความขรุขระ (นาโนเมตร)
5%	2.279
10%	1.076
15%	2.915
20%	4.157

ซึ่งภาพ 3 มิติที่ได้จากการทดสอบด้วย AFM มีลักษณะความขรุขระดังรูปที่ 4.4 ด้านซ้ายของรูปคือขนาดเกรน ส่วนด้านขวาคือลักษณะความขรุขระใน 3 มิติ

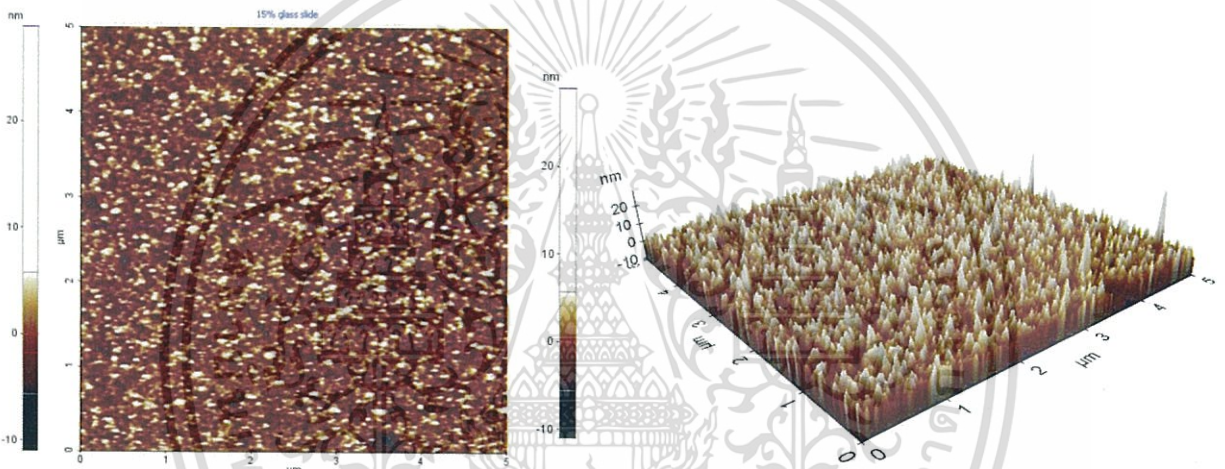


(ก) ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน 5%

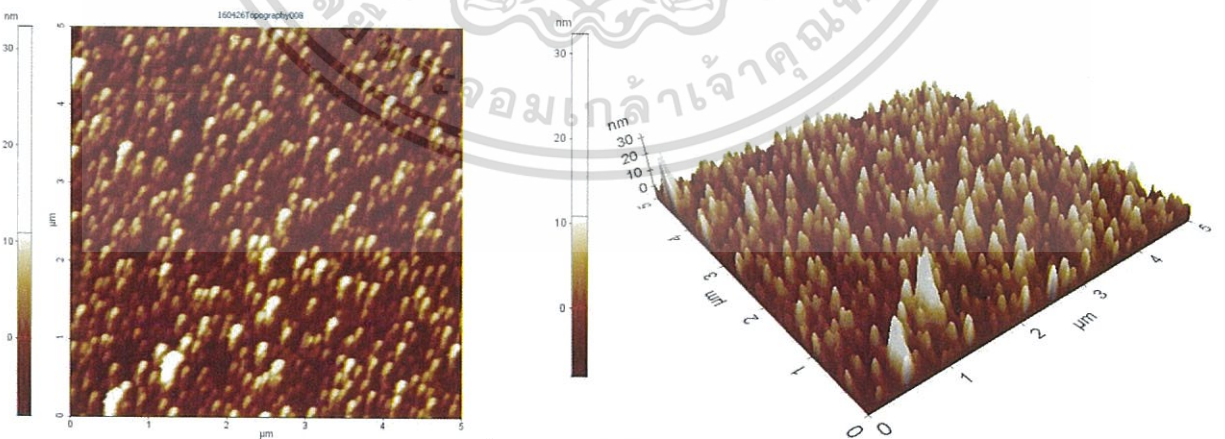
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ที่ความเข้มข้นกำซอกซิเจน 10%



(ค) ที่ความเข้มข้นกำซอกซิเจน 15%

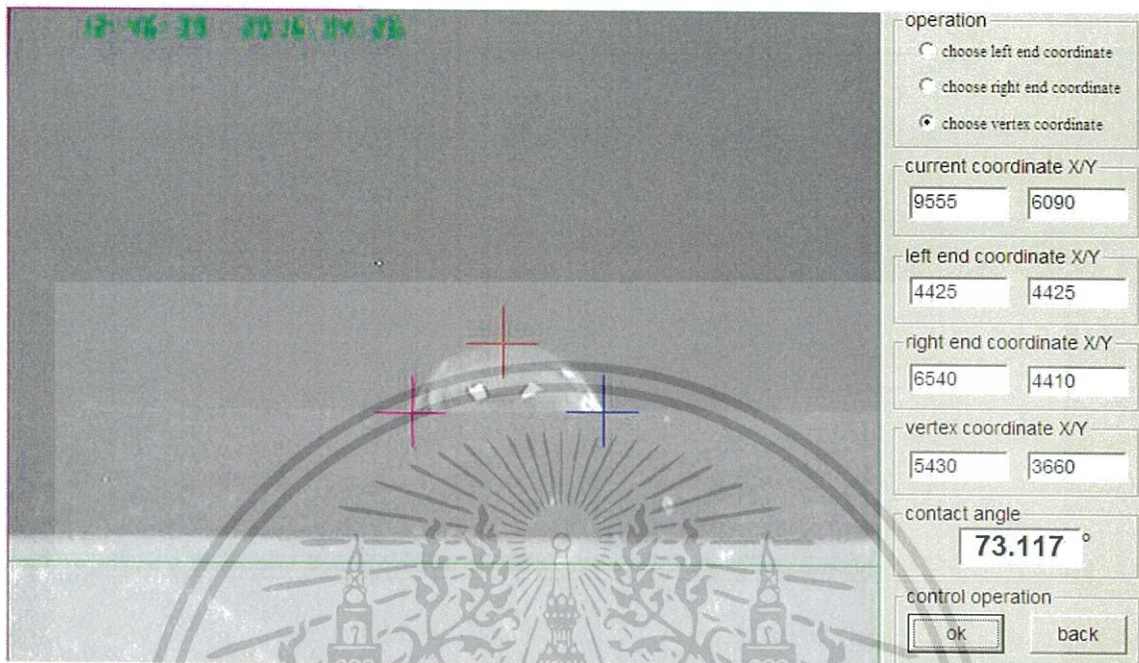


(ง) ที่ความเข้มข้นกำซอกซิเจน 20%

รูปที่ 4.4 แสดงขนาดของเกรนและลักษณะความขรุขระพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของพื้นผิว (Contact angle)

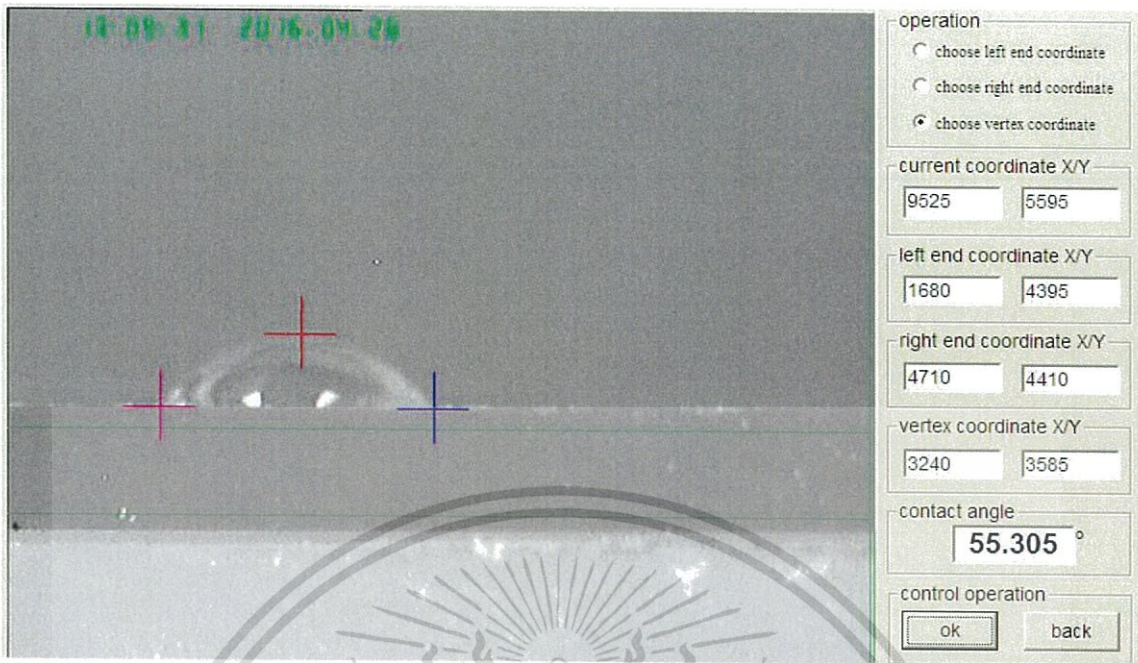


(ก) มุมสัมผัสของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 5%

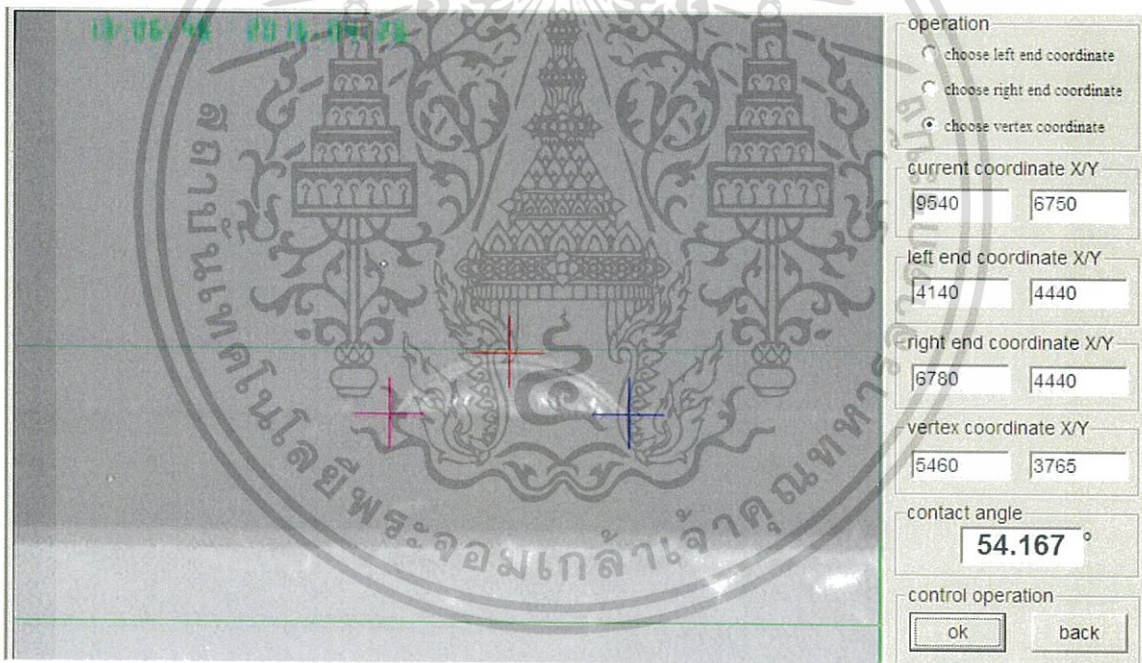


(ข) มุมสัมผัสของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) มุมสัมผัสของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 15%



(ง) มุมสัมผัสของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 20%

รูปที่ 4.5 แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมุมสัมผัส (contact angle, θ) มุมสัมผัสนี้ก็จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมากและของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดีและของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

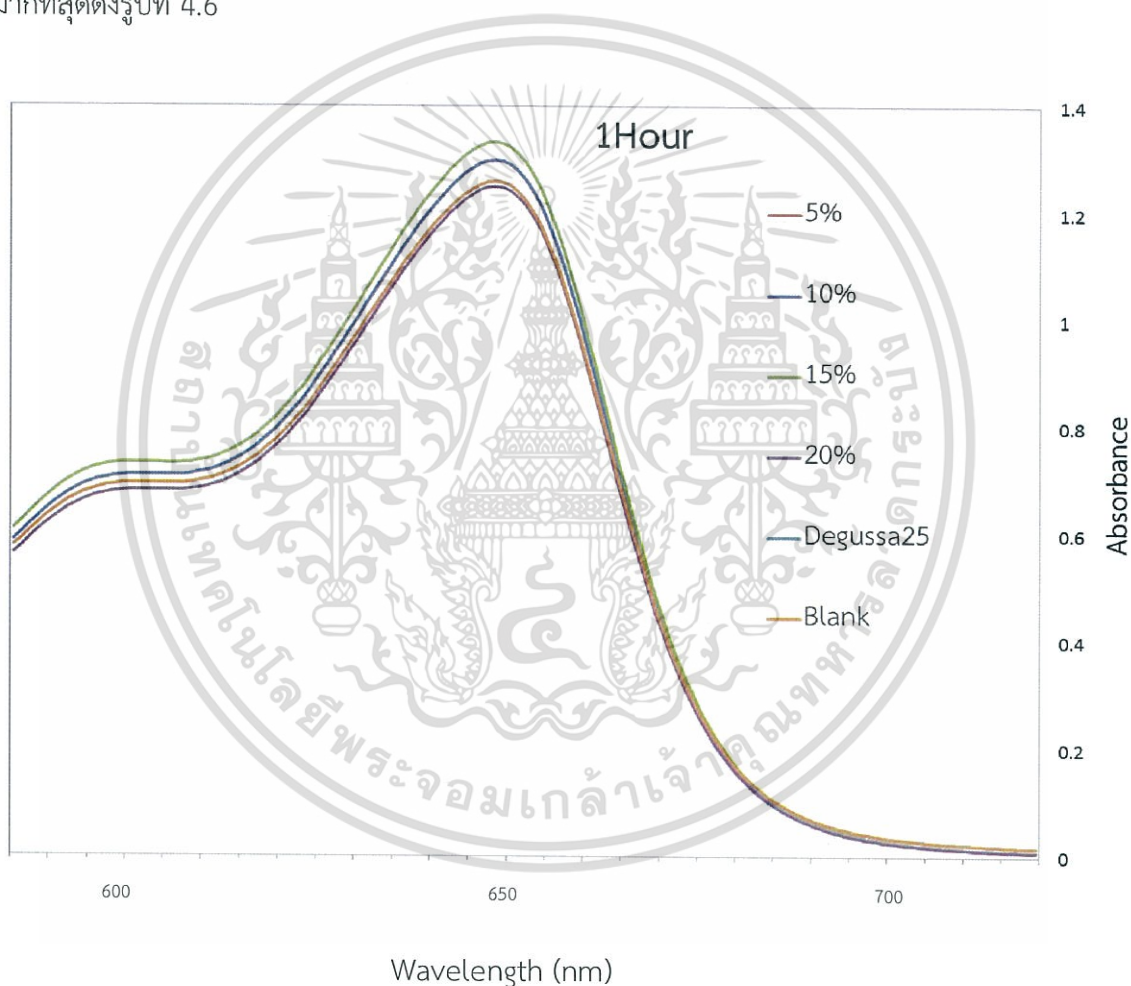
จากการวิเคราะห์ผลความขรุขระกับสมบัติการชอบน้ำของพื้นผิวจากค่าในตาราง 4.3 ทำให้เห็นว่าในกรณีที่พื้นผิวมีความขรุขระมากจะส่งผลให้พื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสน้อย หรือเรียกมีความชอบน้ำมาก สังเกตชัดเจนได้ที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 20%

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความขรุขระและค่ามุมสัมผัส

ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้	มีค่าความขรุขระ (นาโนเมตร)	ค่ามุมสัมผัสเฉลี่ย (องศา)
5%	2.279	76.711
10%	1.076	62.73
15%	2.915	55.305
20%	4.157	54.167

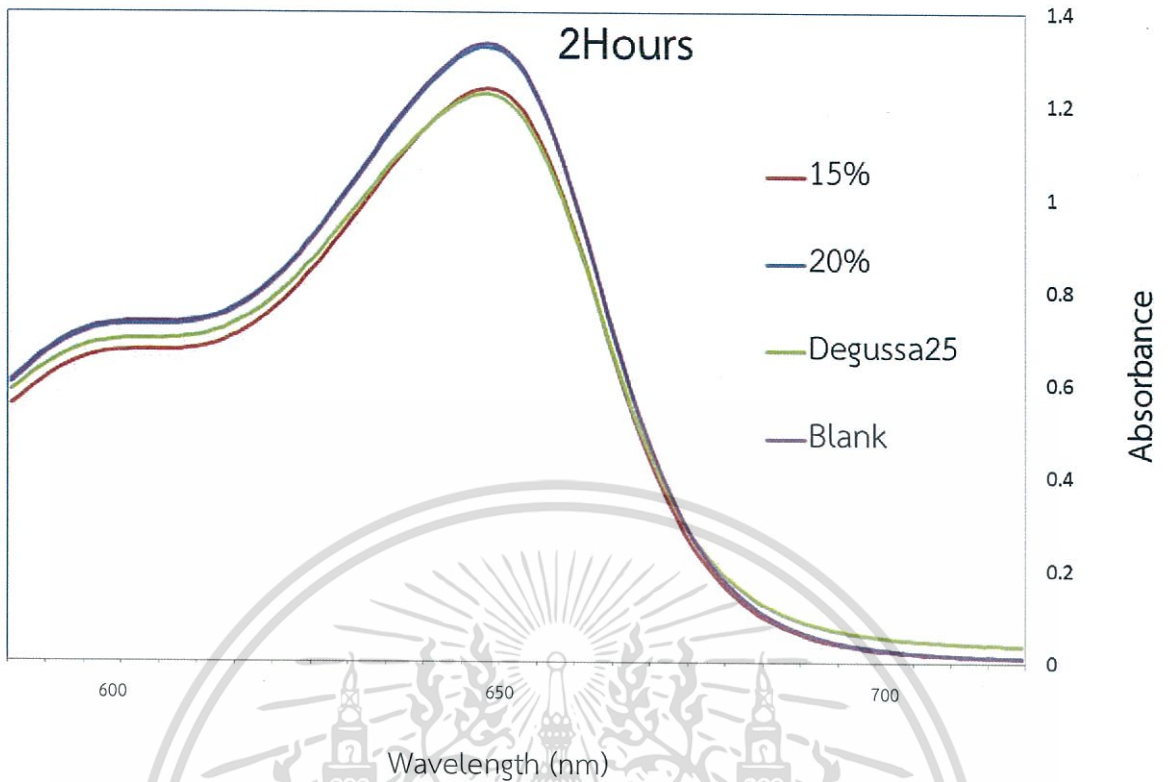
4.1.5 สมบัติโฟโตแคตะไลติก

จากการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจนแตกต่างกันไปทำปฏิกิริยากับสารละลายเมทิลีนบลูโดยฉายแสงยูวีในกล่องดำ เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลูทุกๆ 1 ชั่วโมง ไปทดสอบหาค่าการดูดซับแสง (Absorbance) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยที่เวลา 1 ชั่วโมง ความยาวคลื่น 650 nm ค่าAbsorbance ที่ได้คือ 1.0944, 0.9979, 1.1235, 1.0529 และ 1.0643 ของ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 5%, 10%, 15%, 20% และ Degussa25 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 10% มีค่าAbsorbance น้อยที่สุด ส่วนที่ 15% มีค่าAbsorbance มากที่สุดดังรูปที่ 4.6

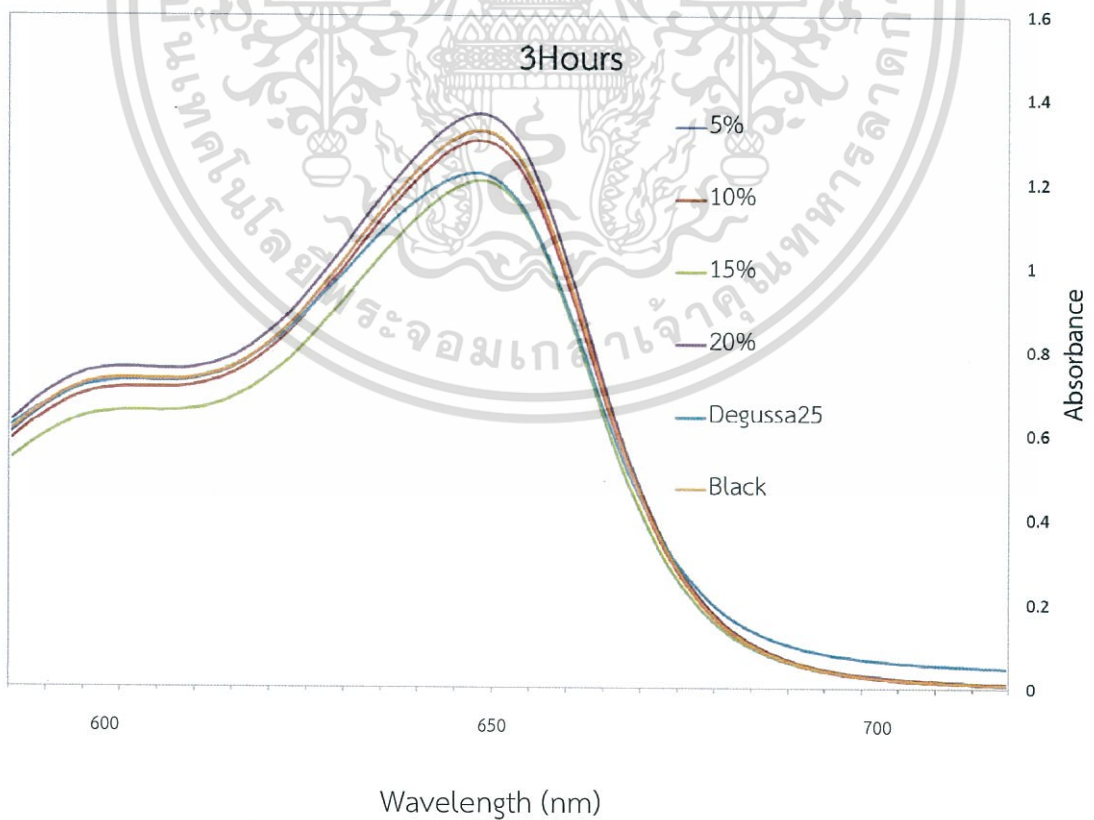


รูปที่ 4.6 แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ที่เวลา 2 ชั่วโมง ความยาวคลื่น 650 nm ค่าAbsorbance ที่ได้ 1.0396, 1.118 และ 1.0493 ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 15%, 20% และ Degussa25 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 15% มีค่าAbsorbance น้อยที่สุด ส่วนที่ 20% มีค่าAbsorbance มากที่สุดดังรูปที่ 4.7 การศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 แสดงค่าAbsorbance ของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภูมิแสดงค่าการดูดซับแสง (Absorbance) ที่เวลา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง เห็นได้ว่าที่เวลา 1 กับ 2 ชั่วโมง การเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับแสง มีความแตกต่างกันน้อยมาก แต่เมื่อเวลา 3 ชั่วโมง ที่ความยาวคลื่น (Wavelength) 650 นาโนเมตร फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของออกซิเจน 5%, 10%, 15% และ 20% สามารถวัดค่าการดูดซับแสงได้ 1.1159, 1.0983, 1.0136, 1.1507 และ 1.0701 ตามลำดับ ซึ่งค่าดูดซับแสงที่น้อยที่สุดได้มาจากฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณออกซิเจน 15% และค่าดูดซับแสงที่มากที่สุดได้มาจากฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณออกซิเจน 5%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

โครงการนี้เป็นโครงการที่ศึกษาปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยความเข้มข้นออกซิเจน ต่างกัน คือ 5%, 10%, 15% และ 20% ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคซี สปีดเตอริง ซึ่งมีข้อดีคือสามารถ ควบคุมปริมาณก๊าซ ระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ แล้วนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ ได้ไปทดสอบด้วยเครื่องXRD เพื่อหาเฟสของโครงสร้างฟิล์มซึ่งจากการทำโครงการนี้ได้เฟสแบบ อะนาเทสที่มีความเหมาะสมที่จะไปใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แล้วนำไปหาค่าความ ชรุขระและมุมสัมผัส ซึ่งพบว่าเมื่อพื้นผิวมีความชรุขระมากจะทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำที่วัดได้มี ค่าน้อย (น้อยกว่า 90°) ซึ่งแสดงถึงว่าพื้นผิวของฟิล์มบางที่ได้มีความชอบน้ำ และเมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ ไปทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกด้วยการทดสอบกับสารละลายเมทิลีนบลูซึ่งใช้แทนสารอินทรีย์ แล้ว นำสารละลายเมทิลีนที่ผ่านการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกที่ 1,2และ3ชั่วโมง ไปวัดผลหาค่าการ ดูดซับแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectrometer ที่ความยาวคลื่น650 นาโนเมตรได้ผลว่าฟิล์มที่มีความ เข้มข้นออกซิเจน15% มีค่าการดูดซับแสง(ABS) น้อยที่สุดคือ 1.0136 ฟิล์มที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 5% มีค่ามากที่สุดคือ 1.1159 และค่าการดูดซับแสงของผงไทเทเนียมที่ใช้ในทางการค้าคือ Degussa P25 เท่ากับ 1.0701 ซึ่งค่าการดูดซับแสงน้อยแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกมาก จึงสรุป ได้ว่า ความเข้มข้นของออกซิเจนในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อความชรุขระ สมบัติความชอบน้ำ สมบัติโฟโตแคตะไลติก และไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบฟิล์มบางดีกว่าแบบ ผง ทั้งในด้านการใช้งานที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้และการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงที่มากกว่า และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นออกซิเจน 15% มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาการเร่ง ด้วยแสงได้ดีที่สุด

5.2 ปัญหาในการทำโครงการ

1. ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีความหนาบางเกินไปจึงยากต่อการนำไป ทดสอบและวิเคราะห์ผล
2. ขั้นตอนในการทดสอบสมบัติโฟโตแคตะไลติกเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู เข้มข้นมากไปจึงทำให้เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่อง UV-Vis spectrophotometer กราฟของค่าการดูดซับแสงที่ได้มีค่าไม่ครอบคลุม จึงต้องทำการเจือจางสารละลาย เมทิลีนบลูที่เก็บตัวอย่างมาก่อนที่จะนำไปวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะในการแก้ไขและพัฒนา

1. กำหนดความหนาของฟิล์มจากอัตราการเติบโตของฟิล์มบางที่ได้จากการศึกษา เพื่อให้มีความหนาใกล้เคียงกันและลดความผันแปรในของกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสงจากความหนา เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนามากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยเพิ่มเวลาในการสปีดเตอริงจากเดิม 30 นาที อาจจะเป็น 1 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับเพื่อมาเปรียบเทียบค่าความหนาที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เพื่อให้การวิเคราะห์เฟสความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
2. เพิ่มจำนวนชิ้นงานที่เตรียมฟิล์มบางเพื่อให้สามารถทำการทดลองซ้ำได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการ Recycle
3. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นลดลงโดยเตรียมที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบก่อนที่จะนำไปใช้ทำการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1]ชลดา อีรการณวงศ์. 2015. **วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์ โครงสร้าง และการประยุกต์ใช้**. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2555
- [2]Fujishima, A., Rao, T.N.,Tryk, D.A., 2015. Titanium dioxide photocatalysis, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1 (2000) 1-21.
- [3]เสาวลักษณ์ บุญยอด. 2016. **ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์**. [Online]. Available :<http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/8111,20/10/2015>.
- [4]Agustina, T.E., Ang, H.M. and Vareek, V.K. 2015. A review of synergistic effect of photocatalysis and ozonation on wastewater treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology C:Photochemistry Reviews*. 2006,6,264-273.
- [5]กาญจนา ลือพงษ์, นงนุช ศศิธร. 2015. **การบำบัดน้ำเสียจากระบบการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ**. •[Online]. Available: https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/953/itfd_54_05.pdf?sequence=1.
- [6] ขจรศักดิ์ โสภจรรย์. 2015. **กำจัดสารพิษในน้ำ เสียโดยการใช้ขบวนการโฟโตแคตตาไลติก**. เชียงใหม่:รายงานวิจัย,โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2541. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,2545. หน้า 4 – 17.
- [7]_____, 2015. **กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (thin film deposition process)**. •[Online]. Available: http://vt-sun.com/index.php?option=com_content&view.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[8]ศูนย์เทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2016.

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope). [Online]. Available:

http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=545.

[9]นิรันดร์ วิทิตอนันต์., สุรสิงห์ ไชยคุณ., อติศร บุรณวงค์. 2015. สมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์มบางไท

ทาเนียมออกไซด์แบบเจือไนโตรเจนที่เคลือบด้วยวิธีอีพ็อกซีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง.

[Online]. Available:<http://www.lib.buu.ac.th/buuir/research/node/2347>.

[10] _____, 2016. เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง Ultraviolet – Vis

spectrophotometer. [Online]. Available:

<http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>

[11]ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2016. เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและเอกซ์เรย์ฟลูออ

เรสเซนซ์ (XRD / XRF Techniques, X-ray). [Online]. Available

:<https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/28-x-ray>

[12]ภ.พิ้งบุญ ปานศิลา., ทองใส จำนงการ., ปรียาวลัย คูหา. 2015. การศึกษาลักษณะของฟิล์มบาง

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากระบบสปัตเตอริง ในขั้นตอนเดียวแบบไม่ให้ความร้อน โดยใช้เทคนิควางวัสดุรองรับที่ตำแหน่งต่างกัน. •[Online]. Available:

<http://research.msu.ac.th/journal/?p=2954>.

[13]ชนิษฐา หทัยสมิทธิ์. 2015. การเตรียมไทเทเนียม-เฟสอานาเทสและการประยุกต์ใช้ทำลายเชื้อ

แบคทีเรียโดยการฉายแสง.[Online]. Available

:http://kukr.lib.ku.ac.th/ku_frontend/BKN/search_detail/result/10444

Laksmi et al. 2015. ศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลูในน้ำ โดยอาศัยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตตาไลสต์. [Online].

Available:www.chiangmai.ac.th/emac/journal.

_____, 2015. เทคโนโลยีฟิล์ม สปัตเตอริง. [Online]. Available:

<http://www.nectec.or.th/research/research-success-case/thin-film.html>,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

_____,2015. โฟโตแคตาไลซิสกับไทเทเนียมไดออกไซด์, [Online].

Available:<http://www.nanoyothai.com/1301931/photocatalyst>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ-นามสกุล นางสาว โสมนันท์ ธนภิญโญ
วัน เดือน ปีเกิด 4 สิงหาคม 2536
ที่อยู่ 306 ซอยรัตนานิเบศร์ 18 ต.บางกระสอ อ.เมืองนนทบุรี จ.นนทบุรี
11000
โทรศัพท์ 0807926460 E-mail : s.stanapinyo@gmail.com
ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์
โรงเรียนสายน้ำผึ้ง ในพระอุปถัมภ์ฯ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้