

การสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์



นางสาวสิริพัชร โภยโกโคสวรรณค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF CARBARYL RESIDUE IN WATER USING TITANIUM  
DIOXIDE-COATED GLASS FIBER FILTER

Miss Sireepus Koypokaisawan



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science  
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะ ตะไลซิสโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมได ออกไซด์
โดย	นางสาวสิริพัชร โภโยโกไคสวรรคค์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิมอิม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สิทธิสุนทร สุโพธิณะ)

สิริพัชร โภโยโกโคสวรรณ : การสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF CARBARYL RESIDUE IN WATER USING TITANIUM DIOXIDE-COATED GLASS FIBER FILTER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ภารดี ช่วยบำรุง, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสลายคาร์บาริลในน้ำความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เปรียบเทียบกับการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่เตรียมจากสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ร่วมกับโพลีเอทิลีน ไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 4000 และกรดไนตริก หรือกรดอะซิติก หรือกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา นาน 300 นาที ทุก 30 นาที มีการดูน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด 95.5% ส่วนการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดผลึกอะนาเทสมากที่สุด และไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรอง 0.53-0.54 กรัมต่อแผ่น ( $2.65 \pm 0.027$  กรัมต่อลิตร) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด 84.4% ส่วนการใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ก่อให้เกิดผลึกอะนาเทสดีที่สุด น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.07-1.2 กรัมต่อแผ่น ( $5.78 \pm 0.37$  กรัมต่อลิตร) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด 85.4% ขณะที่การใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์  $0.51 \pm 0.005$  กรัมต่อแผ่น ( $2.56 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด 73.9% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการสลายคาร์บาริลพร้อมๆ กันระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองเคลือบ สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพจากมากไปน้อยคือ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร (100%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดไนตริก  $2.07 \pm 0.004$  กรัมต่อลิตร (86.9%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติก  $4.14 \pm 0.14$  กรัมต่อลิตร (76.4%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติก  $2.08 \pm 0.1$  กรัมต่อลิตร (67.1%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก  $2.02 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร (61.9%) แต่เมื่อนำแผ่นกรองเคลือบจากการใช้กรดไนตริกมาบดให้เป็นผงแล้วเปรียบเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลในน้ำเรียงจากมากไปหาน้อยคือ ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 4.09 กรัมต่อลิตร (92.4%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 3.01 กรัมต่อลิตร (92.1%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.04 กรัมต่อลิตร (91.1%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.98 กรัมต่อลิตร (86.4%) > ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร (85.7%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 2.13 กรัมต่อลิตร (78.1%) เมื่อครบเวลา 300 นาที

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5687154320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: CARBARYL; PHOTOCATALYSIS; TITANIUM DIOXIDE

SIREEPUS KOYPOKAIKAWAN: PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF CARBARYL RESIDUE IN WATER USING TITANIUM DIOXIDE-COATED GLASS FIBER FILTER. ADVISOR: ASST. PROF. ACHARIYA SURIYAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PARADEE CHUAYBAMROONG, Ph.D., 124 pp.

The objective of this study was to degrade carbaryl in water, concentration of 10 mg/L, with photocatalysis by using Degussa P25 comparing with TiO<sub>2</sub>-coated glass-fiber filter. The coating procedure was sol-gel method prepared from titanium (IV) isopropoxide as a sol precursor, mixed with polyethylene glycol molecular weight of 4000 and either nitric acid or acetic acid or hydrochloric acid. The photocatalytic reactions were provoked by black light irradiation for 300 minutes. Every 30 minutes, the carbaryl in water was measured its light absorbance at 220 nanometer using a UV-Vis spectrophotometer. The results showed that a 2 g/L of Degussa P25 was the optimum concentration which could degrade 95.5% of carbaryl. For TiO<sub>2</sub> sol-gel coated filter using nitric acid, calcination temperature of 470 °C clearly showed anatase crystal. With 0.53-0.54 g TiO<sub>2</sub> per filter (concentration of 2.65 ± 0.027 g TiO<sub>2</sub>/L), the maximum carbaryl degradation, 84.4%, was obtained from nitric acid sol-gel. When acetic acid was applied to the sol, the calcination temperature of 460 °C was the best for anatase crystallization. With 1.07-1.2 g TiO<sub>2</sub> per filter (5.78 ± 0.37 g TiO<sub>2</sub>/L), the highest carbaryl degradation was 85.4%. When hydrochloric acid was used in the sol, anatase crystallization was found at 600 °C. The best TiO<sub>2</sub> loading was 0.51±0.005 g per filter. With 2.56±0.02 g TiO<sub>2</sub>/L, the maximum carbaryl degradation, 73.9%, was obtained. When simultaneously applying the best TiO<sub>2</sub> loading of each sol-gel coated filter and Degussa P25 for carbaryl degradation, the photocatalytic efficiencies were 2 g/L Degussa P25 (100%) > 2.07±0.004 g/L nitric-sol filter (86.9%) > 4.14±0.14 acetic-sol filter (76.4%) > 2.08±0.1 g/L acetic-sol filter (67.1%) > 2.02±0.02 g/L hydrochloric-sol filter (61.9%). However, when nitric-sol coated filters were ground as powder and simultaneously tested with Degussa P25 for carbaryl degradation, the photocatalytic efficiencies order after 300 minutes of irradiation were 4.09 g/L nitric sol (92.4%) > 3.01 g/L nitric sol (92.1%) > 5.04 g/L nitric sol (91.1%) > 5.98 g/L nitric sol (86.4%) > 2 g/L Degussa P25 (85.7%) > 2.13 g/L nitric sol (78.1%).

Field of Study: Environmental Science

Academic Year: 2016

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา สุริยะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางหลักการในงานวิจัย เพิ่มเติมขีดความสามารถที่ขาดตกบกพร่องให้เป็นงานวิจัยที่สมบูรณ์

ดร.สิทธิสุนทร สุโพธิณะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ที่คอยให้คำปรึกษา อนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือการตรวจวิเคราะห์ และเป็นแรงสนับสนุนในการทำงานวิจัยในทุกๆ เรื่อง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยชี้แนะแนวทางให้งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ขอบคุณทุกๆ ความช่วยเหลือของสมาชิกในห้องปฏิบัติการโฟโตคะตะไลซิส ห้อง 203 บร. 3 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่เป็นทั้งแรงผลักดัน และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีให้เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 คาร์บาริล (Carbaryl).....	6
2.1.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis).....	9
2.1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	9
2.1.2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process).....	14
2.1.3 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel Process).....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี.....	25

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	25
3.1.2 สารเคมี.....	26
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	27
3.2.1 การเตรียมสารละลายคาร์บาริล .....	27
3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25).....	27
3.2.3 การเตรียมโซลไทเทเนียมไดออกไซด์และการเคลือบบนแผ่นกรองใยแก้ว.....	29
3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....	31
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา.....	33
4.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	33
4.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....	40
4.2.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดไนตริก.....	41
4.2.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดอะซิติก.....	54
4.2.3 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดไฮโดรคลอริก.....	68
4.3 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจล .....	81
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา .....	97
5.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	97
5.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....	97
5.2.1 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริก.....	97
5.2.2 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติก.....	98



5.2.3 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก.....	98
5.3 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (BET).....	99
5.4 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (XRD).....	99
5.5 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ (EDX).....	99
5.6 การดูดซับคาร์บอนในที่มีด และอิทธิพลของแสงในห้องปฏิบัติการ (visible light).....	100
5.7 พิเอชน้ำ.....	100
5.8 การนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม.....	101
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	109
ก การคำนวณอัตราการสลายตัวของคาร์บอนิลโดยวิธีการจลนพลศาสตร์.....	110
ข รูปแบบการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์บาริล ..... 7
2.2	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 10
2.3	ความแตกต่างของโครงสร้างอะนาเทสและโครงสร้างรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 12
4.1	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไนตริก ..... 42
4.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริก .... 46
4.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบที่ใช้กรดไนตริก ..... 46
4.4	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดอะซิติก ..... 56
4.5	การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติก ... 59
4.6	องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล ..... 60
4.7	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไฮโดรคลอริก ..... 70
4.8	การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก ..... 73
4.9	องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล ..... 73
4.10	การเปรียบเทียบ XRD, EDX และ BET จากการใช้กรดแต่ละชนิดในกระบวนการโซล-เจล ..... 86
4.11	ค่าความชุ่มของน้ำตัวอย่างที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .... 92
4.12	ค่าความชุ่มของน้ำตัวอย่างที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .... 94
ก.1	สัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน ..... 112
ก.2	สัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของผงไทเทเนียมไดออกไซด์กับโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก ..... 113

## สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	6
2.2	7
2.3	9
2.4	11
2.5	13
2.6	14
2.7	16
2.8	17
2.9	20
2.10	20
3.1	28
3.2	28
3.3	30
3.4	31
3.5	32
4.1	34
4.2	38
4.3	39
4.4	40
4.5	41

ภาพที่	หน้า
4.6 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล.....	44
4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการ โซล-เจล.....	47
4.8 การสลายตัวของโพลิเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ กรดไนตริก.....	49
4.9 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไนตริก และใช้จำนวนชั้น เคลือบที่ต่างกัน.....	50
4.10 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกใน กระบวนการโซล-เจล.....	53
4.11 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ กรดอะซิติก.....	55
4.12 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล.....	57
4.13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการ โซล-เจล.....	60
4.14 การสลายตัวของโพลิเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้ กรดอะซิติก.....	63
4.15 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดอะซิติก และใช้จำนวนชั้น เคลือบที่ต่างกัน.....	64
4.16 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกใน กระบวนการโซล-เจล.....	67
4.17 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจล ที่ใช้กรด ไฮโดรคลอริก.....	69
4.18 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล....	71
4.19 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกใน กระบวนการโซล-เจล.....	74

ภาพที่	หน้า
4.20 การสลายตัวของโพลีเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก .....	76
4.21 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน .....	77
4.22 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล .....	80
4.23 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจล .....	82
4.24 ปีกเกอร์ทดลองที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบ .....	84
4.25 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดต่างชนิดกันในกระบวนการโซล-เจล .....	85
4.26 ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลและน้ำกลั่นที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล .....	88
4.27 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .....	90
4.28 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .....	91
4.29 การดูดซับและการสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .....	93
4.30 ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .....	95
ก.1 จลนพลศาสตร์ทางเคมีเมื่อใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน .....	111
ก.2 เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ทางเคมีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์กับโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก .....	113
ข.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดไนตริก ครั้งที่ 1 .....	115

ภาพที่	หน้า
ข.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตไนตริก ครั้งที่ 2 .....	116
ข.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตไนตริก ครั้งที่ 3 .....	117
ข.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตอะซิติก ครั้งที่ 1.....	118
ข.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตอะซิติก ครั้งที่ 2.....	119
ข.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตอะซิติก ครั้งที่ 3.....	120
ข.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตไฮโดรคลอริกครั้งที่ 1.....	121
ข.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตไฮโดรคลอริกครั้งที่ 2.....	122
ข.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตไฮโดรคลอริกครั้งที่ 3.....	123



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรมเนื่องจากมีลักษณะภูมิศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการทำการเกษตร มีประชากรประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก มีการผลิตเพื่อบริโภคภายในประเทศและมีการส่งออกสินค้าทางการเกษตรเป็นอันดับต้นๆ ของโลก จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติที่ทำการสำรวจลักษณะการทำงานของประชากร ปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีผู้ประกอบอาชีพทั้งหมด 38.07 ล้านคน แบ่งเป็นผู้ประกอบอาชีพเกษตรกรรม 12.3 ล้านคน หรือคิดเป็น 34% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดของผู้ประกอบอาชีพในประเทศไทย (กระทรวงสาธารณสุข, 2557) โดยในกิจการที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรพบว่ามีผู้นำเข้าปริมาณวัตถุอันตรายทางการเกษตรในปี พ.ศ. 2553 - 2558 สูงถึง 117,815 - 149,546 ตัน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559) ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืช และการแพร่กระจายตกค้างในบริเวณกว้าง ส่วนหนึ่งมีการตกค้างในดินและลำต้นพืชหลังการฉีดพ่น บางส่วนฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศ บางส่วนซึมลงไปดิน แต่ส่วนใหญ่จะถูกฝนชะ และพัดพาไปกับน้ำไหลบ่าหน้าดิน ไหลลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งสารเหล่านี้มักมีพิษเฉียบพลัน สลายตัวได้ยาก (กรีนเนท, 2559) และเมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบห่วงโซ่อาหารและคุณภาพชีวิตของประชาชน

สารกำจัดแมลงในกลุ่มคาร์บาเมทที่นิยมใช้มากที่สุดคือสารคาร์บาริลซึ่งเป็นชนิดดูดซึมดี ใช้กันอย่างแพร่หลายกันมากกว่า 30 ปี เป็นสารกำจัดแมลงในลักษณะสัมผัสตาย (กรีนเนท, 2559) สามารถใช้กำจัดแมลงได้มากกว่าร้อยชนิด นิยมใช้กำจัดแมลงในฝ้าย ข้าวโพด ถั่วเหลือง และตามสวนต่างๆ (World Health Organization, 1986) คาร์บาริลมีความเป็นพิษต่อการสัมผัสและระบบทางเดินหายใจ สามารถยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่สำคัญชนิดหนึ่งในระบบประสาทของมนุษย์ สัตว์มีกระดูกสันหลัง และแมลง (ปิยะรัตน์ จันทร์ศิริพรชัย และคณะ, 2551) จึงทำให้เกิดอาการทางประสาท หลอดลมตีบ กล้ามเนื้อกระดูก ผิวน้ำแข็ง ชัก หมดสติหรือเกิดการล้มเหลวของระบบทางเดินหายใจ (Windholz และคณะ, 1983) คาร์บาริลมีความคงตัวในน้ำที่เป็นกรดและสลายตัวได้ดีในสภาวะต่าง ตกค้างในดินมากที่สุดนานประมาณ 50 อาทิตย์และในน้ำนานประมาณ 30 อาทิตย์ (World Health Organization, 1986)

ในประเทศไทยมีการศึกษาวิธีการสลายสารกำจัดศัตรูพืชในน้ำที่น้อยมาก โดยทั่วไปจะเน้นไปที่การสำรวจปริมาณสารตกค้างตามแหล่งน้ำต่างๆ มากกว่า เช่น การศึกษาการปนเปื้อนของวัตถุมีพิษทางการเกษตรในแม่น้ำท่าจีน ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงสิงหาคม พ.ศ. 2548 พบสารกลุ่มคาร์บาเมทชนิด

คาร์บาริล 0.01-0.03 ไมโครกรัมต่อลิตร และคาร์โบซิลแพน 0.05-0.20 ไมโครกรัมต่อลิตร (ปรีชา ฉัตรสันติประภา และคณะ, 2548) ส่วนการสำรวจในแม่น้ำบางปะกง ช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2548 ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2549 พบสารกลุ่มคาร์บาเมทชนิดคาร์บาริล 0.10-0.53 ไมโครกรัมต่อลิตร และ สารคาร์โบซิลแพน 0.11 ไมโครกรัมต่อลิตร พบสารกำจัดวัชพืชชนิดอะทราซีน 0.01-0.61 ไมโครกรัมต่อลิตร (ผกาสินี คล้ายมาลา และคณะ, 2549) นอกจากนี้ ยังมีการสำรวจคาร์บาริลและคลอร์ไพริฟอสบริเวณสนามกอล์ฟแหลมฉบังอินเตอร์เนชันแนล คันทรีคลับ หลังการฉีดพ่นสารกำจัดแมลง 3 วัน พบคาร์บาริลในน้ำบริเวณทะเลสาบใกล้ที่-ออฟ 11 ไมโครกรัมต่อลิตร และในอ่างเก็บน้ำนอกโครงการ 12 ไมโครกรัมต่อลิตร (พรพิมล เจริญสง, 2538) โดย Environmental Protection Agency (2012) ได้กำหนดปริมาณของคาร์บาริลในแหล่งน้ำสูงสุดไม่ควรเกิน 2.1 ไมโครกรัมต่อลิตร การศึกษานี้จึงสนใจที่จะสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการสลายสารอินทรีย์รวมถึงสารกำจัดศัตรูพืชให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Fujishima และคณะ, 2006) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อตัวคะตะลิสต์ (เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์) ได้รับการกระตุ้นจากแสงที่มีพลังงานที่มากพอ ซึ่งการศึกษาในช่วงแรกๆ นั้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้มักอยู่ในรูปของผง เช่น Marie Herrmann และคณะ (1999) ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดสารพริมีฟอสเมธิล ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารกำจัดแมลง ความเข้มข้น 9.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้รังสียูวีจากหลอดไฟความเข้ม 40 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถสลายพริมีฟอสเมธิลได้ 90% ภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในขณะที่ Tamimi และคณะ (2006) ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 250 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดสารเมทโรมิล ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารกำจัดแมลง ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้รังสียูวีจากหลอดไฟ 125 วัตต์ สามารถสลายเมทโรมิลได้ 80% ภายในระยะเวลา 45 นาที แต่ในการนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้จริงงานอาจพบปัญหาการแยกผงออกจากน้ำที่บำบัดเสร็จแล้ว

การศึกษาในช่วงหลังจึงนิยมใช้การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวกลางต่างๆ ซึ่งช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ หนึ่งในวิธีการเคลือบที่นิยมคือการใช้กระบวนการโซล-เจลที่ใช้การเปลี่ยนสถานะสารจากของเหลว (sol) ไปเป็นของแข็ง (gel) สามารถเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวกลางได้ง่าย โดยกระบวนการโซล-เจลนี้มีความบริสุทธิ์สูง เพราะเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลและสามารถกำหนดสมบัติทางกายภาพ เช่น ความขรุขระของผิวและการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ตามอัตราส่วนที่ต้องการได้ โดยมีผู้ประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจลในการสลายสารกำจัดแมลงในน้ำ เช่น Yu และคณะ (1999) ใช้สารเตตระบิวทิลอโธไทแทนเต (tetrabutylorthotitanate) เป็น



สารตั้งต้นของกระบวนการโซล-เจล มีโพลีเอทิลีน ไกลคอล (polyethylene glycol: PEG) น้ำหนักโมเลกุล 2000 และ 4000 เป็นตัวช่วยให้เกิดรูพรุน พบว่าการใส่ PEG น้ำหนักโมเลกุล 4000 จำนวน 0.5 กรัม ภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ 6 ชั่วโมง สามารถลดสารกำจัดแมลงไดเมทิล-2 (dimethyl-2) และ 2-ไดคลอโรไวนิล ฟอสเฟต (2-dichlorovinyl phosphate) ได้ 80% ส่วนการใส่ PEG น้ำหนักโมเลกุล 2000 จำนวน 0.5 กรัม ใช้แสงจากดวงอาทิตย์ 6 ชั่วโมง สามารถลดสารกำจัดแมลงดังกล่าวได้ 100% ในขณะที่ Gelover และคณะ (2004) ใช้สารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) เคลือบลงบนตัวกลางที่เป็นกระจกในการกำจัดน้ำที่ปนเปื้อนสารกำจัดแมลง 4-คลอโรฟีนอล (4-chlorophenol) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีนเปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดสาร 4-คลอโรฟีนอลได้ 70% ส่วนการใช้กระบวนการโซล-เจลเคลือบลงบนกระจกสามารถกำจัดได้ 80% และการใช้โซล-เจลร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถกำจัดสารกำจัดแมลงได้ถึง 98%

อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นการสลายสารคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจล ในประเทศไทยยังไม่มีผู้ศึกษา ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการใช้โซล-เจลที่เตรียมจากสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ร่วมกับโพลีเอทิลีน ไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 4000 เคลือบลงบนตัวกลางที่เป็นแผ่นกรองใยแก้ว (glass-fiber filter) ภายใต้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ในปริมาณต่างๆ โดยในขั้นตอนของการเตรียมโซลนั้น มีการทดลองใช้กรดชนิดต่างๆ กัน ได้แก่ กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากกรดไนตริกช่วยให้ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการเผามีขนาดเล็ก เพราะกรดไนตริกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ ทำให้การเกาะกันของสารเกิดได้มากขึ้นจึงมีหมู่อัลคิลหลงเหลืออยู่มาก (Sayilkan และคณะ, 2005) ในขณะที่กรดอะซิติกทำให้โครงสร้างของเจลในกระบวนการโซล-เจลมีความแข็งแรงเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นกิ่ง (Suresh และคณะ, 1998) ส่วนกรดไฮโดรคลอริกทำให้การแทนที่ของหมู่อัลคิลเกิดได้ดีเนื่องจากการแตกตัวที่ดี (Sayilkan และคณะ, 2005) การศึกษานี้จึงต้องการศึกษากรดที่เหมาะสมในกระบวนการโซล-เจลสำหรับการสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำ รวมถึงอุณหภูมิการเผา (calcination) ที่เหมาะสม และจำนวนชั้นเคลือบหรือน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนแผ่นกรอง ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการสลายปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในแหล่งน้ำชนิดอื่นๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสลายสารคาร์บาริลในน้ำ

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบการใช้กรดต่างชนิดกันในกระบวนการโซล-เจลสำหรับการเตรียมแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเผา (calcination) และน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองใยแก้วที่เหมาะสมในการสลายสารคาร์บาริลในน้ำ

### 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 ถ้าการใช้กรดต่างชนิดกันมีอิทธิพลต่ออัตราการควบแน่น ซึ่งมีผลต่อการเกิดขนาดรูพรุน และปริมาณพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นกรดที่มีอัตราการควบแน่นที่เหมาะสมจะทำให้รูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็ก และมีปริมาณพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการสลายสารคาร์บาริลดีที่สุด

1.3.2 ถ้าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองใยแก้วมีผลต่อประสิทธิภาพการสลายสารคาร์บาริล ดังนั้นปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมย่อมสลายคาร์บาริลได้ดีกว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไป

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สารละลายคาร์บาริลในการทดลองกำหนดความเข้มข้นคงที่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมมาจากสารคาร์บาริลยี่ห้อทางการค้า เอส-85 มีส่วนประกอบ 1-naphthyl methyl carbamate จำนวน 85%

1.4.2 การศึกษาทดลองเป็นแบบทีละเท โดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์แช่ในน้ำตัวอย่างที่มีสารคาร์บาริลละลายอยู่ภายใต้รังสียูวีเอ จากหลอดไฟแบล็คไลท์ เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง ทุกๆ 30 นาที มีการดูน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารคาร์บาริลในน้ำด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร โดยใช้การสแกนคลื่นตั้งแต่ 190-350 นาโนเมตร ในกรณีของการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) น้ำตัวอย่างนั้นถูกกรองผ่านแผ่นกรองไนลอน (nylon syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมครอน ก่อนการวิเคราะห์ทุกครั้ง

1.4.3 สถานที่ทดลอง ปฏิบัติงานที่ห้อง 203 อาคารบรรยายรวม 3 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ กระทำที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สร้างองค์ความรู้ในการสลายสารกำจัดศัตรูพืชด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจล

1.5.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment หรือ Tertiary Treatment) ในการลดสารตกค้างของคาร์บาริลในแหล่งน้ำได้

1.5.3 สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำต่อไป



## บทที่ 2

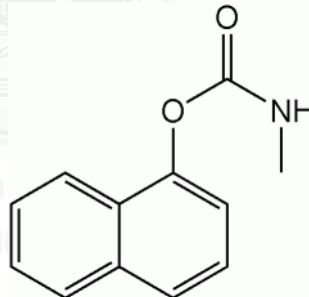
### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สารกำจัดศัตรูพืชสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สารเคมีกำจัดวัชพืช (herbicide) หมายถึง สารเคมีที่ใช้ป้องกันหรือขัดขวางการเจริญเติบโตของพืช หรือกำจัดพืชที่ขึ้นในที่ที่ไม่ต้องการ สารเคมีกำจัดแมลง (insecticide) หมายถึง สารที่ใช้กำจัดหรือป้องกันแมลง อาจเป็นสารประกอบทางเคมีที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นหรือเป็นสารเคมีที่ได้จากธรรมชาติ และสารเคมีกำจัดเชื้อรา (fungicide) หมายถึง สารเคมีที่มีคุณสมบัติป้องกันความเสียหายที่มีสาเหตุมาจากเชื้อราที่ทำลายผลผลิต (ศิริพันธ์ สุขมาก, 2540)

##### 2.1.1 คาร์บาริล (Carbaryl)

คาร์บาริล มีชื่อทางเคมี คือ 1-naphthalenyl methylcarbamate สูตรโมเลกุล  $C_{12}H_{11}NO_2$  เป็นสารเคมีกำจัดแมลงในกลุ่มคาร์บาเมท ชนิด N-methyl น้ำหนักโมเลกุล 201 กรัมต่อโมล (Matsumura, 1976) และมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของคาร์บาริล

(Gilbert, 2014)

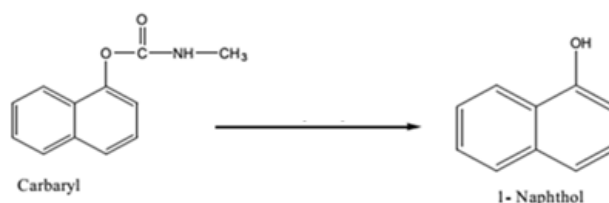
ลักษณะคาร์บาริลบริสุทธิ์จะเป็นผลึกสีขาว จุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 142–143 องศาเซลเซียส ไม่กัดกร่อนภาชนะบรรจุและเครื่องฉีดพ่น สูตรคาร์บาริลที่มีจำหน่ายทั่วไปจะมีสารออกฤทธิ์ผสมอยู่ 85% นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบพิษชนิดผสมระหว่างคาร์บาริลกับแกรมมา-บีเอชซี ( $\gamma$ -BHC) กับโมเลส (molasses) อีกด้วย (Matsumura, 1976)

การสลายตัวของคาร์บาริลในน้ำมีมากกว่าในดิน ซึ่งปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์บาริลได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์บาริล

ปฏิกิริยา	การเกิดปฏิกิริยา
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)	การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของคาร์บาริลขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของน้ำ ถ้าพีเอชสูงขึ้นระยะเวลาที่คาร์บาริลสลายตัวไปครึ่งหนึ่ง (half-life period) จะน้อย ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 0.15 วัน และที่พีเอช 5 อุณหภูมิ 47 องศาเซลเซียส มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 1,500 วัน (Wolfe และคณะ, 1987)
ปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis)	คาร์บาริลสลายตัวได้รวดเร็วภายใต้แสงแดดที่มีพีเอช 5.5 มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 45 ชั่วโมง แต่ในน้ำกลั่นภายใต้แสงแดดคาร์บาริลจะไม่สลายตัว ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสของคาร์บาริลในธรรมชาติขึ้นอยู่กับฤดูกาล ในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมากกว่าฤดูหนาวถึง 4 เท่า (Wolfe และคณะ, 1987)
ปฏิกิริยาไบโอดีไฮซิส (biolysis)	เป็นปฏิกิริยาการสลายตัวโดยจุลินทรีย์ Paris และคณะ (1987) กล่าวว่าแบคทีเรียไม่สามารถสลายคาร์บาริลได้ แต่ 1-naphthol สามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว โดยแบคทีเรียในน้ำ เช่น <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Brevibacteria</i> และ <i>Flavobacterium</i> ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ใช้ 1-naphthol เป็นแหล่งคาร์บอน

ในไฮโดรไลซิส และโฟโตไลซิสคาร์บาริลจะมีการสลายตัวโดยคาร์บามेट เอสเตอเรส เป็น 1-naphthol ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ผลผลิตที่ได้จากการไฮโดรไลซิสและโฟโตไลซิสของคาร์บาริล

(Matsumura, 1976)

Environmental Protection Agency (2012) ได้กำหนดปริมาณของคาร์บาริลในแหล่งน้ำสูงสุดไม่ควรเกิน 2.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ขณะที่สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ (2530) กำหนดเกณฑ์คุณภาพน้ำเพื่อการคุ้มครองทรัพยากรสัตว์น้ำจืด สำหรับ คาร์บาริล ไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

การศึกษาความเป็นพิษของคาร์บาริลมีการศึกษาทั้งความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) และความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (chronic toxicity) แต่ส่วนใหญ่ในคาร์บาริลจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันเนื่องจากคาร์บาริลเป็นสารที่สลายตัวได้เร็วแต่เป็นพิษร้ายแรงกับสิ่งมีชีวิต

ความเป็นพิษเฉียบพลันต่อสัตว์น้ำ จากการศึกษาใน *Daphnia pulex* กับ *Simocephalus serrulatus* พบว่าค่า  $LC_{50}$  ที่ 48 ชั่วโมง เท่ากับ 0.0064 และ 0.0076 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (Sanders และคณะ, 1966) จากการศึกษาของ Kulshrestha และคณะ (1984) ได้นำปลาช่อนความยาว 14 เซนติเมตร มาสัมผัสกับคาร์บาริลเข้มข้น 10 และ 20 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 30 วัน ในระยะแรกผิวหนังชั้น epidermis และชั้น dermis ถูกทำลาย เมื่อสัมผัสเป็นเวลานานขึ้น ชั้นระหว่างผิวหนังกับกล้ามเนื้อ (subcutaneous) และชั้นกล้ามเนื้อถูกทำลายเพิ่มขึ้น และเซลล์สร้างเม็ดสี (chromatophore) เพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่วนเกล็ดยังไม่ถูกทำลาย จึงกล่าวได้ว่าผิวหนังของปลาเมื่อได้รับคาร์บาริลจะเกิดความเสียหายทันที หรือในการศึกษาของ Jauhar และคณะ (1985) ศึกษาในปลาช่อนโดยนำเหงือกของปลาช่อนมาสัมผัสกับคาร์บาริลพบว่าเซลล์บุผิวของเหงือกที่ใช้แลกเปลี่ยนก๊าซกร่อนและตายไปในที่สุด ทำให้พื้นที่การหายใจลดลง สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาความเป็นพิษของคาร์บาริลต่อหนูจากการให้หนูกินสารคาร์บาริล ได้ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันเท่ากับ 560 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักหนู 1 กิโลกรัม (ประยูร ดีมา, 2522) หรือในการศึกษาของ นงนุช อ่องสุวรรณ (2530) ได้ศึกษาปลาช่อนที่ได้รับสัมผัสคาร์บาริล 0.1 พีพีเอ็ม เป็นเวลามากกว่า 30 วัน พบว่าเซลล์เยื่อบุเหงือกเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่วนของกิ่งเหงือกจะเพิ่มติดกัน ส่วนที่ตับจะมีเนื้อเยื่อที่เกี่ยวพันต่อหุ้มตับจำนวนมากขึ้น ซึ่งความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บาริลและระยะเวลาที่สัมผัส

สารคาร์บาริลมีคุณสมบัติเป็นตัวยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส (cholinesterase) ซึ่งการขาดเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส จะทำให้กล้ามเนื้อเกิดการกระตุกรัวทำงานไม่หยุด ทำให้เกิดการเพิ่มการบีบตัวของทางเดินอาหาร สารคาร์บาเมทจะเป็นตัวยับยั้งเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรส ที่เป็นพวกเมทธิลคาร์บาเมต (methyl-carbamate) ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนกลับได้ คือหลังจากที่คาร์บาเมททำปฏิกิริยาหมดไป คาร์บาเมทโคลีนเอสเตอเรสที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้เป็นเอ็นไซม์โคลีนเอสเตอเรสอิสระอีกครั้ง ภายในเวลาไม่นาน (Matsumura, 1976)

## 2.1.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

### 2.1.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมจัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันแถวแรกของตารางธาตุ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

(SpecialChem, 2014)

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีมวลโมเลกุล 79.9 กรัมต่อโมล (สยามเคมี, 2558) และมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Fujishima และคณะ, 2000) คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงได้ในตารางที่ 2.2

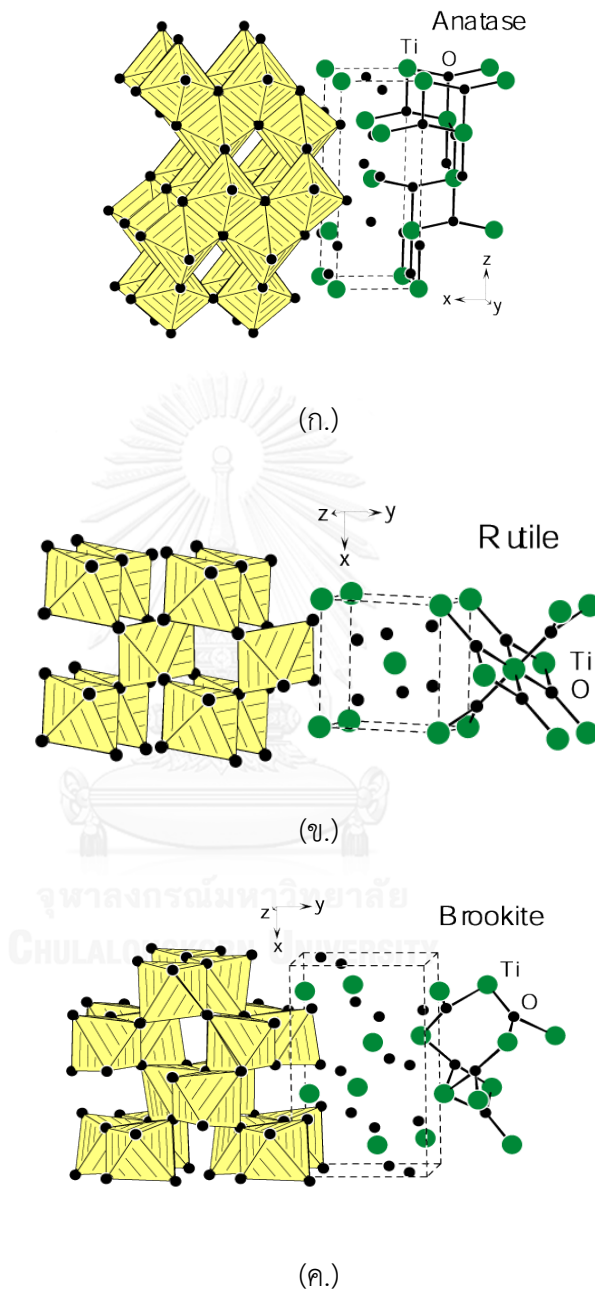
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	
สูตรโมเลกุล	TiO <sub>2</sub>
มวลโมเลกุล	79.9 กรัมต่อโมล
จุดเดือด	2,500-3,000 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1,840 องศาเซลเซียส
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.2 อิเล็กตรอนโวลต์
ความถ่วงจำเพาะ	3.9
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	ไม่ส่งผลกระทบ
ความเสถียร	มีความเสถียรสูง
ความสามารถในการละลาย	ต่ำ

ที่มา: Wold (1993)



ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างที่พบมากอยู่ 3 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างอะนาเทส โครงสร้างรูไทล์ และโครงสร้างบรูไคต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

(ก.) โครงสร้างอะนาเทส (Anatase) (ข.) โครงสร้างรูไทล์ (Rutile) (ค.) โครงสร้างบรูไคต์ (Brookite)

(Riedel, 2004)

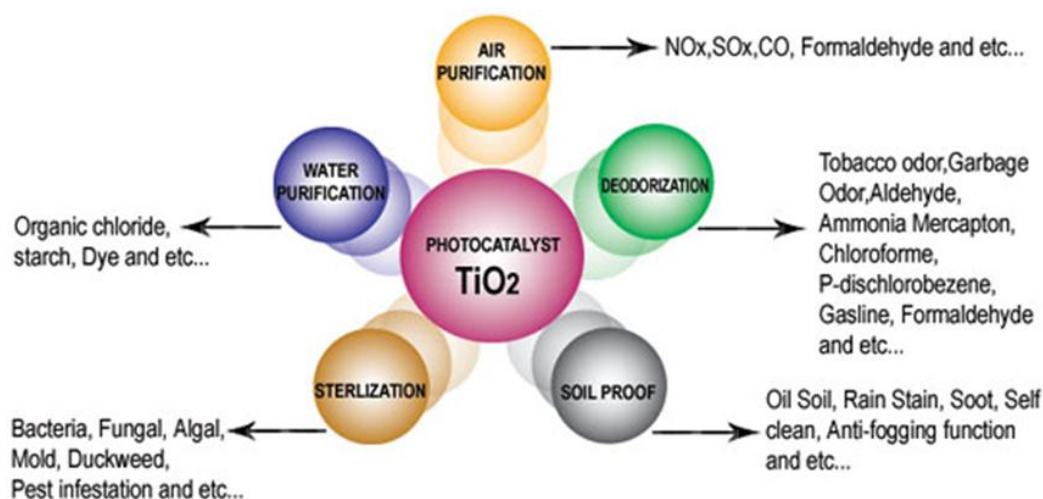
จากภาพที่ 2.4 โครงสร้างอะนาเทส เป็นโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล จะมีความเสถียรสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่อุณหภูมิจะไม่สูงเท่าโครงสร้างรูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในการฉายแสง โครงสร้างรูไทล์ เป็นโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) จะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะพบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์มากในอุตสาหกรรมโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานอาหาร และบางครั้งอาจพบได้ในหินอัคนี ขณะที่โครงสร้างบรูคิต เป็นโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) จะพบได้ในแร่เท่านั้น โครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในการวิจัยคือ โครงสร้างอะนาเทส และโครงสร้างรูไทล์ (ฐาปพันธ์ พุทธิธา, 2549) โดยที่โครงสร้างอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าโครงสร้างรูไทล์ที่มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.03 อิเล็กตรอนโวลต์ (Yang และคณะ, 2002) ซึ่งถ้ามีโครงสร้างแบบรูไทล์มากก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยามีประสิทธิภาพน้อยเนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานน้อยจะทำให้เกิดการตกกลับ (recombination) ของอิเล็กตรอนได้ง่าย ตารางที่ 2.3 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างของอะนาเทส และโครงสร้างรูไทล์

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของโครงสร้างอะนาเทสและโครงสร้างรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ลักษณะสมบัติของโครงสร้าง	โครงสร้างอะนาเทส	โครงสร้างรูไทล์
รูปร่างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
ค่าช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	3.20	3.03
มาตรฐานความแข็งของโมห์ (โมห์)	5.5-6.0	6.0-7.0
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	3.894	4.250
พลังงานอิสระ (กิโลแคลอรีต่อโมล)	-211.4	-212.6
ค่าคงตัวแลตติซ, a (อังสตรอม)	3.784	4.593
ค่าคงตัวแลตติซ, c (อังสตรอม)	9.515	2.959
จุดหลอมเหลว	เปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C	1,858 °C

ที่มา: Linsebigler และคณะ (1995)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้หลากหลาย ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานด้านต่างๆ

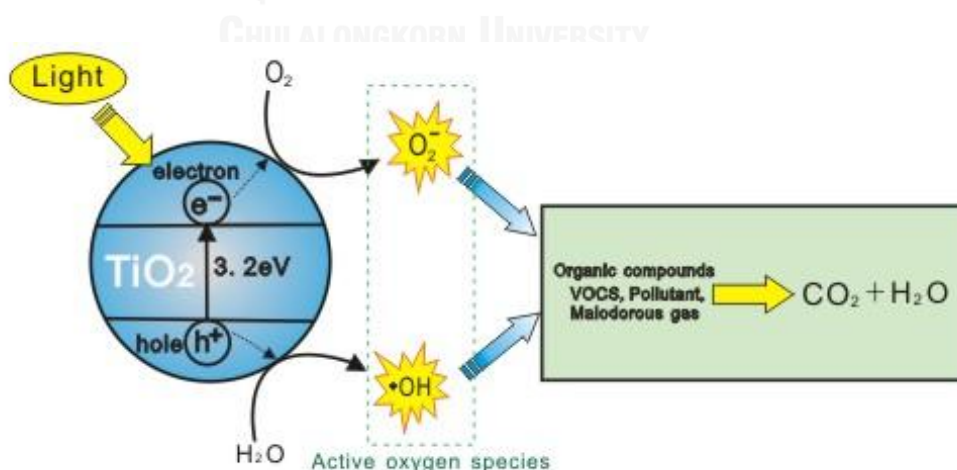
(Haxim Power Inc, 2005)

จากภาพที่ 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฟอกอากาศ เช่น กำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และฟอร์มัลดีไฮด์ (CH<sub>2</sub>O) รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่นๆ ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม และเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะได้ สามารถประยุกต์ใช้ในการระงับกลิ่น กำจัดกลิ่นได้ด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารให้แตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (volatile organic compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มัลดีไฮด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง ควันเกสรดอกไม้ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ด้วยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำความสะอาดตัวเองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ผนังด้านนอกของอาคารที่ต้องเจอกับคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวป้องกันคราบได้ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง ทำให้สามารถถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดายเมื่อฝนตกลงมา ส่งผลให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ ที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือการประยุกต์ใช้ในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น เชื้อรา เชื้อแบคทีเรีย และประยุกต์ใช้ในการทำให้น้ำมีความบริสุทธิ์ (Haxim Power Inc, 2005)

#### 2.1.2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis Process)

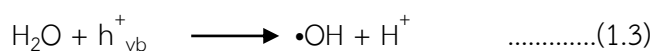
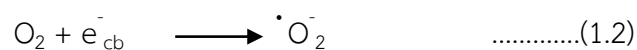
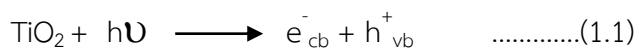
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ถูกนำมาศึกษาในน้ำโดย Fujishima เป็นผู้ริเริ่ม ในปี ค.ศ. 1969 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงซึ่งจะใช้วัสดุในกลุ่มสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารโฟโตคะตะไลสต์หลักการของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคือ เมื่อวัสดุโฟโตคะตะไลสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสง จะมีการดูดซับพลังงานในขนาดที่เท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารนั้น ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ให้กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชัน จึงทำให้แถบวาเลนซ์เกิดหลุมช่องว่างเป็นประจุบวก (hole:  $h^+$ ) และเมื่อมีการสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะเกิดเป็น ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot OH$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชันมีประจุลบจะไปจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $O_2^-$ ) และสารทั้งสองตัว คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\cdot OH$ ) และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $O_2^-$ ) นี้เป็นตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆทำให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์

(Danish, 2014)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้  
(Wold, 1993)



ในการทดลองนี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การฉายแสงให้  
เกิดปฏิกิริยานั้นจึงต้องมีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งก็คือ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงพบว่าต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือ  
เท่ากับ 388 นาโนเมตร ดังคำนวณได้ในสมการที่ 1.4 จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้  
(ภาณุมาศ นาคเจือทอง, 2554)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ

E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant) =  $6.625 \times 10^{-34}$ ,  
จูล-วินาที

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที<sup>-1</sup>

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง , เมตร

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง =  $2.997 \times 10^8$ , เมตรต่อวินาที

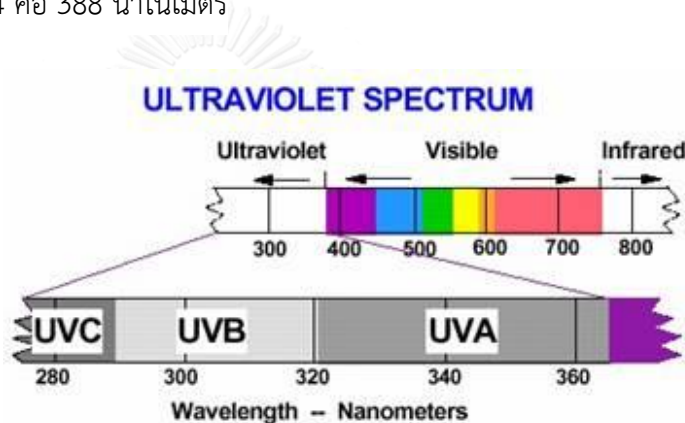
ในกรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีค่าพลังงานควอนตัม  
เท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะคำนวณความยาวคลื่นแสงที่ใช้ได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J-s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.2 \text{ eV}} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \dots(1.4)$$

$$= 3.88 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 388 \text{ nm}$$

รังสีสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคลื่น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลตเอ (UVA) ความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร รังสีอัลตราไวโอเลตบี (UVB) ความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร และ รังสีอัลตราไวโอเลตซี (UVC) ความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งความยาวคลื่นที่คำนวณได้จากสมการที่ 1.4 คือ 388 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.7 ช่วงคลื่น UVA UVB และ UVC

(กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

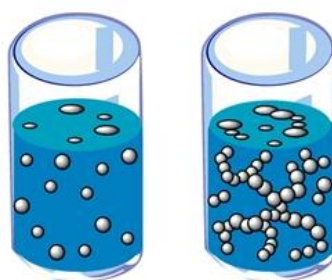
ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส คือ ค่าพีเอชความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณของออกซิเจน และความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ เนื่องจากค่าพีเอช มีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปเมื่อค่า pH สูงหรือต่ำ ซึ่งจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำ และจะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพราะอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำหน้าที่ให้อนุภาคไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\bullet\text{OH}$ ) ที่ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยา และเป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ โดยพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยิ่งมากยิ่งเป็นปัจจัยทำให้เกิดการยึดเกาะกัน ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลจะมีมากขึ้น โอกาสสัมผัสกับอนุโมลอิสระจึงสูงขึ้นด้วย

ขณะที่ปริมาณออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากออกไซด์ของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระซูเปอร์เรดิคัล ( $\cdot\text{O}_2^-$ ) และปัจจัยสุดท้ายคือความเข้มข้นของรังสียูวี เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เทียบเท่ากับช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงจะทำให้อิเล็กตรอนข้ามไปยังชั้นคอนดักชันและเกิดเป็นอนุมูลอิสระได้ (Konstantinou และคณะ, 2001)

### 2.1.3 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel Process)

โซล (sol) คือ การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลว ซึ่งโซลเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก ประมาณ 1-1,000 นาโนเมตร และมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวโดยรอบ จึงทำให้มีแรงต้านทานแรงโน้มถ่วง ไม่มีการตกตะกอนแต่มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กนี้อยู่ทั่วไปในของเหลว

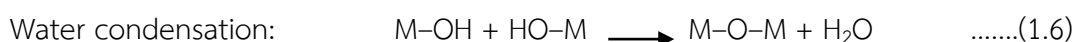
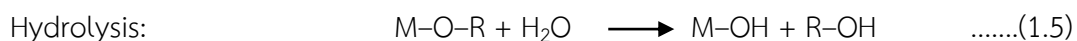
เจล (gel) เป็นคอลลอยด์ที่โครงสร้างของของแข็งเกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง 3 มิติ และมีความพรุนที่กระจายปกคลุมอยู่ทั่วเฟสของเหลว มีขนาดไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุ ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า คอลลอยด์เจล (colloidal gel) ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า คอลลอยด์เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า โพลีเมอริกเจล (Polymeric Gel) (Brinker และคณะ, 1990) ซึ่งโซล และเจลสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเรียงตัวของสถานะของเหลว (sol) และของแข็ง (gel)

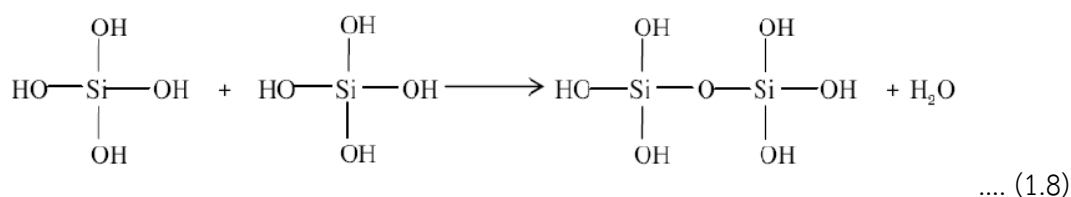
(Max Planck Institute of Colloids and Interfaces, 2014)

การเกิดกระบวนการโซล-เจล จะมี 3 ปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง คือ การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นของน้ำ (water condensation) และ การควบแน่นของแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ดังสมการที่ 1.5 – 1.7 (ราชัน เลิศพยัคฆรัตน์, 2554)



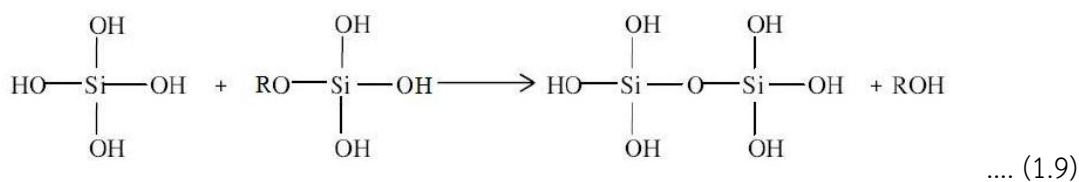
ขั้นตอนการเตรียมโซล-เจลมีทั้งหมด 5 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การเกิดโซล (formation of sol) การเกิดเจล (formation of gel) การบ่ม (aging) การทำแห้ง (drying) และการให้ความร้อน (heat treatment) ขั้นตอนแรก การเกิดโซล คือการผสมสารตั้งต้นกับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้มักเป็น โลหะอัลคอกไซด์ ( $\text{M(OR)}_n$ ) เมื่อ R คือกลุ่มของ  $\text{CH}_3$ -,  $\text{C}_2\text{H}_5$ - และ  $\text{C}_3\text{H}_7$ - เป็นต้น และ M คือ โลหะ เช่น Si, Zr, Ti, Al, Sn และ Ce เป็นต้น เนื่องจากสารประเภทนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีโดย เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ แล้วเกิดเป็นสาร  $\text{-M-OH}$  ปฏิกิริยาในขั้นนี้อาจเกิดได้เร็วขึ้นถ้าเติม กรดหรือเบสลงไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย

ขั้นตอนที่สอง คือการเกิดเจลเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของ  $\text{-M-OH}$  ที่เป็นผลิตภัณฑ์ จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหลังการควบแน่นจะเกิดหมู่  $\text{-M-O-M-}$  ขึ้นซึ่งการควบแน่นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการควบแน่นน้ำและการควบแน่นแอลกอฮอล์ หลังเกิดการควบแน่นน้ำจะได้  $\text{H}_2\text{O}$  และหมู่  $\text{-M-O-M-}$  ดังสมการที่ 1.8 (Brinker และคณะ, 1990)



ส่วนการควบแน่นแอลกอฮอล์ หลังการควบแน่นจะได้ ROH และหมู่  $\text{-M-O-M-}$  ดังสมการที่ 1.9 (Brinker และคณะ, 1990)



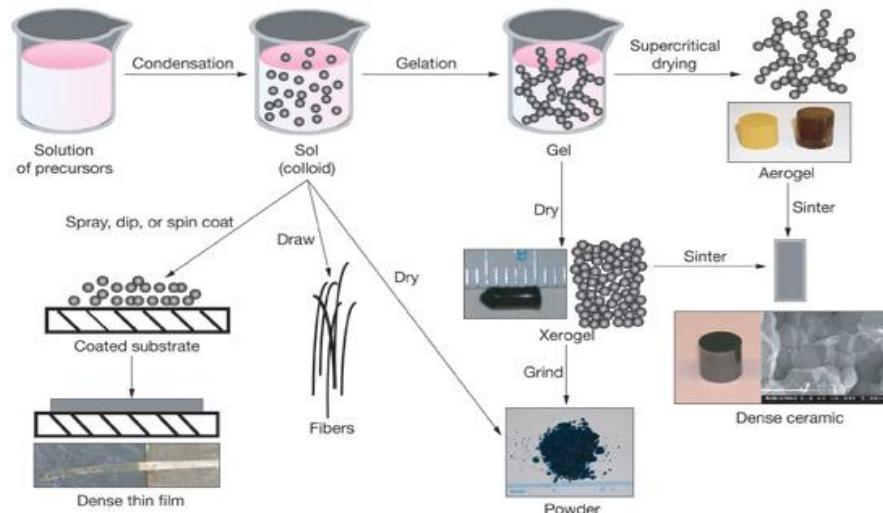


ขั้นตอนที่สามคือ การบ่มซึ่งหมายถึงช่วงระยะเวลาในการทำให้เกิดเจลอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดขึ้นมากมาย ความแข็งแรงของพันธะ -M-O-M- จะเพิ่มขึ้น เจลเหนียวขึ้น และตัวทำละลายจะระเหยออกจากโครงสร้าง ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการบ่ม นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลของการออสโมซิสเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ระบบที่เป็นสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำ เนื่องจากแอลกอฮอล์ระเหยได้ง่ายกว่าน้ำทำให้มีความเข้มข้นของสารละลายแตกต่างกันในบางบริเวณจึงเกิดการแพร่ของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ส่งผลให้เจลเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่สี่คือ การทำให้แห้ง เป็นการไล่ของเหลวในรูพรุนออกจากโครงตาข่ายของเจล โดยในช่วงแรกอัตราการระเหยของเหลวภายในรูพรุนมีค่าคงที่ ซึ่งงานจะหดตัวในปริมาณเท่าๆ กับของเหลวที่ระเหยออกไป จากนั้นการระเหยจะเริ่มยากขึ้นส่งผลให้เจลเกิดการหดตัว นอกจากนี้การไหลของของเหลวออกจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กทำได้ยากกว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีอิทธิพลของความดันคาпилลารี (capillary pressure) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยความดันคาпилลารีจะสูงเมื่อรูพรุนมีขนาดเล็ก และจะมีค่าต่ำเมื่อรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งถ้าขนาดของรูพรุนในเจลมีขนาดแตกต่างกันมากก็จะทำให้ความดันคาпилลารีของรูพรุนที่อยู่ติดกันมีค่าต่างกันมาก ฉะนั้นรูพรุนต้องรับแรงดันที่ต่างกัน นำไปสู่การยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนได้ วิธีที่จะทำให้คงโครงสร้างตาข่ายไว้ได้คือการทำให้มีความแตกต่างกันของความดันน้อยที่สุดโดยควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นเพื่อให้เจลมีขนาดรูพรุนสม่ำเสมอ

ขั้นตอนสุดท้ายคือ การให้ความร้อนเป็นขั้นตอนการนำเจลมาเผาในสภาวะที่มีก๊าซ เช่น การเผาในบรรยากาศของอากาศหรือในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน โดยการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังอยู่ในโครงสร้างให้ออกไป เหลือไว้เฉพาะวัฏภาคของแข็งในรูปของสารประกอบออกไซด์ที่เกิดการหลอมรวมเป็นผลึกของแข็งที่มีโครงสร้างต่างๆ กัน ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเผาได้แก่ อุณหภูมิที่เผา อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน และสภาวะบรรยากาศที่เผา (ราชัน เลิศพยัคฆรัตน์, 2554)

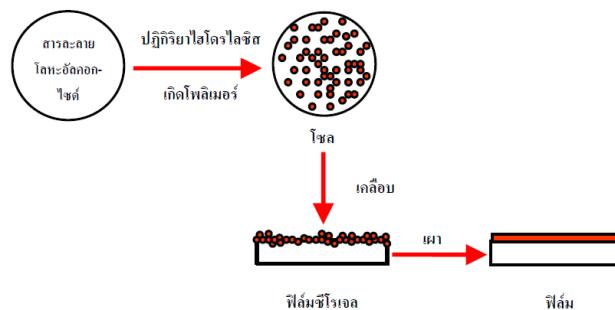
ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็น โคล และเจล เมื่อเข้าสู่สภาวะการให้ความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ผลผลิตในขั้นตอนต่างๆของโซล-เจล

(Lawrence Livermore National Laboratory, 2014)

เมื่อสารประกอบเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวหรือโซล สามารถนำไปปั่น เคลือบ และปั่นลงบนตัวกลางต่างๆ จนได้ความหนาตามที่ต้องการ สามารถนำไปทำเส้นใย (fiber) และทำให้แห้งจนกลายเป็นผง (powder) ได้ เมื่อเป็นของแข็งหรือเจลถ้าทำให้แห้งจะเป็นซีโรเจล (xerogel) สามารถนำไปบดจนเป็นผง และทำให้แห้งมากขึ้นไปอีกจนกลายเป็นแอโรเจล (aerogel) ซึ่งผลผลิตในขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไปได้ แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการเคลือบแผ่นฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การเคลือบโซล-เจลบนตัวกลางโดยทำให้เป็นเนื้อฟิล์มบาง

(ฐานันท์ พุทธา, 2549)

ข้อดีของกระบวนการโซล-เจล คือ ทำให้เกิดพันธะบางๆระหว่างตัวกลาง (substrate) กับสารตัวเคลือบ สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ เคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และมีรูปร่างซับซ้อน กระบวนการโซล-เจลนั้นทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง มีความบริสุทธิ์สูง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถเตรียมได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ (บุษบากร คงเรือง, 2553) แต่อย่างไรก็ตามการนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ นั้นจะต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสาร ศึกษาลักษณะและสมบัติของสาร ซึ่งจะมีความแตกต่างกันแล้วแต่การใช้งาน

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการสลายสารตกค้างส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยที่ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรง เช่น Marie Herrmann และคณะ (1999) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดสารพิริมีฟอสเมธิล ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารกำจัดแมลง ความเข้มข้น 9.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวีความเข้ม 40 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดได้ 90% ภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง งานวิจัยของ Atiqur Rahman และคณะ (2005) ได้ศึกษาการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 1 กรัมต่อลิตร กำจัดสารไดคลอวอส (dichlorvos) ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ในน้ำ และฟอสฟามิดอน (phosphamidon) ความเข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ในน้ำ ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถลดสารไดคลอวอสได้ 98% ในเวลา 80 นาที และลดฟอสฟามิดอนได้ 60% ในเวลา 80 นาที ในขณะที่ Tamimi และคณะ (2006) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดสารเมโทมิล ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารกำจัดแมลง ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงยูวี 125 วัตต์ สามารถลดได้ 80% ภายในระยะเวลา 45 นาที ส่วน El Yadini และคณะ (2013) ได้ศึกษาการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 1 กรัมต่อลิตร ในการลดสารฟีนามิฟอส (fenamiphos) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต โดยใช้น้ำสังเคราะห์ฟีนามิฟอสเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม ฉายแสงยูวี (ไม่ได้ระบุความเข้มรังสี) เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความเข้มข้นของสารฟีนามิฟอสลดลง 50% แต่เมื่อใช้น้ำสังเคราะห์ฟีนามิฟอสเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม ผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ กำหนดค่าพีเอช 5.8 และฉายแสงยูวี (ไม่ได้ระบุความเข้มรังสี) ใช้เวลา 120 นาที สามารถลดสารฟีนามิฟอสได้ถึง 92%

สำหรับงานวิจัยที่ใช้การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล ส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยที่ศึกษาทางด้านกายภาพเพื่อดูโครงสร้าง หรือเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้เคลือบติดได้ดีบนตัวกลางหรือศึกษาการเกิดโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสที่ต้องการ เช่น ศึกษาเรื่องการคำนวณสมบัติทางแสงอย่างง่ายของฟิล์มไทเทเนียมที่เตรียมโดยเทคนิค โซล-เจล ของอิสรพงษ์ เชื้อสันเทียะ และคณะ (2555) ที่ใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium tetra-isopropoxide) เป็นสารตั้งต้นเคลือบลงบนกระจก พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อความหนาของฟิล์มและดัชนีหักเหของฟิล์ม เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาสูงขึ้น ความขรุขระของผิวฟิล์มก็จะมากขึ้นตามด้วย และอีกงานวิจัยของ อนรรฆพันธ์ คำตัน (2552) ที่ศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจล แบบจุ่มเคลือบ พบว่าอุณหภูมิการเผาและชั้นของการเคลือบมีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนในการศึกษาของต่างประเทศ Kim และคณะ (2002) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ : ไอโซ-โพรพานอล : กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.7 นอร์มอล ในอัตราส่วนโดยโมล 1 : 26.5 : 1.5 มีการใช้อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกันคือ 300, 400, 500 จนถึง 1,100 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าจะพบผลึกอะนาเทสได้ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบผลึกอะนาเทสมากยิ่งขึ้น แต่ผลึกอะนาเทสจะลดลงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะเริ่มพบผลึกรูไทล์เกิดขึ้นแทน ซึ่งในงานวิจัยที่ศึกษาด้านกายภาพ การเปลี่ยนเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และการยึดติดของไทเทเนียมไดออกไซด์กับตัวกลางนี้เป็นพื้นฐานที่ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ได้

สำหรับงานวิจัยการสลายสารตกค้างในน้ำด้วยการใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจลในประเทศไทยนั้นจากการสืบค้นยังไม่ปรากฏว่ามีการศึกษา ส่วนในต่างประเทศเริ่มมีงานศึกษาด้านนี้ เช่น Yu และคณะ (1999) ใช้สารเตตระบิวทิลอโทไททาเนต (tetrabutyl orthotitanate) เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการโซล-เจล ซึ่งมีโพลีเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol: PEG) น้ำหนักโมเลกุล 2000 และ 4000 เป็นตัวที่ช่วยให้เกิดรูพรุน พบว่าการใส่ PEG น้ำหนักโมเลกุล 4000 จำนวน 0.5 กรัม ฉายแสง 6 ชั่วโมง สามารถลดสารฆ่าแมลง ไดเมทิล-2 (dimethyl-2) และ 2-ไดคลอโรไวนิล ฟอสเฟต (2-dichlorovinyl phosphate) ได้ 80% ส่วนการใส่ PEG น้ำหนักโมเลกุล 2000 จำนวน 0.5 กรัม ฉายแสง 6 ชั่วโมง สามารถลดสารฆ่าแมลงได้ 100% ในขณะที่ Gelover และคณะ (2004) ศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

โพโตคะตะไลซิสด้วยวิธีโซล-เจลเคลือบลงบนตัวกลางที่เป็นกระจก โดยใช้สารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ในการกำจัดน้ำที่ปนเปื้อนสารกำจัดแมลง 4-คลอโรฟีนอล (4-chlorophenol) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดสาร 4-คลอโรฟีนอล ได้ 70% ส่วนการใช้กระบวนการโซล-เจลเคลือบลงบนกระจก สามารถกำจัดได้ 80% และการใช้โซล-เจล ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถกำจัดสารกำจัดแมลงได้ถึง 98%

การศึกษาปริมาณน้ำหนักรวมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการสลายสารต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญในการศึกษา เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินความจำเป็น และเพื่อให้แน่ใจว่ารังสีโฟตอนที่ใช้สามารถนำไป สลายสารที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ (San และคณะ, 2001): (Saquib และคณะ, 2002) และเนื่องจากการสลายสารต่างชนิดกันย่อมใช้ปริมาณน้ำหนักรวมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่างกัน ซึ่ง Carla Garcia และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาลดสาร imazaquin (สารกำจัดวัชพืชใบกว้าง) โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนอะนาเทสต่อรูไทล์ 80:20 ซึ่งได้ศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 2-12 กรัมต่อลิตร ช่วงเวลา 20 นาที กับ 1 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 8 กรัมต่อลิตร เหมาะสมต่อการสลายสาร imazaquin นอกจากนี้ Pal Toor และคณะ (2006) กล่าวว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร ลดสีย้อมผ้าชนิด Direct yellow dye ได้ดีที่สุด ส่วน Alhakimi และคณะ (2003) กล่าวว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร ลดสาร โฟแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ได้ดีที่สุด

ส่วนในงานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของกรดในการเกิดกระบวนการโซล-เจล เนื่องจากกรดจะส่งผลต่อการเกิดไฮโดรไลซิสและอัตราการควบแน่น ถ้าไม่มีการใส่กรดการควบแน่นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการตกตะกอน แต่เมื่อใส่กรดลงไปในปฏิกิริยาจะช่วยให้เกิดการควบแน่นช้าลงในการผลิตเจลของกระบวนการโซล-เจลจะมีเชื่อมโยงโครงสร้าง ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น การใส่กรดจึงส่งผลต่อการเกิดพื้นที่ผิวขนาดรูพรุนของออกไซด์หลังการเผา (Kung และคณะ, 1996) นอกจากนี้กรดยังส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล กล่าวคือในกรดไฮโดรคลอริกจะมีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีต่ำจึงทำให้แตกตัวออกเป็นไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนได้ง่าย ตัวคลอไรด์ไอออนจะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง ส่วนไฮโดรเจนไอออนจะอยู่ในสารละลาย คลอไรด์ไอออนมีค่า

ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าไฮดรอกซิลไอออน ไฮดรอกซิลไอออนจึงสามารถเข้าไปแทนที่คลอไรด์ไอออนได้ง่าย และสามารถเกิดการทำปฏิกิริยาผลิตเป็นอนุมูลอิสระได้ แต่ถ้ากรดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยามีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงการผลิตอนุมูลอิสระย่อมเกิดยากกว่า (Sayilkan และคณะ, 2005) และกรดยังส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการศึกษาของ กรรณิการ์ จึงสุวัฒน์านนท์ (2548) พบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยส่งเสริมให้เกิดเฟสที่เป็นรูโหล ในขณะที่การใช้กรดไนตริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดเฟสที่เป็นอะนาเทสมากขึ้น ส่วนการศึกษาของ Sayilkan และคณะ (2005) พบว่าถ้ามีการเพิ่มปริมาณกรดไฮโดรคลอริกมากขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเป็นเฟสอะนาเทสจะลดลง ในขณะที่ Suresh และคณะ (1998) พบว่ากรดอะซิติคทำให้โครงสร้างของเจลในกระบวนการโซล-เจลมีความแข็งแรง และทำให้เฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรตัวมากขึ้น จึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสเป็นเฟสรูโหลต้องใช้ อุณหภูมิที่สูงขึ้น



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH รุ่น DR 5000
2. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Rikaku รุ่น TTRAX III
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU8030
4. เครื่องตั้งแผ่นกรองในการจุ่มเคลือบแบบประดิษฐ์เอง
5. เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100N Bench Top Turbidimeter
6. หลอดไฟแบล็คไลท์ (Sylvania F36W/BLB-T8) ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 15 หลอด
7. เครื่องวัดความเข้มรังสียูวีเอ (365 นาโนเมตร) ยี่ห้อ Cole Parmer รุ่น 9811
8. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น RCT basic BS77
9. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA 2245-CW
10. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Labtech รุ่น LDO-100E
11. เตาเผา ยี่ห้อ Carbolite รุ่น ELF 11/14B

12. ปีกเกอร์ (Beaker) ยี่ห้อ Schott duran ขนาด 600 มิลลิลิตร
13. กระจกตวง (Cylinder) ยี่ห้อ Glassco ขนาด 100 มิลลิลิตร และขนาด 20 มิลลิลิตร
14. ไมโครปิเปต (Micropipette) ยี่ห้อ Rainin ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร และ 1-10 มิลลิลิตร
15. ปิเปต (Measuring pipette) ขนาด 10 มิลลิลิตร 5 มิลลิลิตร 2 มิลลิลิตร และ 1 มิลลิลิตร
16. ถ้วยชั่งสาร (Diamond shaped weighing boat) ขนาดความจุ 20 มิลลิลิตร
17. แผ่นกรองใยแก้ว (Glass-fiber filter) ขนาดกว้าง 7 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร
18. แผ่นกรองไนลอน (Nylon syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Membrane solution

### 3.1.2 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) isopropoxide: TTIP) 97% ยี่ห้อ Fluka
2. เอทานอล (Ethanol) AR grade ยี่ห้อ Labscan
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) 37% ยี่ห้อ Qrec
4. กรดไนตริก (Nitric acid) 65% ยี่ห้อ Carlo Erba
5. กรดอะซิติก (Acetic acid glacial) 99.7% ยี่ห้อ Labscan
6. โพลีเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol: PEG) มวลโมเลกุล 4000 ยี่ห้อ Ajax Finechem



7. ซิลเวอร์ไนเตรท ( $\text{AgNO}_3$ ) ยี่ห้อ Fisher
8. สารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulphate: SDS) ยี่ห้อ Loba chemie
9. ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ขนาดอนุภาค  $25 \pm 5$  นาโนเมตร
10. คาร์บาริลบริสุทธิ์ 98.9% (Carbaryl) ยี่ห้อ Dr. Ehrenstorfer

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การศึกษาทดลองประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ 1) การเตรียมสารละลายคาร์บาริล 2) การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 3) การเตรียมโซลไทเทเนียมไดออกไซด์จากสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ร่วมกับโพลีเอทิลีน ไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 4000 และการเคลือบบนแผ่นกรองใยแก้ว 4) การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

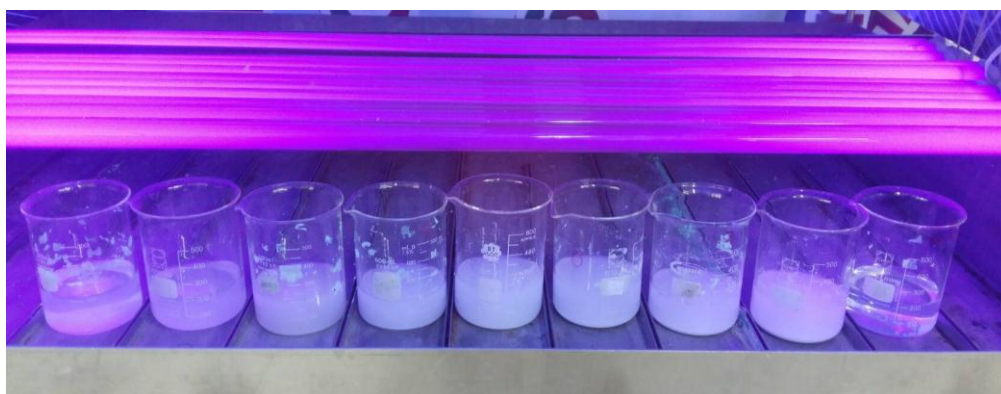
#### 3.2.1 การเตรียมสารละลายคาร์บาริล

สารละลายคาร์บาริลที่ใช้ทดลอง มียี่ห้อทางการค้าคือ เอส-85 มีส่วนประกอบ 1-naphthyl methyl carbamate 85% เตรียมโดยละลายสารคาร์บาริลในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยมีการคนให้สารคาร์บาริลละลายน้ำอย่างสมบูรณ์ก่อนการทดลองอย่างน้อย 30 นาที

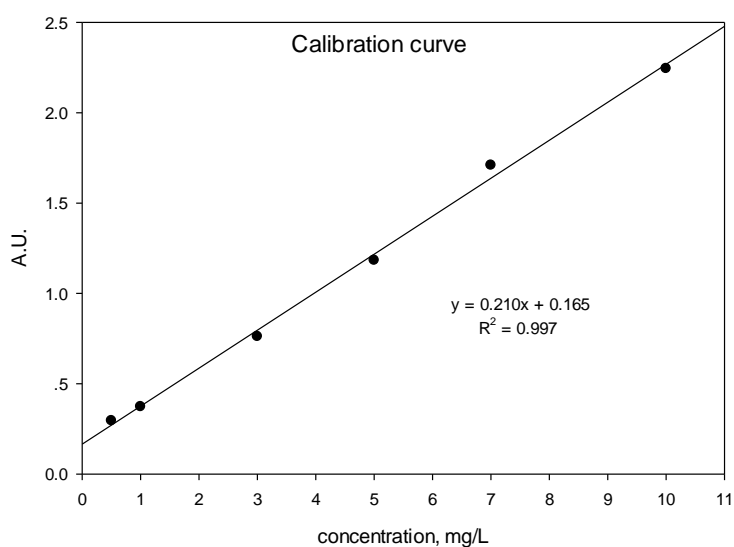
#### 3.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

การศึกษาเริ่มจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร โดยใช้วิธีการสแกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 190-350 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นจึงใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 7 และ 10 กรัมต่อลิตร ลงในบีกเกอร์ทดลองแต่ละใบแล้วนำไปวางใต้รังสียูวีเอโดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 15 หลอด ดังภาพที่ 3.1 ความเข้มรังสีที่ผิวหน้าวัดได้  $3.61 \pm 0.35$  มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที มีการ

ดูดน้ำตัวอย่างมากรองผ่านแผ่นกรองไนลอน (nylon syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความเข้มข้นของคาร์บาริลคงเหลือในช่วงเวลาต่างๆ ทราบได้จากการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของสารละลายมาตรฐาน คาร์บาริลความบริสุทธิ์ 98.8% ที่เตรียมความเข้มข้นในช่วง 0.5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาพที่ 3.2) ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง มีการวัดปริมาณรังสียูวีเอ ทุก 30 นาทีด้วย



ภาพที่ 3.1 การวางบีกเกอร์ทดลองภายใต้รังสียูวีเอ



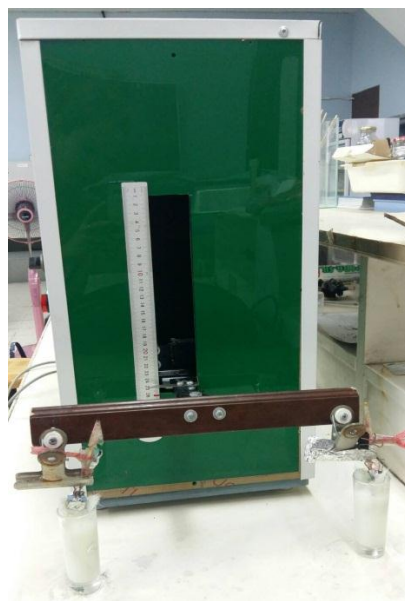
ภาพที่ 3.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานคาร์บาริล

ในการศึกษามีการทดสอบการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรองไนลอนในระหว่างการกรอง ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย โดยเตรียมสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 2 ชุด ในชุดที่ 1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยไม่ผ่านการกรอง ส่วนชุดที่ 2 เติมผง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 0.05-10 กรัมต่อลิตร และดูน้ำตัวอย่างมากรองผ่านแผ่นกรองไนลอนแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร (สแกนคลื่น 190-350 นาโนเมตร) เพื่อศึกษาว่าคาร์บาริลมีการเกาะติดบนแผ่นกรองไนลอนจนทำให้ความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำลดลงเกินความเป็นจริงหรือไม่ รวมถึงมีการศึกษาการดูดซับคาร์บาริลด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีด (sorption) โดยนำสารละลายคาร์บาริลที่ใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 และ 2 กรัมต่อลิตร วางไว้ในตู้มืดเป็นเวลา 180 นาที ทุก ๆ 30 นาที มีการดูน้ำตัวอย่างมา 4 มิลลิลิตร กรองผ่านแผ่นกรองไนลอน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริล โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลโดยไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (control) สุดท้ายเป็นการศึกษาการสลายคาร์บาริลด้วยแสง (photolysis) โดยนำสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์วางไว้ใต้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เป็นเวลานาน 180 นาที ในทุก ๆ 30 นาที มีการดูน้ำตัวอย่าง 4 มิลลิลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลเพื่อสังเกตการสลายตัวตามเวลาที่ผ่านไป

### 3.2.3 การเตรียมโซลไทเทเนียมไดออกไซด์และการเคลือบบนแผ่นกรองใยแก้ว

การเตรียมโซลไทเทเนียมไดออกไซด์ กระทำตามวิธีของ Ubonchonlakate และคณะ (2012) โดยใช้สารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ปริมาตร 6.5 มิลลิลิตร ผสมกับเอทานอล 97.5 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30-45 นาที จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดไนตริกหรือกรดอะซิติกทีละหยด กวนให้เข้ากัน 15-20 นาที และเติมซิลเวอร์ไนเตรท 1.5 กรัม กวนให้เข้ากัน 15-20 นาที แล้วจึงเติมโพลิเอทิลีนไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 4,000 ปริมาณ 1.3 กรัม กวนอย่างต่อเนื่อง 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้โซลเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำแผ่นกรองใยแก้วขนาดยาว 7 เซนติเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร มาล้างด้วยสารโซเดียมดีดีซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อล้างไข (wax) ที่เคลือบมาบนแผ่นกรองใยแก้วให้หมดไปและนำไปอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงนำแผ่นกรองใยแก้วมาจุ่มเคลือบลงไนโซล โดยแช่แผ่นกรองใยแก้วไนโซลนาน 1 นาที แล้วใช้เครื่องดึงในอัตรา 10 เซนติเมตรต่อนาที ดังภาพที่ 3.3



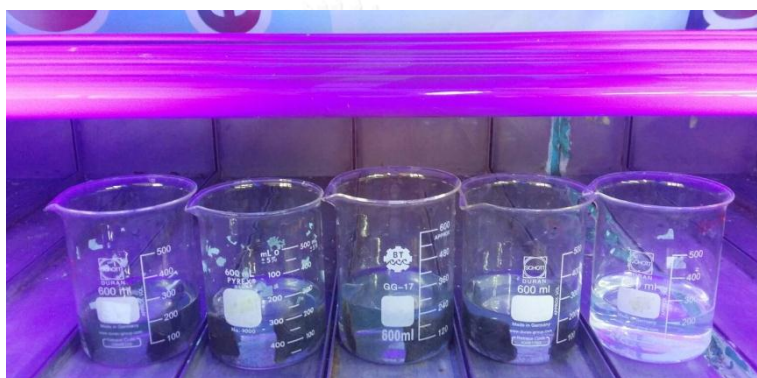
ภาพที่ 3.3 การดิงแผ่นกรองใยแก้วด้วยเครื่องดิง

เมื่อเคลือบโซลบนแผ่นกรองใยแก้วครบ 1 ชั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาจุ่มเคลือบในโซลใหม่จนครบตามจำนวนชั้นที่ต้องการ (กรณีของกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกทำการเคลือบ 10-16 ชั้น ส่วนกรดอะซิติกทำการเคลือบ 7-12 ชั้น) จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 430-500 องศาเซลเซียส สำหรับกรดไนตริกและกรดอะซิติก และเผาที่อุณหภูมิ 570-630 องศาเซลเซียสสำหรับกรดไฮโดรคลอริกเพื่อศึกษาอุณหภูมิ calcination ที่เหมาะสม เมื่อเผาเสร็จแล้วนำแผ่นกรองใยแก้วไปชั่งน้ำหนักแล้วลอบออกด้วยน้ำหนักแผ่นกรองใยแก้วก่อนการเคลือบ ได้เป็นน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองใยแก้ว

ในการศึกษามีการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (phase) บนแผ่นกรองใยแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของโพลิเมอร์ในกระบวนการโซล-เจลจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองใยแก้วด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (Surface Area and Porosity Analyzer: BET)

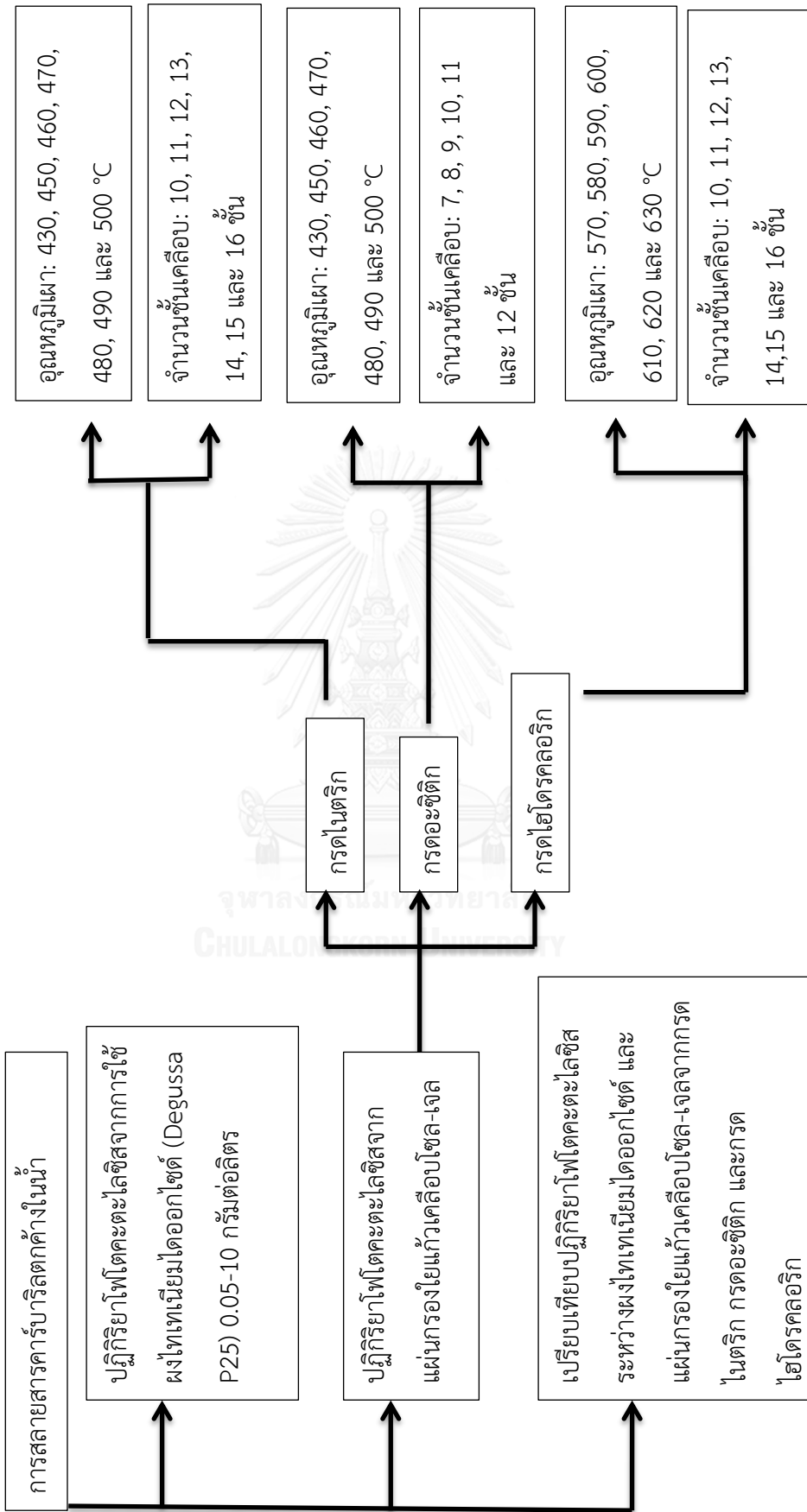
### 3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษาใช้แผ่นกรองใยแก้วที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 1 แผ่น ใส่บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายคาร์บาริลความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุอยู่ 200 มิลลิลิตร โดยเริ่มต้นก่อนใส่แผ่นกรองเคลือบ มีการดูน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลในน้ำด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร (สแกนคลื่นตั้งแต่ 190-350 นาโนเมตร) จากนั้นนำบีกเกอร์ที่ใส่แผ่นกรองเคลือบแล้วไปวางไว้ใต้รังสียูวีเอ โดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 15 หลอด ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การวางบีกเกอร์ทดลองบรรจุแผ่นกรองใยแก้วภายใต้แสงรังสียูวีเอ

ที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240 และ 300 นาที มีการดูน้ำตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณความเข้มข้นของคาร์บาริลคงเหลือในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทดลอง มีการวัดปริมาณรังสียูวีเอทุก 30 นาทีด้วย โดยการศึกษาทั้งหมดสรุปเป็นผังการทดลองได้ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.5 แผนผังการดำเนินการทดลอง

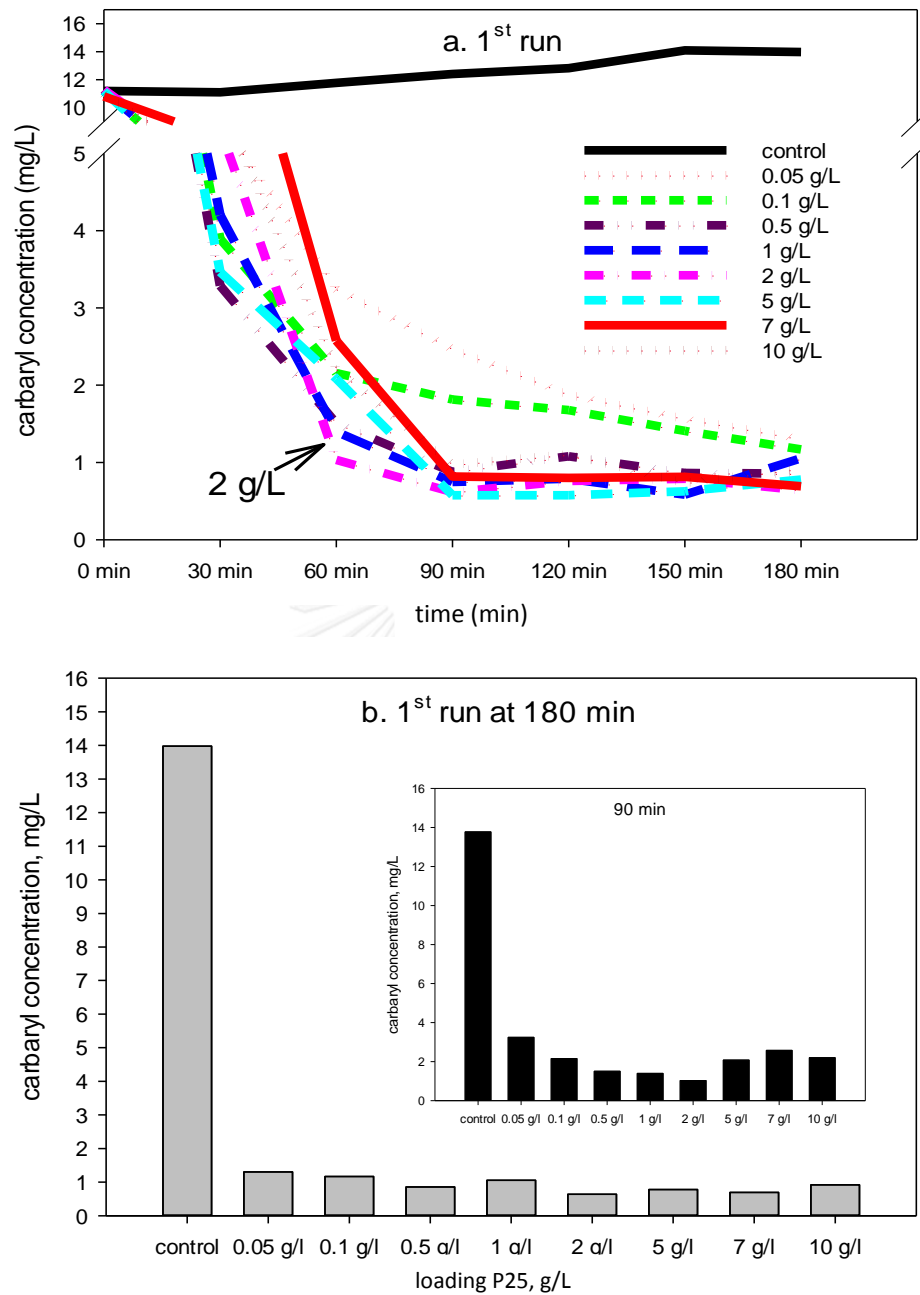
## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาแบ่งเป็นประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และประสิทธิภาพจากการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นจึงเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในการสลายสารคาร์บาริลตกค้างในน้ำ ดังรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์

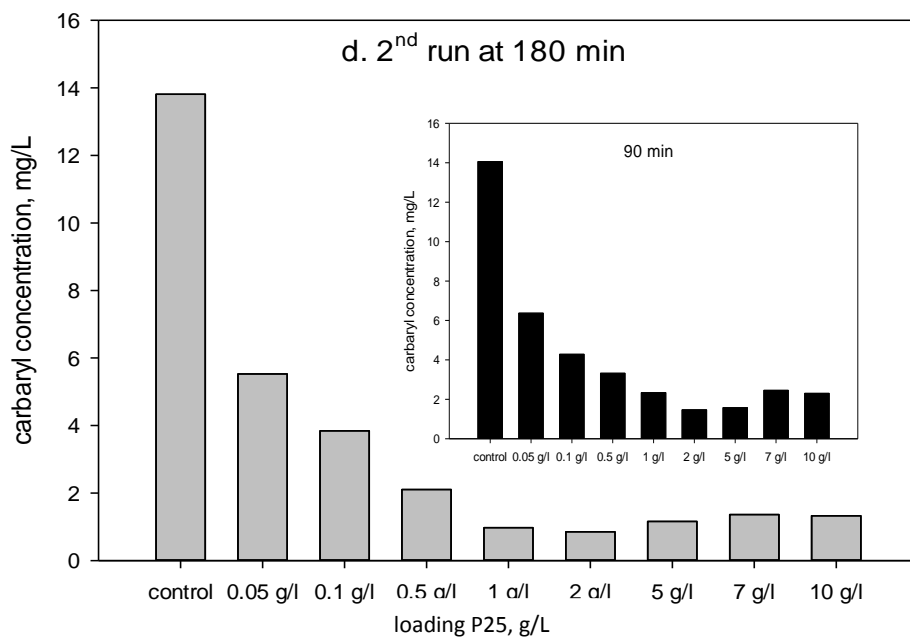
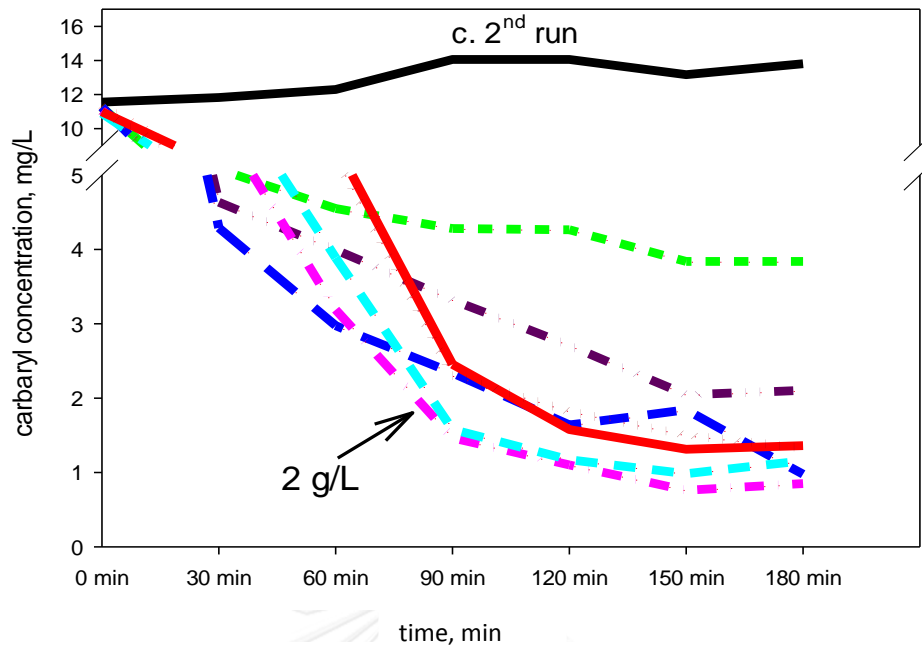
การใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 7 และ 10 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร จากหลอดไฟแบล็คไลท์ในการสลายคาร์บาริลตกค้างในน้ำ จำนวน 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยภาพ a, c และ e เป็นความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลาจากการศึกษา 3 ครั้ง ขณะที่ภาพ b, d และ f เป็นความเข้มข้นคงเหลือเฉพาะที่เวลา 180 นาทีจากการศึกษา 3 ครั้ง เช่นเดียวกัน ส่วนในรูปเล็กที่แทรกไว้ในรูป b, d และ f คือความเข้มข้นที่เวลา 90 นาที



ภาพที่ 4.1 การลดลงของคาร์บาริลในแต่ละช่วงเวลาจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (ความเข้มข้นซียูวีเอ 3.1-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

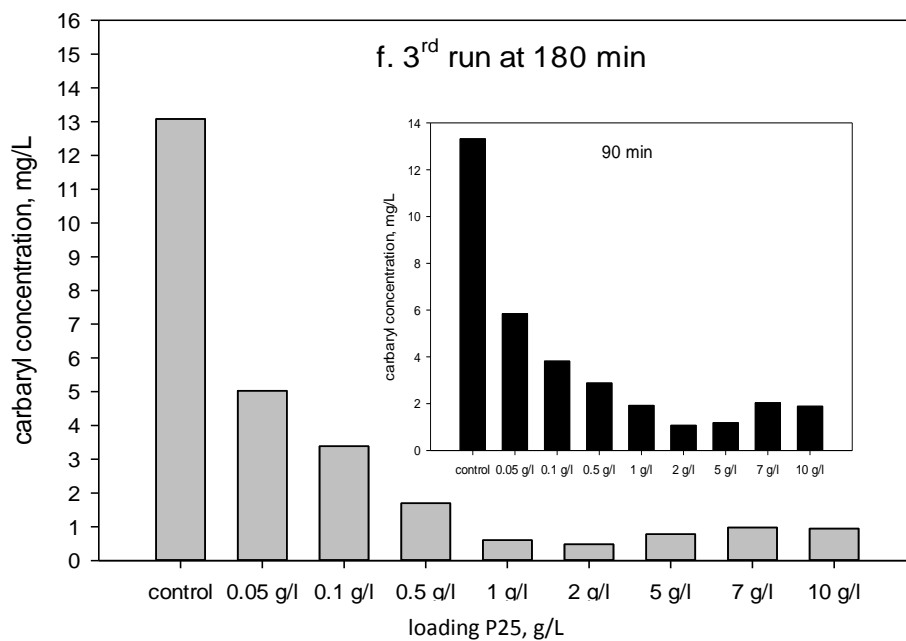
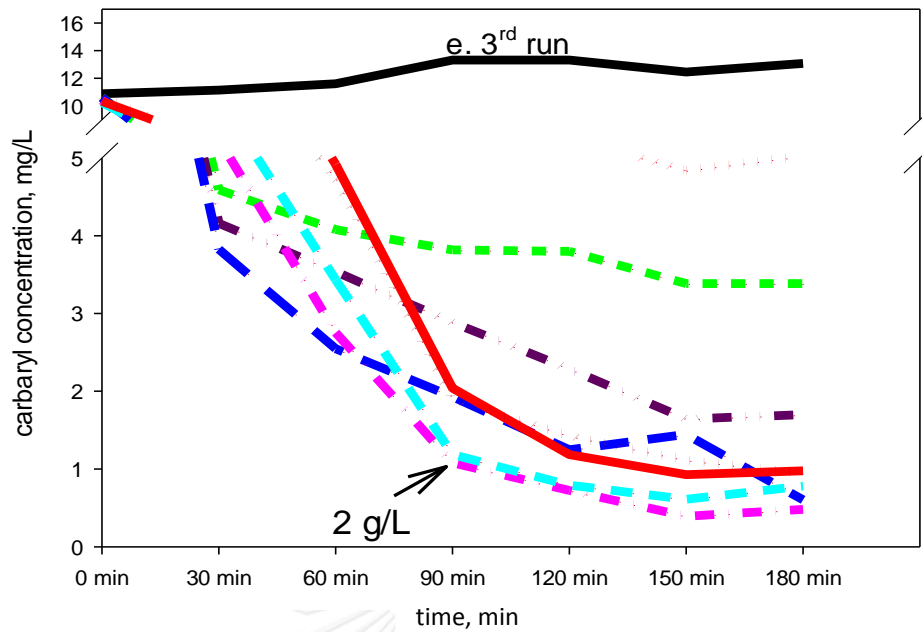
โดยที่ ภาพ a คือความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลาจากการศึกษาครั้งที่ 1 ภาพ b คือความเข้มข้นคงเหลือเฉพาะที่เวลา 180 นาทีจากการศึกษาครั้งที่ 1 ส่วนในรูปเล็กที่แทรกไว้คือความเข้มข้นที่เวลา 90 นาที





ภาพที่ 4.1 (ต่อ) การลดลงของคาร์บาริลในแต่ละช่วงเวลาจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (ความเข้มข้น 3.1-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

โดยที่ ภาพ c คือความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลาจากการศึกษาครั้งที่ 2 ภาพ d คือความเข้มข้นคงเหลือเฉพาะที่เวลา 180 นาทีจากการศึกษาครั้งที่ 2 ส่วนในรูปเล็กที่แทรกไว้คือความเข้มข้นที่เวลา 90 นาที



ภาพที่ 4.1 (ต่อ) การลดลงของคาร์บาริลในแต่ละช่วงเวลาจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (ความเข้มข้น 3.1-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

โดยที่ ภาพ e คือความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลาจากการศึกษาครั้งที่ 3 ภาพ f คือความเข้มข้นคงเหลือเฉพาะที่เวลา 180 นาทีจากการศึกษาครั้งที่ 3 ส่วนในรูปเล็กที่แทรกไว้ คือความเข้มข้นที่เวลา 90 นาที

จากภาพที่ 4.1 ภาพ a, c และ e พบว่าคาร์บาริลค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป โดยครั้งที่ 1 ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าความเข้มข้นอื่นๆ อย่างชัดเจน ส่วนครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 พบว่า ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05, 0.1 และ 0.5 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าความเข้มข้นอื่นๆ ขณะที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดซึ่งการสลายตัวของคาร์บาริลเกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและรูว่างดังสมการ



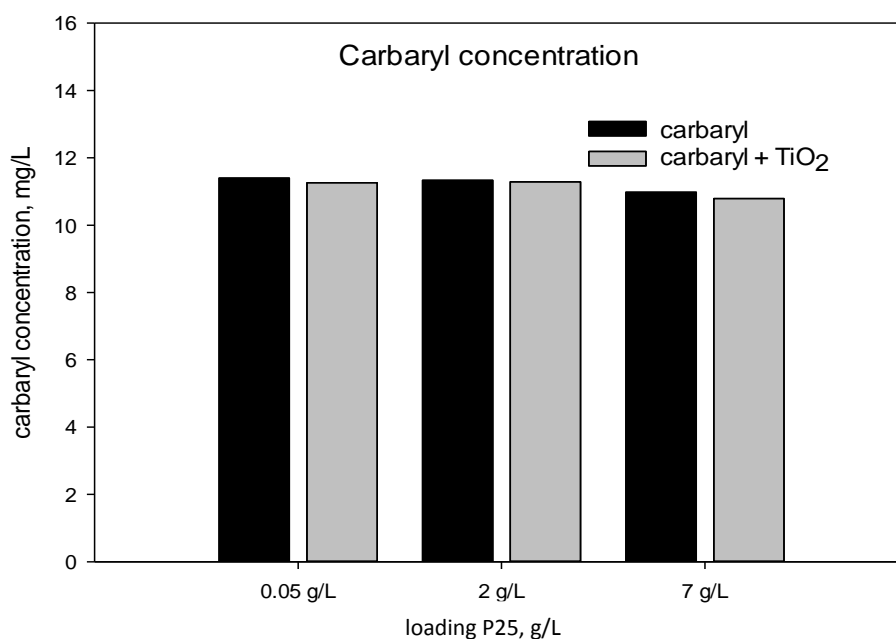
โดยรูว่างและอิเล็กตรอนนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ในน้ำและออกซิเจนตามลำดับ ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนที่สามารถสลายคาร์บาริลได้ ดังสมการ



(Herrmann, 1991)

ในการศึกษานี้พบว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตรมีความเหมาะสมที่สุดโดยมีประสิทธิภาพตั้งแต่ 80% ที่เวลา 60 นาที และเพิ่มเป็น 91% ที่เวลา 90 นาที ไปจนถึง 95.5% ที่เวลา 180 นาที โดยความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่น้อยเกินไป (0.05-0.5 กรัมต่อลิตร) ในภาพที่ c และ e ของครั้งที่ 2 และ 3 ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าความเข้มข้นอื่นๆ อย่างชัดเจน เนื่องจากอนุมูลอิสระมีน้อยเกินไป ขณะที่ความเข้มข้นที่สูงเกินไป (5-10 กรัมต่อลิตร) ก็ให้ประสิทธิภาพต่ำในช่วงแรกๆ (แสดงในรูปเล็กแทรกไว้ในรูป b, d และ f) เนื่องจากความเข้มข้นมีผลในการบดบังแสงที่ส่องลงมา (Chen และคณะ, 2007) โดยในการศึกษานี้ สอดคล้องกับงานของ Shankar และคณะ (2004) ทำการศึกษาการสลายโมโนโครโตรฟอส (monocrotophos) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 กรัมต่อลิตร ภายใต้รังสียูวีซีจากหลอดไฟกำลัง 48 วัตต์ เป็นเวลานาน 540 นาที พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุดเช่นกัน

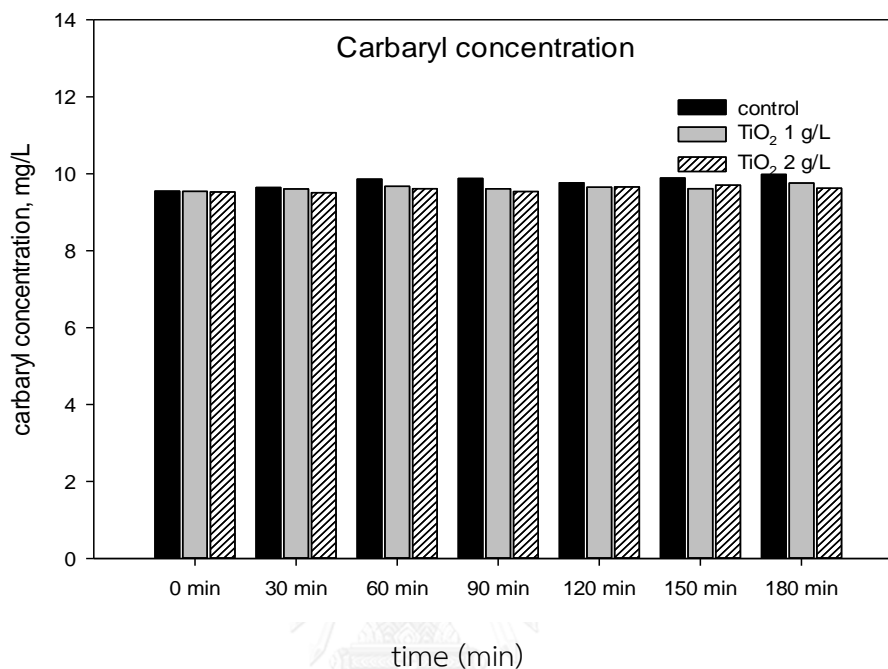
ทั้งนี้ในการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการใช้แผ่นกรองไนลอน (nylon syringe filter) ขนาดรูพรุน 0.22 ไมครอน กรองผงไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำตัวอย่างก่อนวัดค่าการดูดกลืนแสงของคาร์บาริลด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นไปได้ว่าคาร์บาริลส่วนหนึ่งอาจติดอยู่บนแผ่นกรองไนลอนในระหว่างการกรอง ส่งผลให้คาร์บาริลในน้ำลดลงเกินความเป็นจริงได้ จึงมีการศึกษาการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรอง ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.2 ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำที่ไม่ผ่านการกรอง (กราฟแท่งสีดำ) กับที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วกรองผ่านแผ่นกรองไนลอน (กราฟแท่งสีเทา) โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05, 2 และ 7 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร เนื่องจากความเข้มข้นอื่นๆ ให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกัน



ภาพที่ 4.2 การทดสอบการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรองไนลอน

จากภาพที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ไม่ผ่านการกรอง และคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05, 2 และ 7 กรัมต่อลิตร แล้วกรองด้วยแผ่นกรองไนลอน มีความแตกต่างที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ทดสอบด้วย paired t-test) โดยค่า p-value อยู่ในช่วงของ 0.558-0.921 แสดงว่าการกรองคาร์บาริลพร้อมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านแผ่นกรองไม่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บาริล หรือกล่าวได้ว่าการเกาะติดของคาร์บาริลบนแผ่นกรองนั้นไม่มีความสำคัญในเชิงสถิติแต่อย่างใด

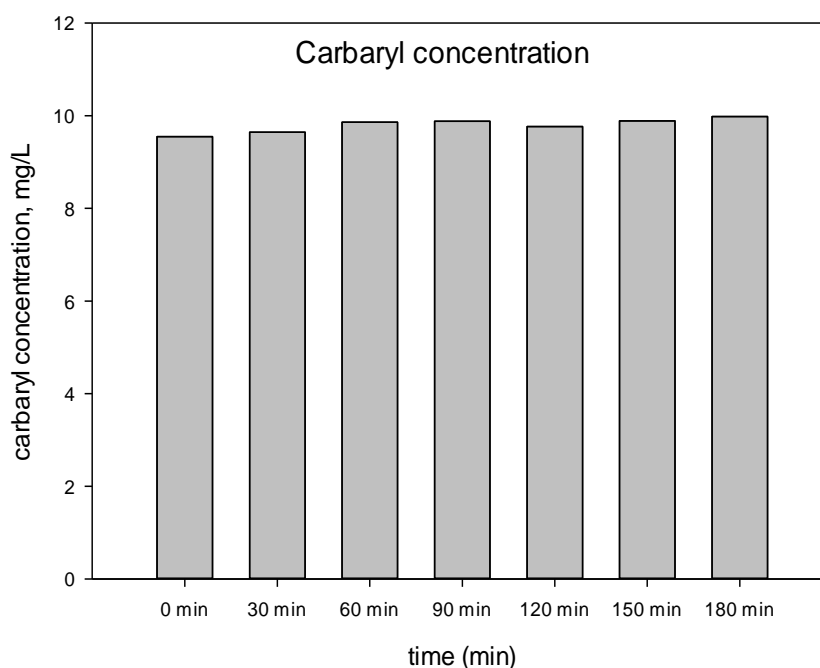
นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการดูดซับคาร์บาริล (sorption) ด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในตู้มืด โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 และ 2 กรัมลิตร เปรียบเทียบกับที่ไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (control) ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.3 การดูดซับของคาร์บาริลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด

จากภาพที่ 4.3 พบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บาริลนั้นเกือบจะคงที่อยู่ตลอดเวลา โดยชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $9.79 \pm 0.15$  มิลลิกรัมต่อลิตร ชุดที่เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ  $9.63 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดที่เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ  $9.59 \pm 0.07$  มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าการดูดซับด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณที่น้อยมาก ที่ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร มีการดูดซับไม่เกิน 2.7% และที่ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีการดูดซับไม่เกิน 3.5% และอาจเป็นไปได้ว่าการลดลงของคาร์บาริลที่ปรากฏเป็นความคลาดเคลื่อนของการทดลองเอง

สำหรับการสลายคาร์บาริลด้วยแสงหรือปฏิกิริยาโฟโตไลซิส (photolysis) จากการนำปิกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลวางไว้ใต้รังสียูวีเออนาน 180 นาที ผลการศึกษาแสดงได้ในภาพที่ 4.4 ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลในน้ำในช่วงเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.4 การสลายตัวของคาร์บาริลโดยใช้แสง

(ความเข้มข้นเริ่มต้น 3.1-3.7 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

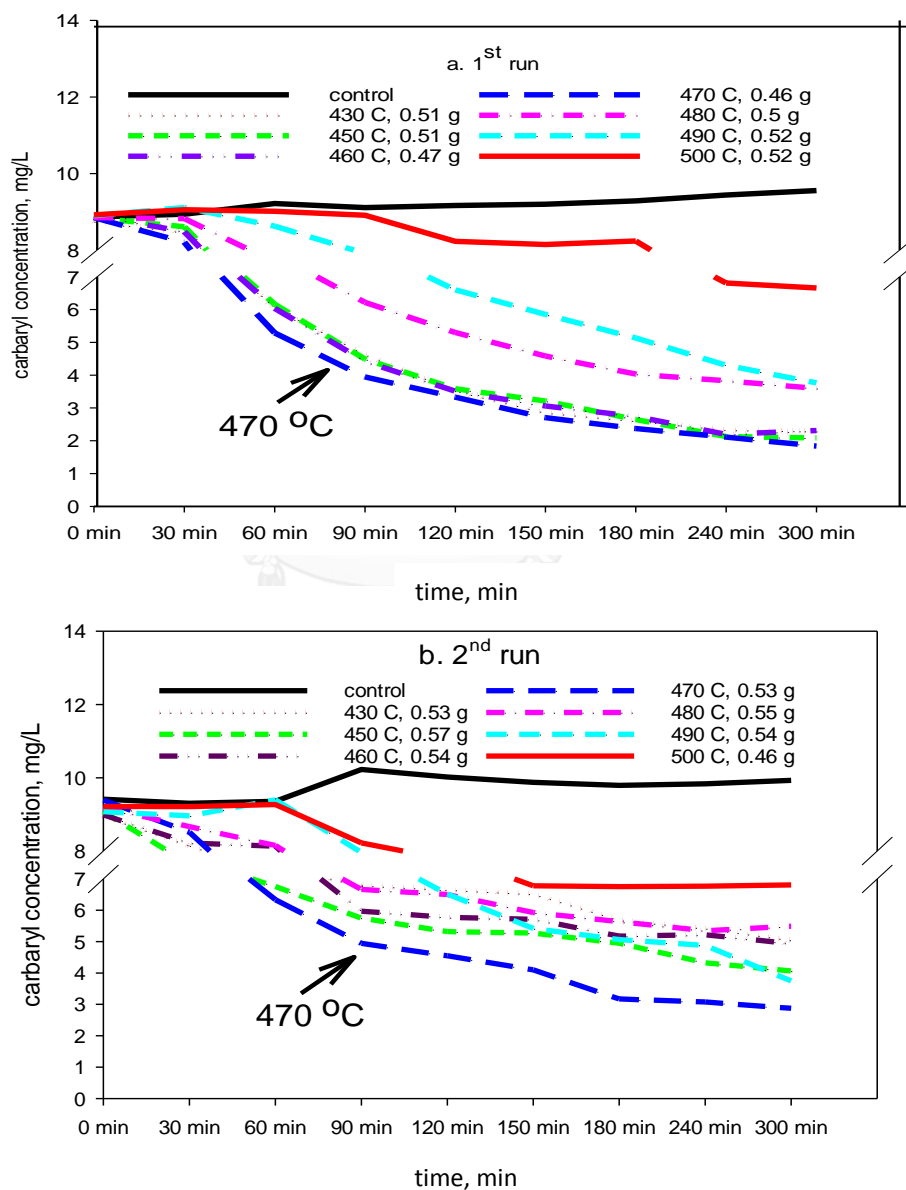
จากภาพที่ 4.4 พบว่าแสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถสลายคาร์บาริลในน้ำได้ ค่าเฉลี่ยของคาร์บาริล  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตลอด 180 นาทีที่ทำการศึกษา คือ  $9.79 \pm 0.15$  มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่สังเกตเห็นนั้นน่าจะมาจากความคลาดเคลื่อนของการทดลองมากกว่าจะมาจากการสลายตัวของคาร์บาริลด้วยแสง โดยค่าครึ่งชีวิต (half-life) ของคาร์บาริลในน้ำที่มีการรายงานไว้คือ 32 วัน (Extension Toxicology Network, 1992) ดังนั้นในการศึกษา 180 นาที ในที่นี้ จึงไม่สามารถเห็นการสลายของคาร์บาริลที่ชัดเจนได้

#### 4.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษานี้มีการใช้กรดต่างชนิดกันในขั้นตอนการเตรียมโซล ได้แก่ กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้

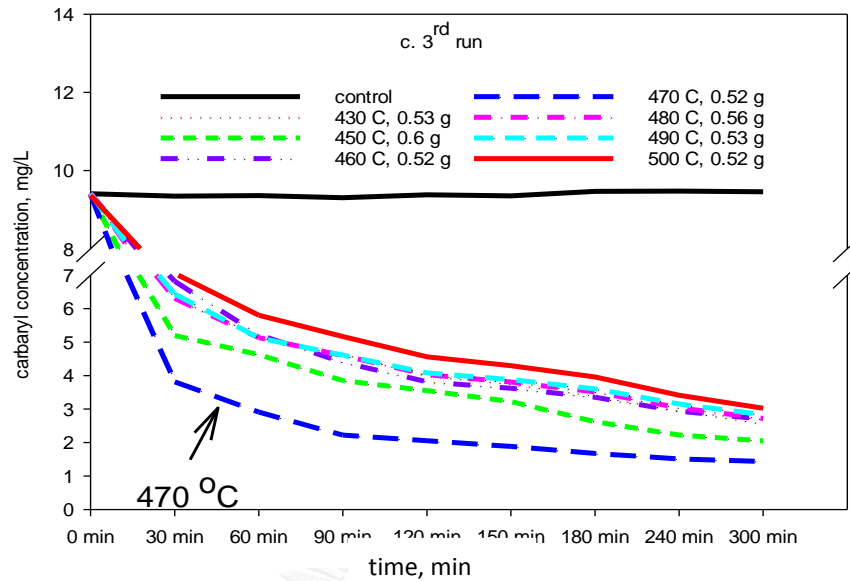
#### 4.2.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดไนตริก

การศึกษาเริ่มจากการกำหนดจำนวนชั้นเคลือบแผ่นกรองใยแก้ว 14 ชั้น แล้วใช้อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกันคือ 430, 450, 460, 470, 480, 490 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิ calcination ที่ให้ผลดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.5 โดยจำนวนกรัมที่ปรากฏในภาพคือน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรอง 1 แผ่น



ภาพที่ 4.5 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

(ความเข้มข้นสียูวีไอ 3.1-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 4.5 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3.1-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สลายคาร์บาริลได้ดีที่สุด โดยการทดลองทั้ง 3 ครั้ง ที่เวลา 300 นาที ความเข้มข้นคาร์บาริลเหลืออยู่ 1.83, 2.87 และ 1.43 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 8.85, 9.39 และ 9.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 79.3%, 66.3% และ 84.7% เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 470, 480 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพสูง ปานกลาง และต่ำ จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.1

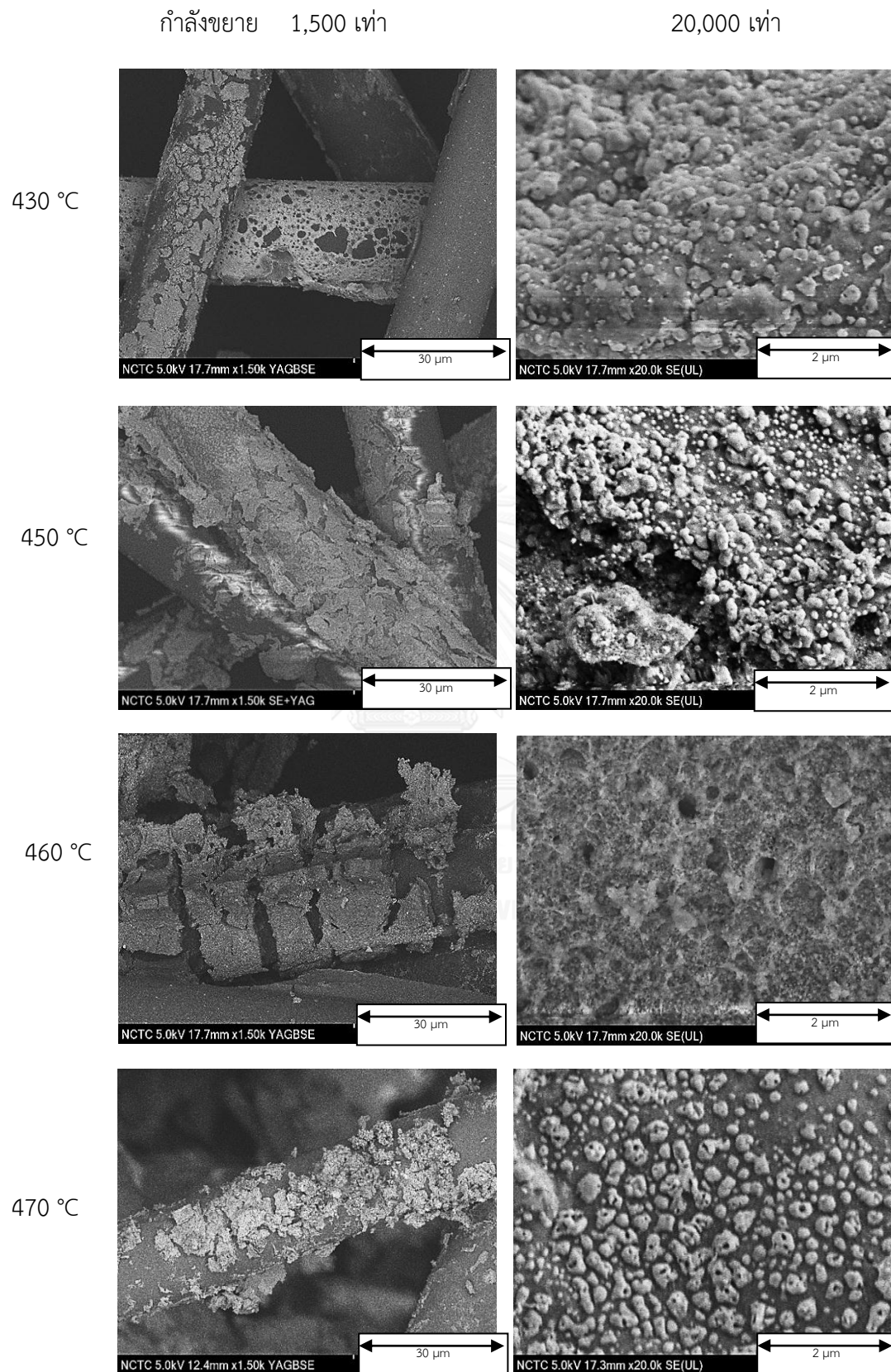
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไนตริก

อุณหภูมิ (°C)	Anatase (101 at 25.4°)						Rutile (110 at 27.5°)		
	peak intensity			ขนาดผลึกไทเทเนียม (°A)			peak intensity		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
470	97	62	99	396	143	211	0	0	0
480	72	47	39	127	388	174	0	0	0
500	40	36	31	>1,000	464	833	0	0	0

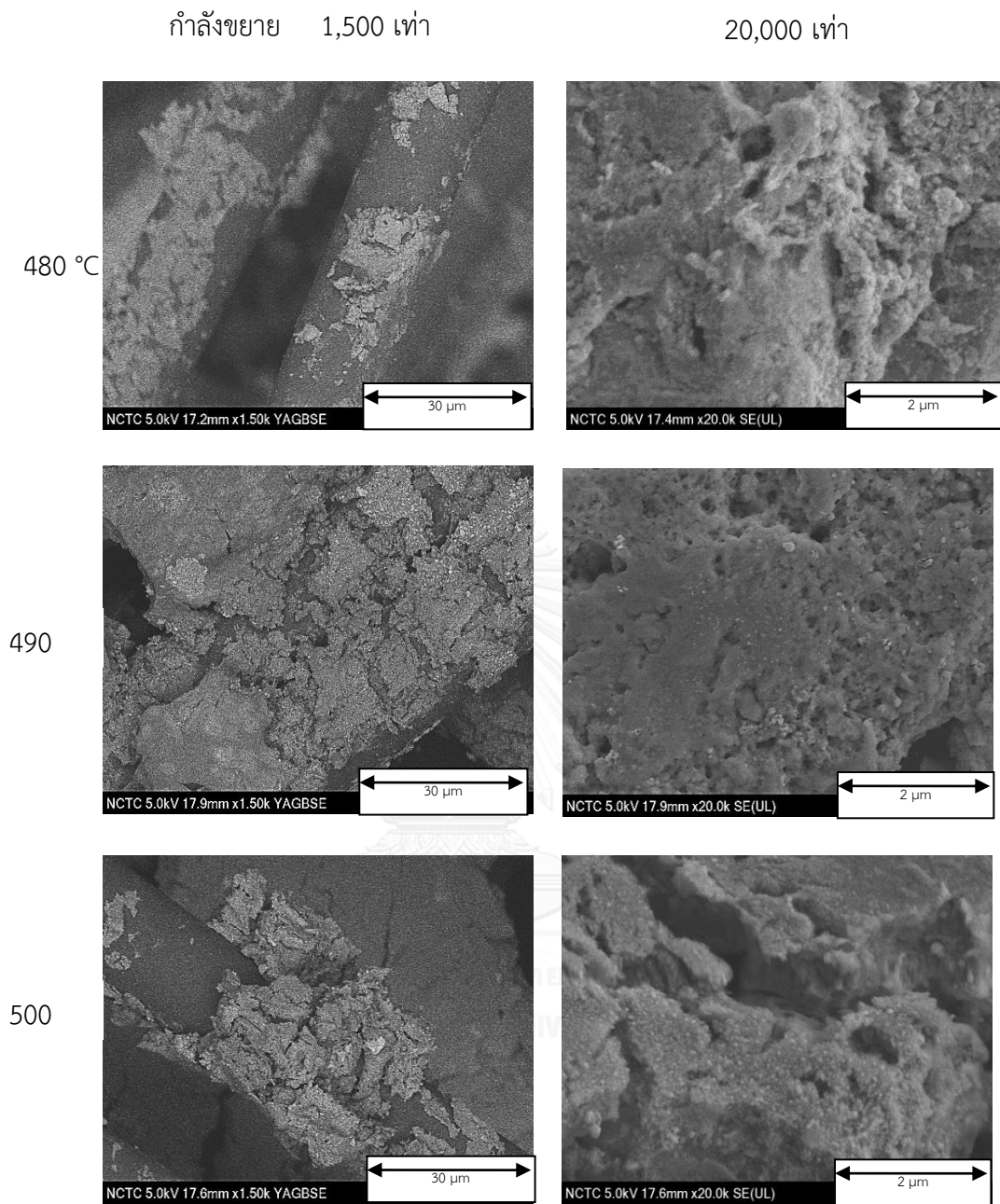


ค่า intensity ที่มุม  $2\theta = 25.4^\circ$  คือค่าของโครงสร้างผลึกอะนาเทส (Anatase) และค่า intensity ที่มุม  $2\theta = 27.5^\circ$  คือค่าของโครงสร้างผลึกรูไทล์ (Rutile) (Clemens และคณะ, 2013) จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า peak intensity ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุดแต่ขนาดผลึกไม่ได้มีขนาดใหญ่ที่สุดตามไปด้วย เมื่อนำแผ่นกรองเคลือบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถให้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.6





ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล



ภาพที่ 4.6 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.6 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (ภาพขวา) เมื่อใช้อุณหภูมิการเผา 430-470 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดเป็นอนุภาคที่ชัดเจน โดยอุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียสนั้น จะมีอนุภาคที่ชัดเจนที่สุดและมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคอื่นๆ ส่วนที่อุณหภูมิ 480-500 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างชัดเจน

เมื่อตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (BET) โดยเลือกแผ่นกรองเคลือบที่เผาที่อุณหภูมิ 470, 480 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลสูงสุด ประสิทธิภาพปานกลาง และประสิทธิภาพต่ำ ตามลำดับ สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.2

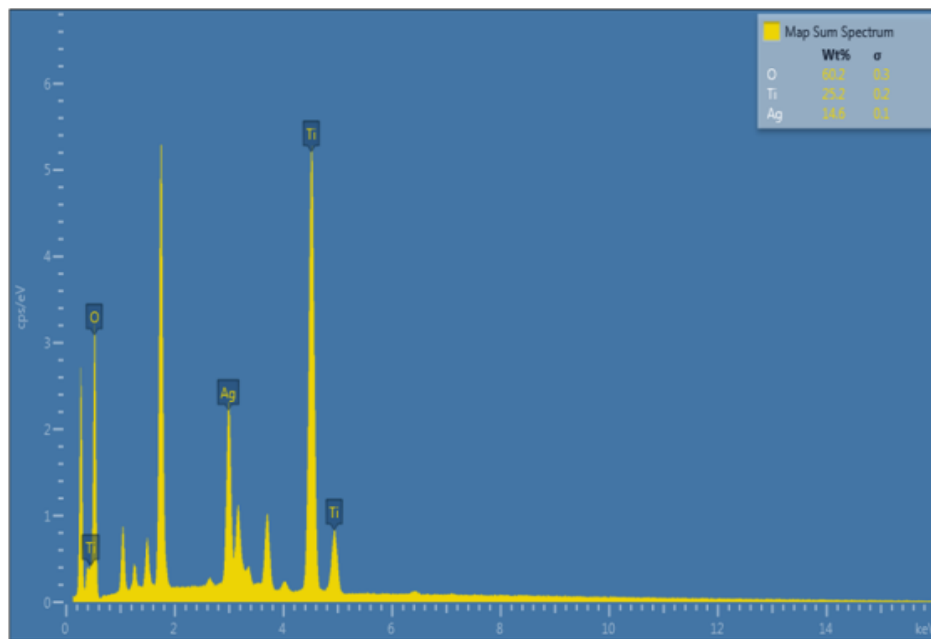
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริก

อุณหภูมิ (°C)	พื้นที่ผิว Multipoint BET (m <sup>2</sup> /g)
470	7.26
480	5.11
500	6.93

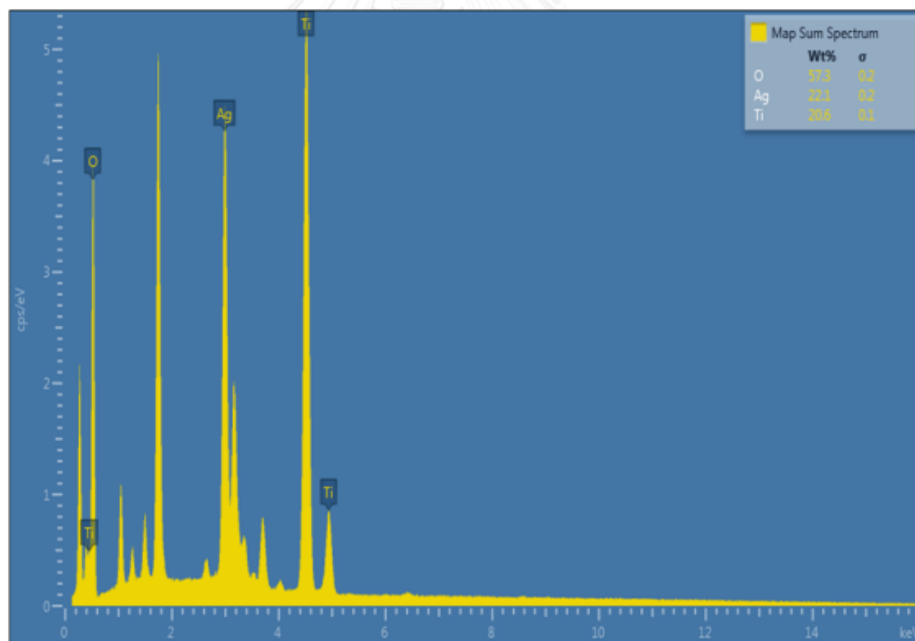
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าพื้นที่ผิวจากการเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส นั้นมีค่าพื้นที่ผิว มากที่สุด สอดคล้องกับภาพ SEM (ภาพที่ 4.6) จึงน่าจะเป็นสาเหตุให้มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลได้ดีที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิ 480 และ 500 องศาเซลเซียส จากภาพ SEM นั้นพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นปื้นจึงทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง EDX โดยใช้แผ่นกรองเคลือบที่เผาด้วยอุณหภูมิ 470, 480 และ 500 องศาเซลเซียส แสดงผลได้ในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบที่ใช้กรดไนตริก

อุณหภูมิ (°C)	ไทเทเนียม (%wt/wt)	เงิน (%wt/wt)	ออกซิเจน (%wt/wt)
470	25.2	14.6	25.2
480	20.6	22.1	20.6
500	17.6	12.5	17.6

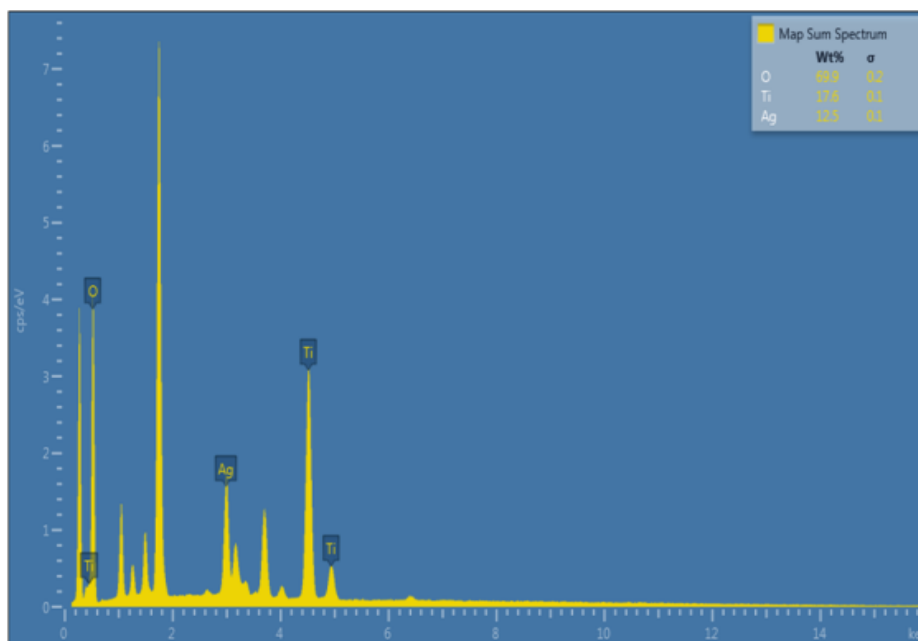


a. 470 °C



b. 480 °C

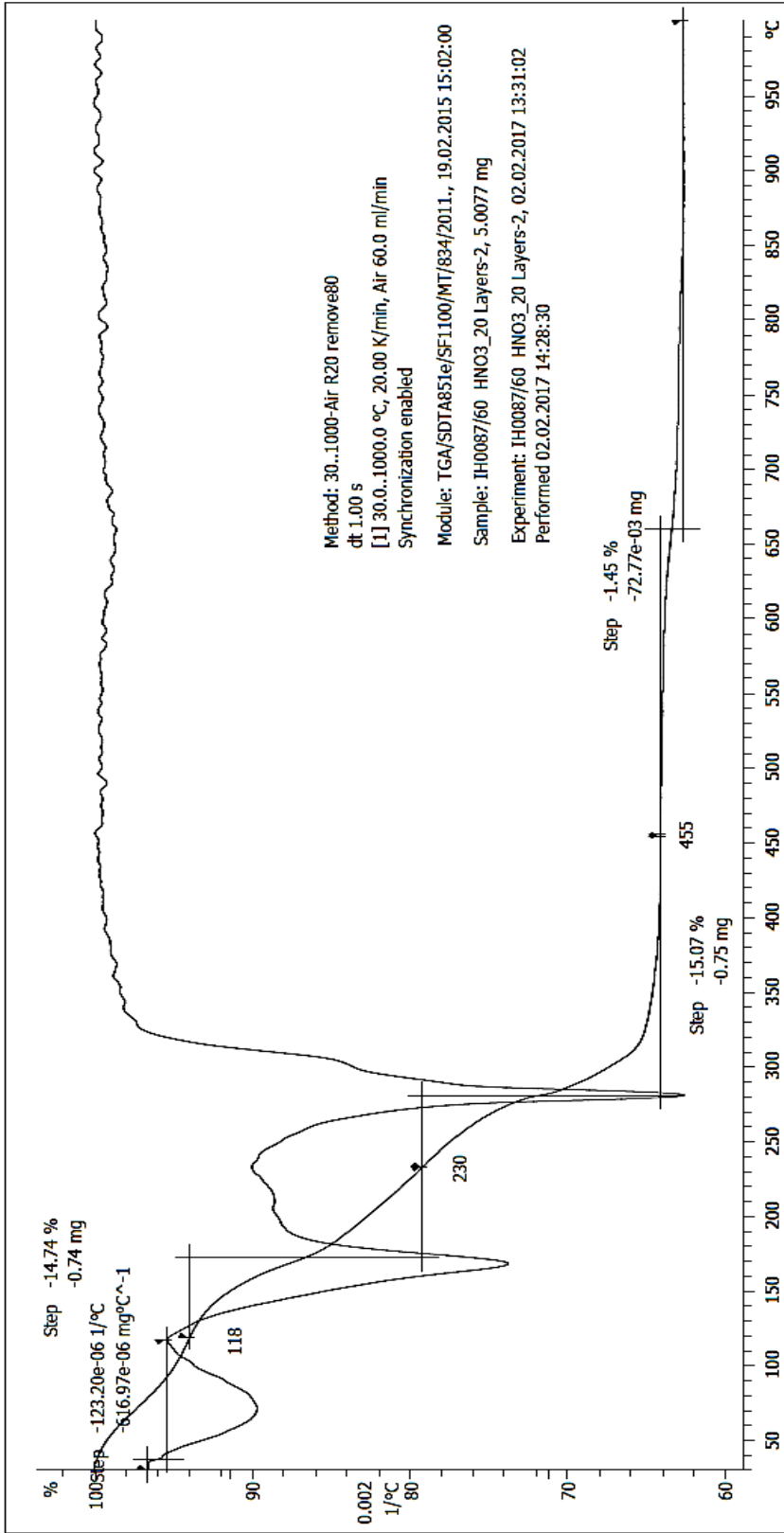
ภาพที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล



c. 500 °C

ภาพที่ 4.7 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล

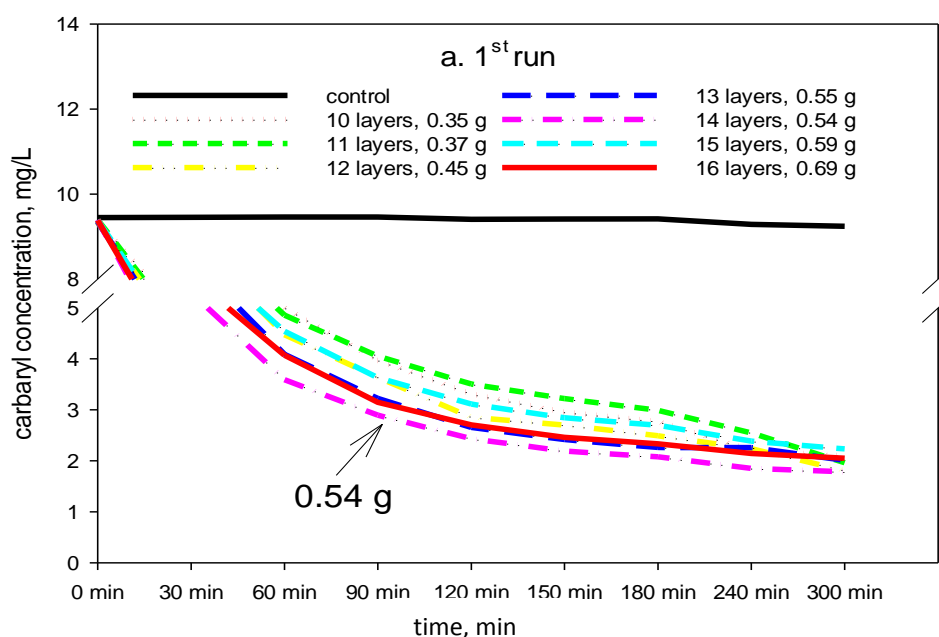
จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.7 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนักของไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส นั้นมากที่สุดเช่นกัน สอดคล้องกับภาพถ่ายลักษณะพื้นที่ผิวที่มีความเป็นผลึกอย่างชัดเจน และให้ค่า peak intensity สูงสุด ซึ่งปัจจัยทั้งหมดเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลเกิดขึ้นสูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีการนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของโพลิเมอร์ในกระบวนการโซล-เจลจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การสลายตัวของโพลีเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

จากภาพที่ 4.8 พบว่ากระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก มีการสลายตัวของสารโพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิ calcination ที่ 470 องศาเซลเซียส มีเฉพาะไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น

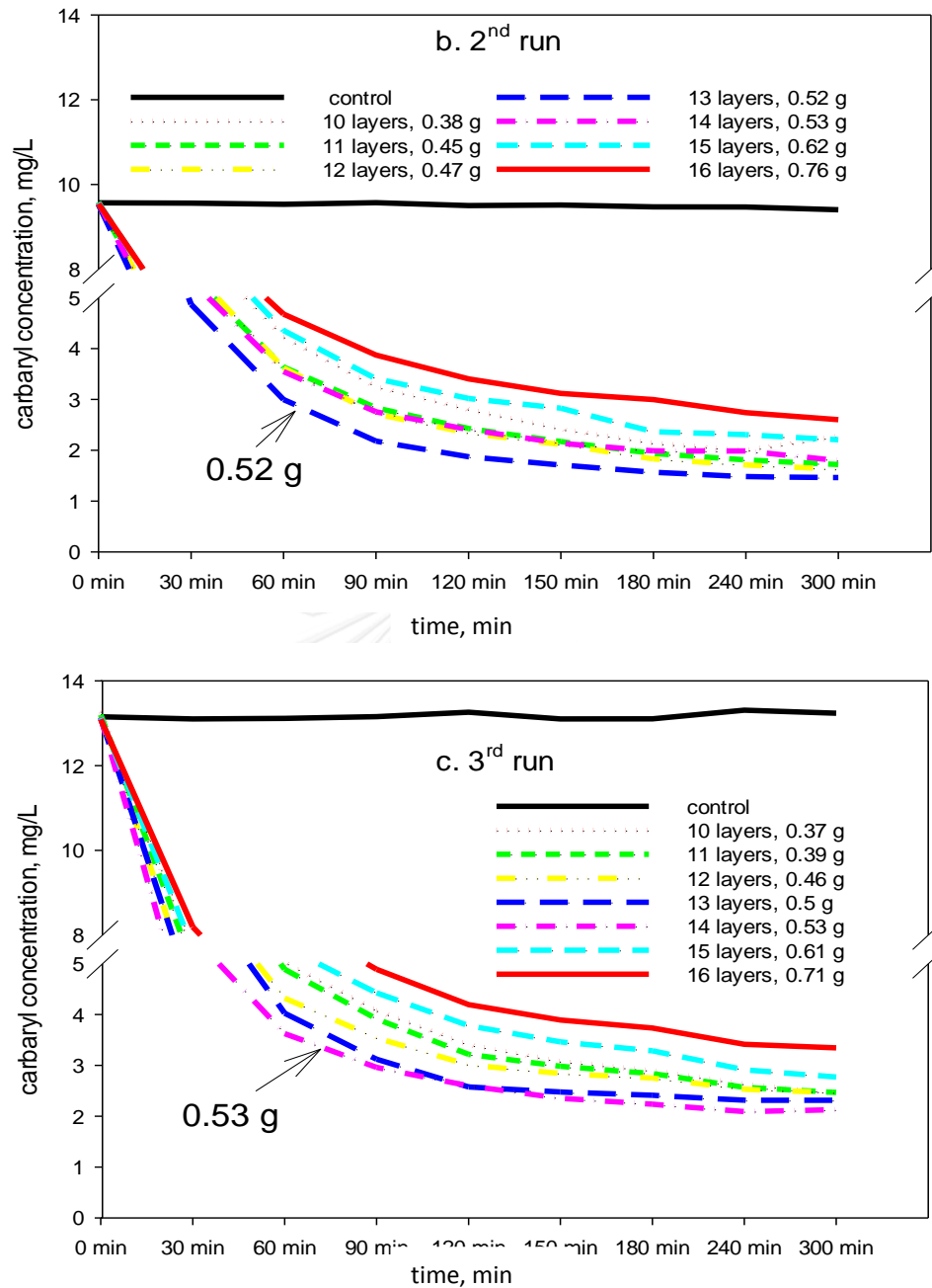
หลังจากที่ได้อุณหภูมิ calcination ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการศึกษาจำนวนชั้นเคลือบหรือปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองที่เหมาะสมในการสลายคาร์บาริล โดยทำการเคลือบ 10, 11, 12, 13, 14, 15 และ 16 ชั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองตั้งแต่ 0.35 กรัมต่อแผ่น ไปจนถึง 0.76 กรัมต่อแผ่น ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.9 ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4.9 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไนตริก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)





ภาพที่ 4.9 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไนตริก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

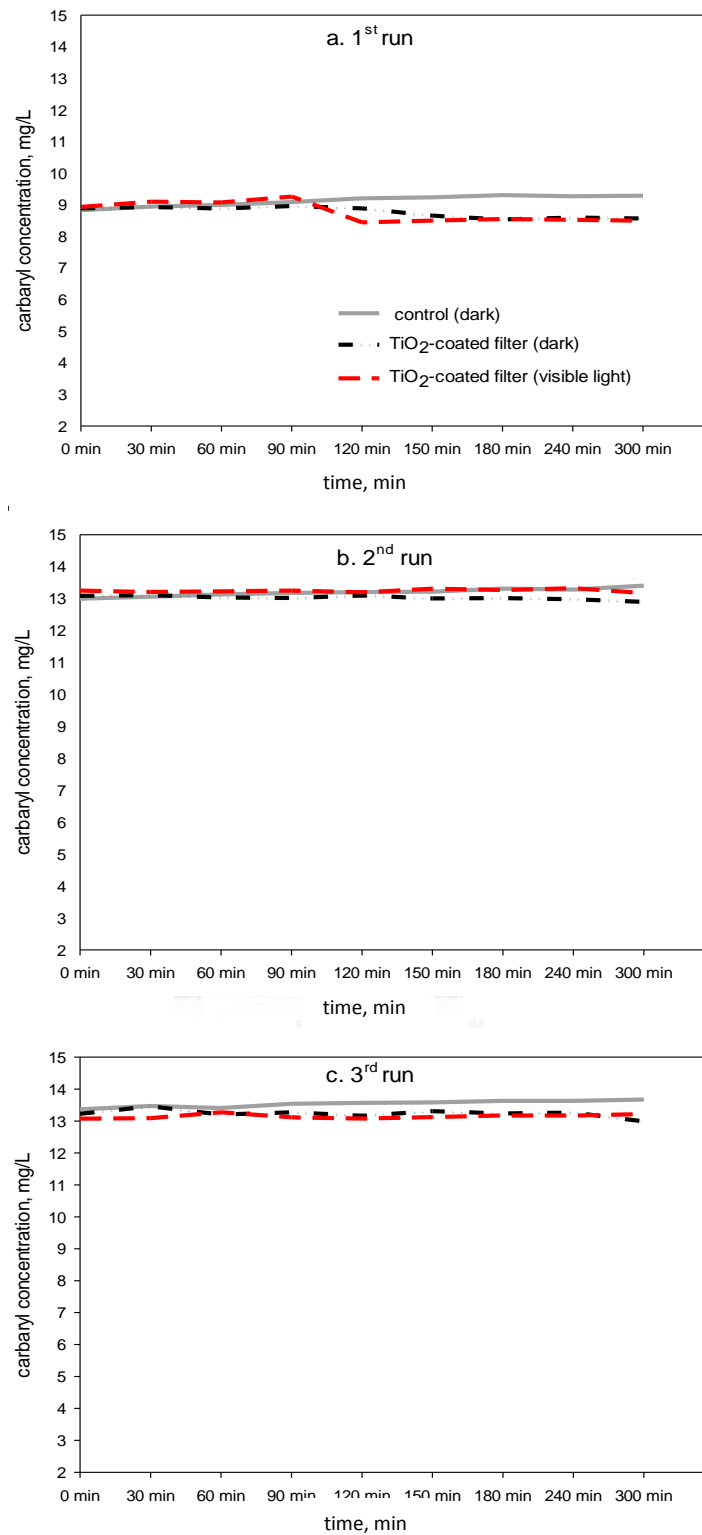
(ความเข้มข้นซีวี่เอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเคลือบจำนวน 13 และ 14 ชั้น (น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.53-0.54 กรัมต่อแผ่น) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุดคือ 84.7%, 84.6% และ 83.8% จากการศึกษารั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ มีความเข้มข้นของคาร์บาริลคงเหลือ 1.45, 1.48

และ 2.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิตร จึงเทียบเท่ากับ ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $2.65 \pm 0.027$  กรัมต่อลิตร

นอกจากนี้ในการศึกษายังมีการทดสอบการดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล โดยเปรียบเทียบระหว่างปีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริล (control) กับปีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้ในที่มืด รวมถึงมีการทดสอบอิทธิพลของแสงวิซิเบิล (visible light) ภายในห้องที่มีต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยนำปีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้นอกห้องสี่ยูวีเอ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง นาน 300 นาที น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเฉลี่ย  $0.53 \pm 0.007$  กรัมต่อแผ่น ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.10



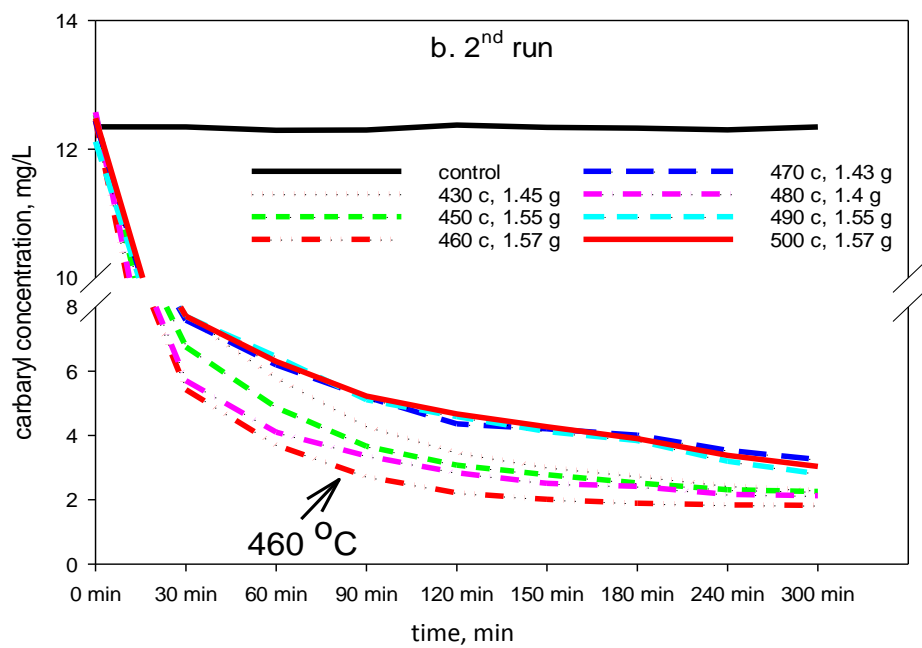
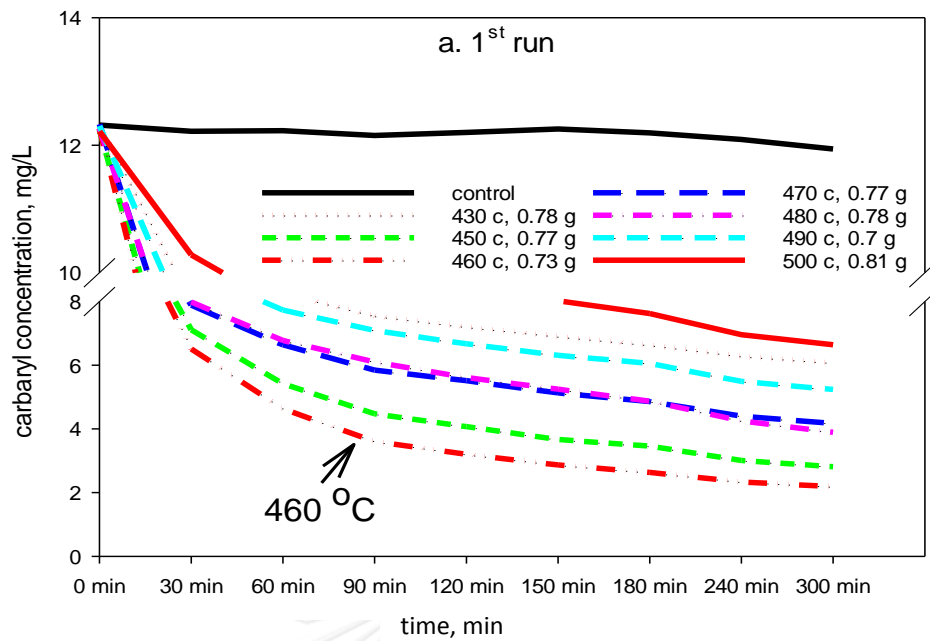


ภาพที่ 4.10 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกใน  
กระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.10 ในครั้งที่ 1 ความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใส่แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในตูมี้ลดลงจากบีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตูมี้ 7.8% ในครั้งที่ 2 ความเข้มข้นของคาร์บาริลลดลง 3.8% และครั้งที่ 3 ความเข้มข้นคาร์บาริลลดลง 5% แสดงว่ามีการดูดซับเกิดขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับนั้นจัดว่าน้อยมากโดยไม่เกิน 8% ส่วนการมีแสงวิซิเบลภายในห้องทดลองมีผลในการสลายสารคาร์บาริลน้อยมาก โดยครั้งที่ 1 พบว่าบีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองเคลือบและได้รับแสงวิซิเบลต่างจากบีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริล 8.5% ครั้งที่ 2 ต่างกัน 1.7% และครั้งที่ 3 ต่างกัน 3.3% ส่วนความแตกต่างระหว่างบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตูมี้ดและบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบภายใต้แสงวิซิเบลต่างกัน 0.8%, 2.1% และ 1.8% ในการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าแสงวิซิเบลแทบไม่มีผลในการสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่การลดลงของคาร์บาริลที่ปรากฏน่าจะมาจากการดูดซับของแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

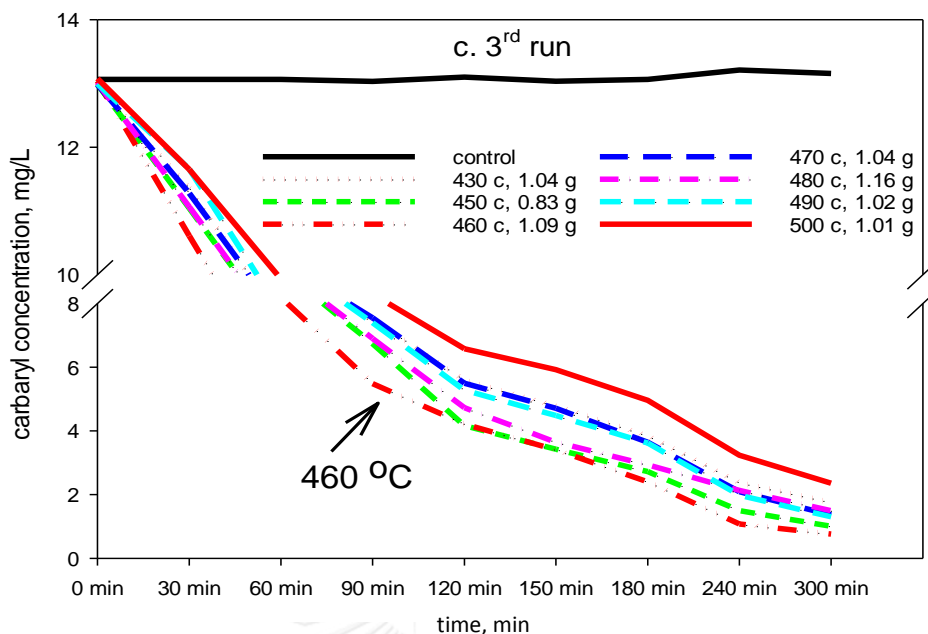
#### 4.2.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดอะซิติก

การศึกษาเริ่มจากการกำหนดจำนวนชั้นเคลือบแผ่นกรองใยแก้วจำนวน 12 ชั้น (น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเฉลี่ย  $1.1 \pm 0.31$  กรัมต่อแผ่น) แล้วใช้อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกันคือ 430, 450, 460, 470, 480, 490 และ 500 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิ calcination ที่ให้ผลดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดอะซิติก

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 4.11 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดอะซิติก

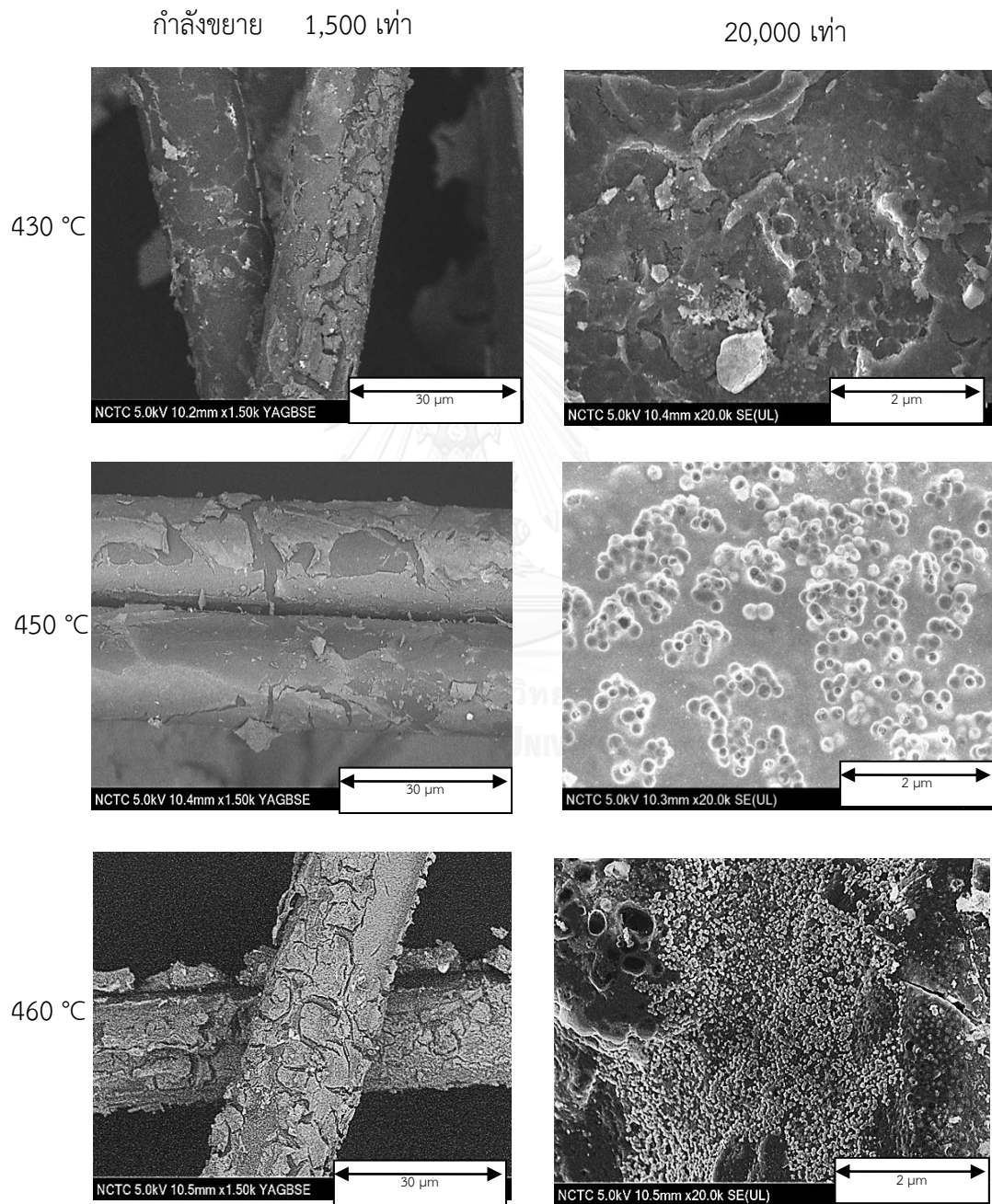
(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิการเผา 460 องศาเซลเซียส สามารถสลายคาร์บาริลได้ดีที่สุดทั้ง 3 ครั้งของการทดลอง โดยมีความเข้มข้นคาร์บาริลเหลืออยู่ที่เวลา 300 นาทีเท่ากับ 2.1, 1.8 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 12.3, 12.4 และ 13.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 82.1%, 85.3% และ 94.2% และจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 430, 460 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพปานกลาง สูง และต่ำ สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.4

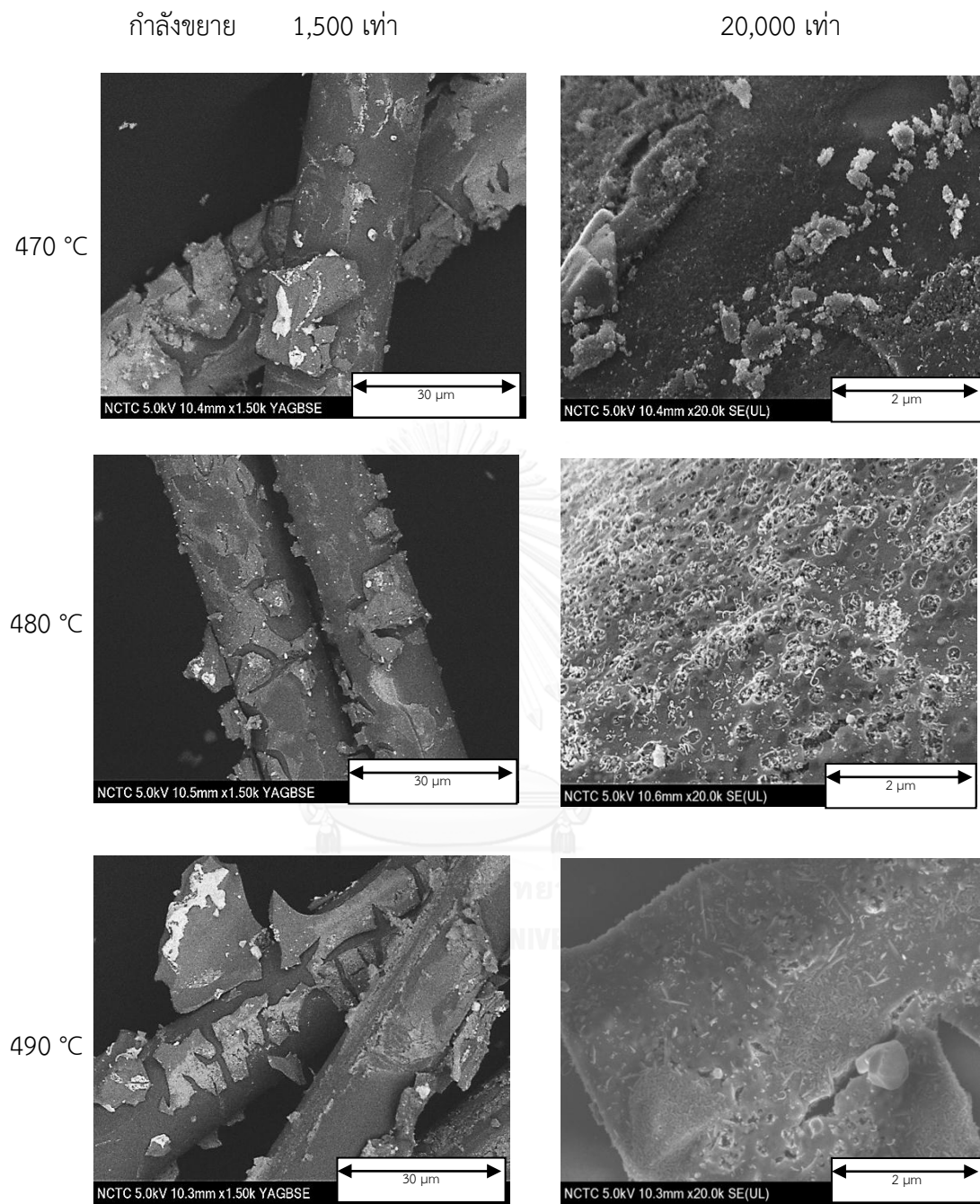
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดอะซิติก

อุณหภูมิ (°C)	Anatase (101 at 25.4°)						Rutile (110 at 27.5°)		
	peak intensity			ขนาดผลึกไทเทเนียม (°A)			peak intensity		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
430	41	65	45	367	443	299	0	0	0
460	52	75	65	361	204	201	0	0	0
500	48	48	38	248	312	232	0	0	0

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่า peak intensity ของเฟสอะนาเทสที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุดแต่ขนาดอนุภาคไม่ได้มีขนาดใหญ่ที่สุดตามไปด้วย และเมื่อนำแผ่นกรองเคลือบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล



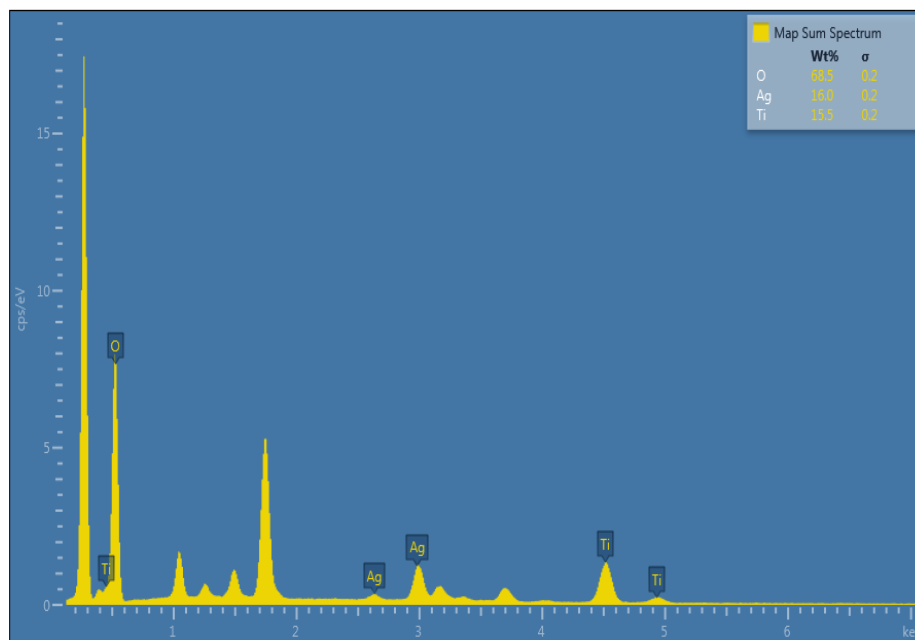
ภาพที่ 4.12 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล





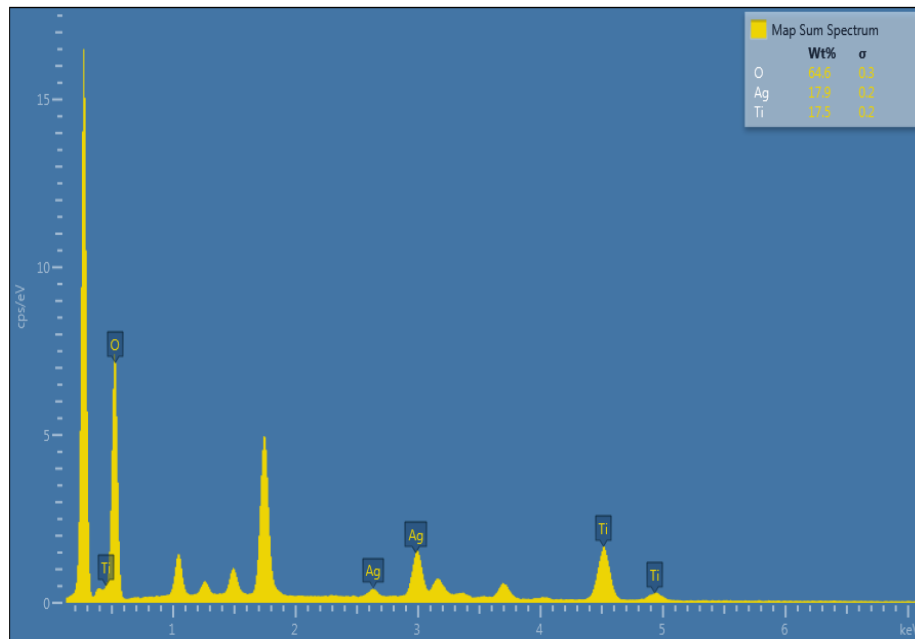
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล

อุณหภูมิ (°C)	ไทเทเนียม (%wt/wt)	เงิน (%wt/wt)	ออกซิเจน (%wt/wt)
430	15.5	16	68.5
460	17.5	17.9	64.6
500	15.7	15.6	68.7

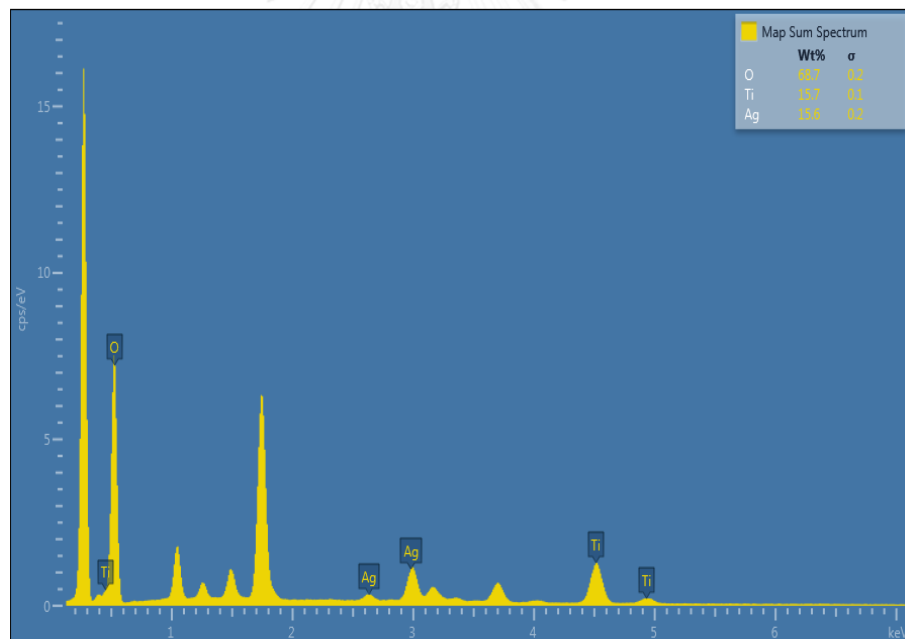


a. 430 °C

ภาพที่ 4.13 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล



b. 460 °C

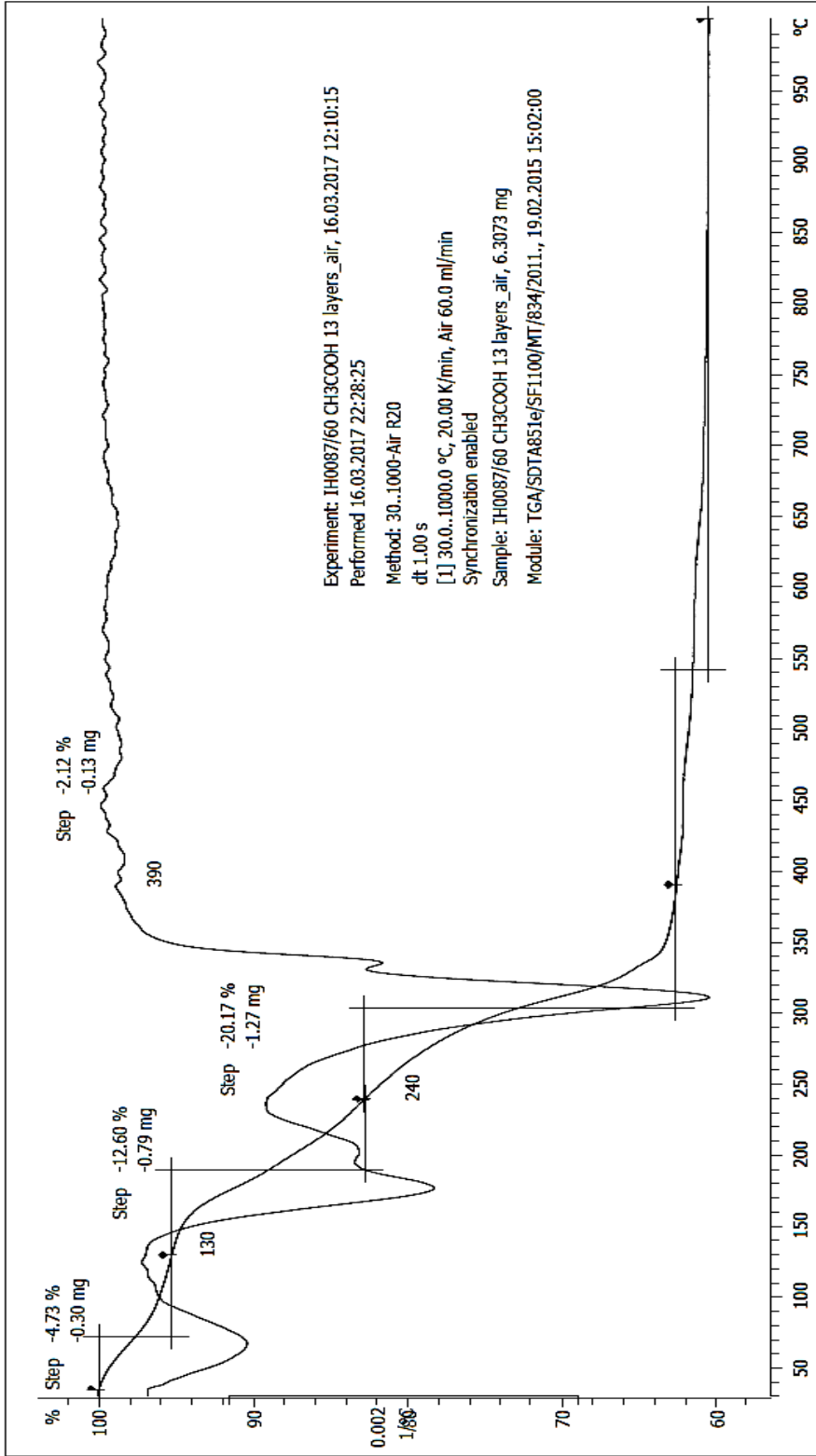


c. 500 °C

ภาพที่ 4.13 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกใน กระบวนการโซล-เจล

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.13 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนักของไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส นั้นสูงสุดเช่นเดียวกัน และเมื่อนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของโพลีเมอร์จากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 4.14

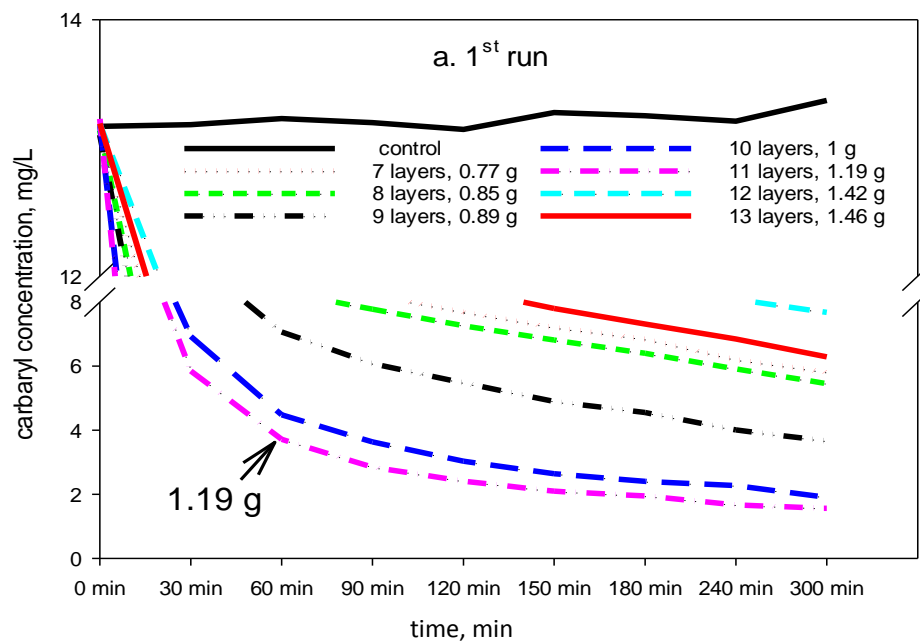




ภาพที่ 4.14 การสลายตัวของโพลีเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการไหล-เจลที่ใช้กรดอะซิติก

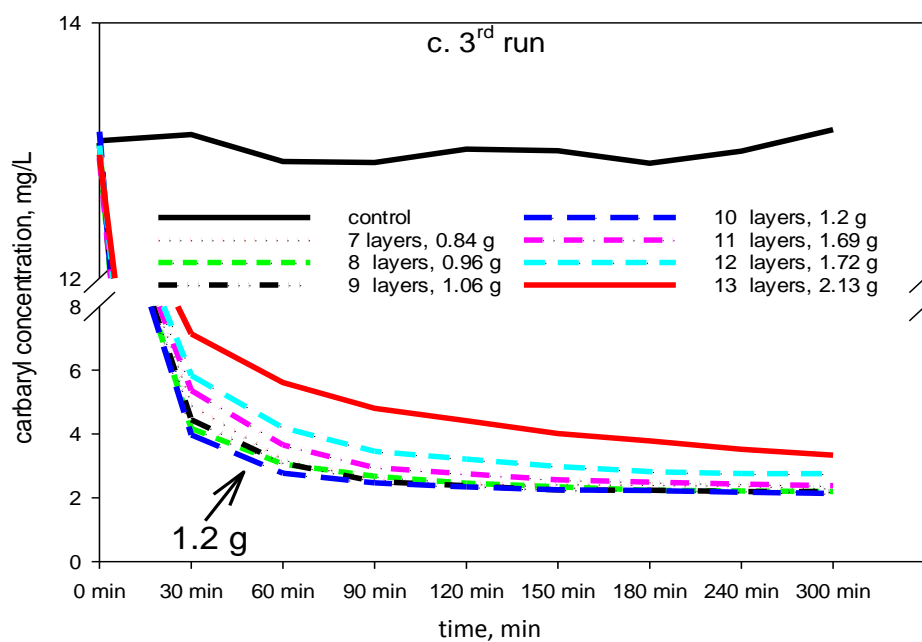
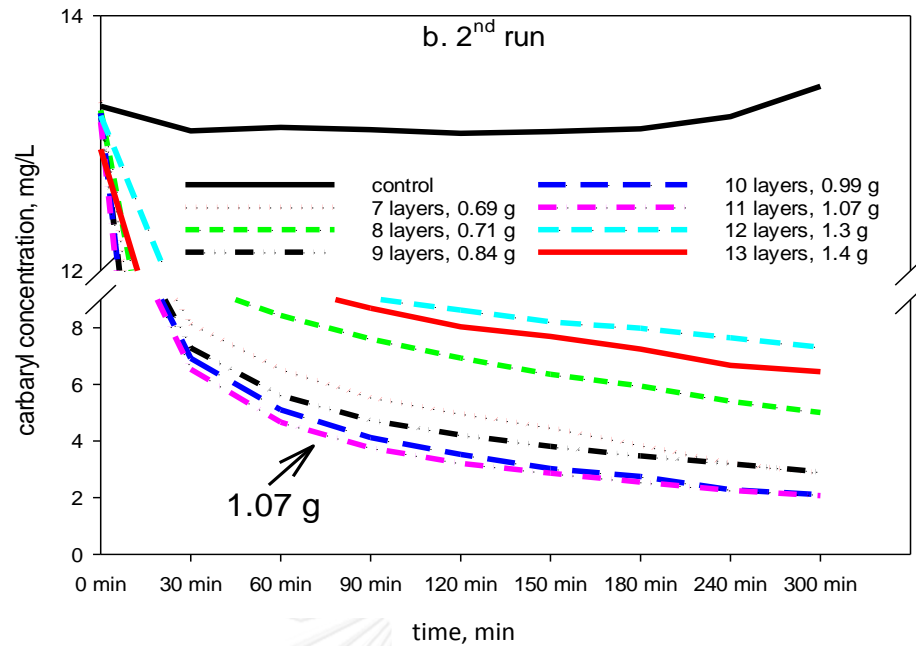
จากภาพที่ 4.14 พบว่าการสลายตัวของสารโพลีเอทิลีน ไกลคอลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเผาแผ่นกรองเคลือบที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส จึงไม่มีสารโพลีเอทิลีน ไกลคอลหลงเหลืออยู่

หลังจากที่ได้อุณหภูมิ calcination ที่เหมาะสมแล้ว จึงมีการศึกษาจำนวนชั้นเคลือบหรือปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองที่เหมาะสมในการสลายคาร์บาริล โดยทำการเคลือบ 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 ชั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองตั้งแต่ 0.69 กรัมต่อแผ่น ไปจนถึง 2.13 กรัมต่อแผ่น ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.15 ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4.15 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดอะซิติก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 4.15 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดอะซิติก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

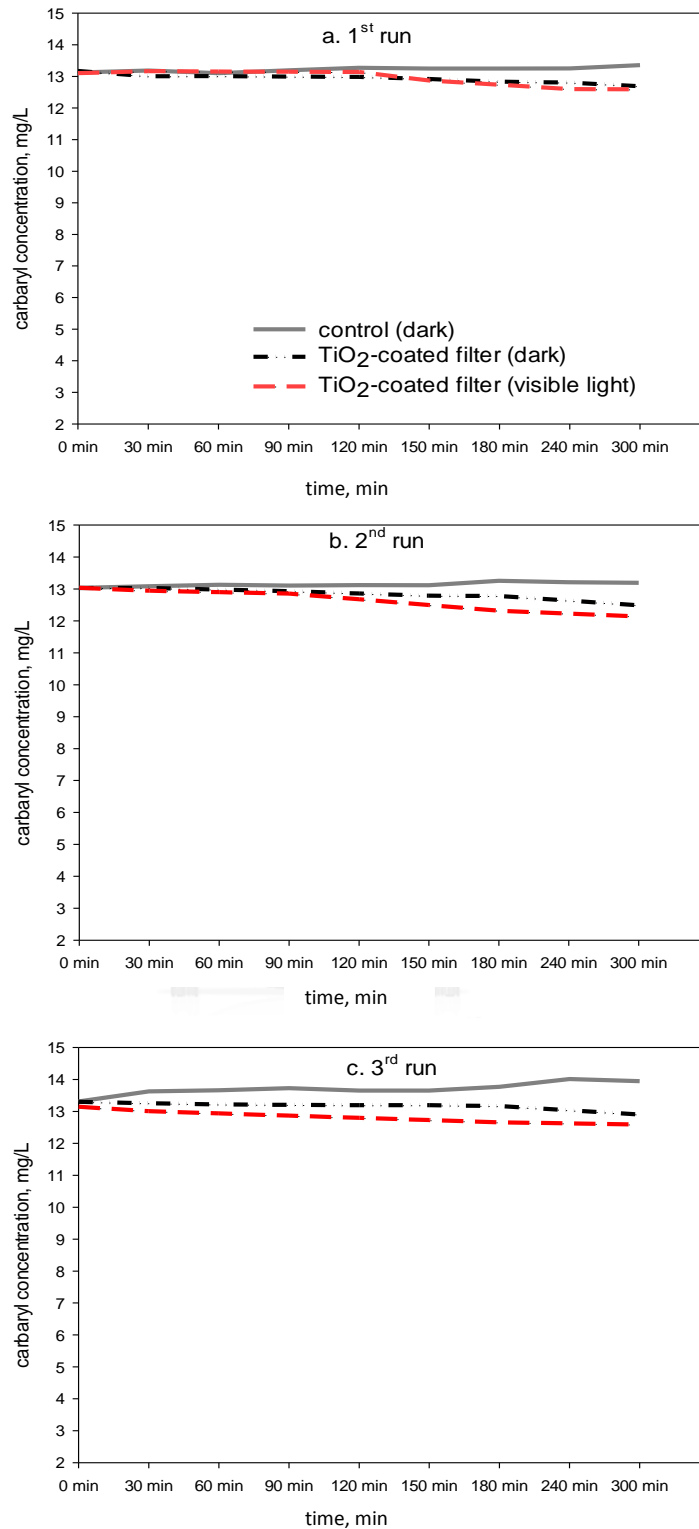
(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าการเคลือบจำนวน 10-11 ชั้น (น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.07-1.2 กรัมต่อแผ่น) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุดคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บาริล 88.2%, 84.2% และ 83.7% จากการศึกษาครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมีคาร์บาริล

คงเหลือที่เวลา 300 นาที คือ 1.56, 2.07 และ 2.13 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นตั้งต้น 13.22, 13.16 และ 13.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร จึงเทียบเท่ากับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $5.78 \pm 0.37$  กรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าการใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล ที่ใช้เพียง  $2.65 \pm 0.027$  กรัมต่อลิตร โดยที่ประสิทธิภาพการสลายคาร์บาริลนั้นใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ในการศึกษายังมีการทดสอบการดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล โดยเปรียบเทียบระหว่างบีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริล (control) ในตู้มืดกับบีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้ในที่มืด รวมถึงมีการทดสอบอิมัลชันของแสงวิชิเบลภายในห้อง โดยนำบีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้นอกห้องสี่เหลี่ยม ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง นาน 300 นาที น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเฉลี่ย  $1.18 \pm 0.01$  กรัมต่อแผ่นผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.16



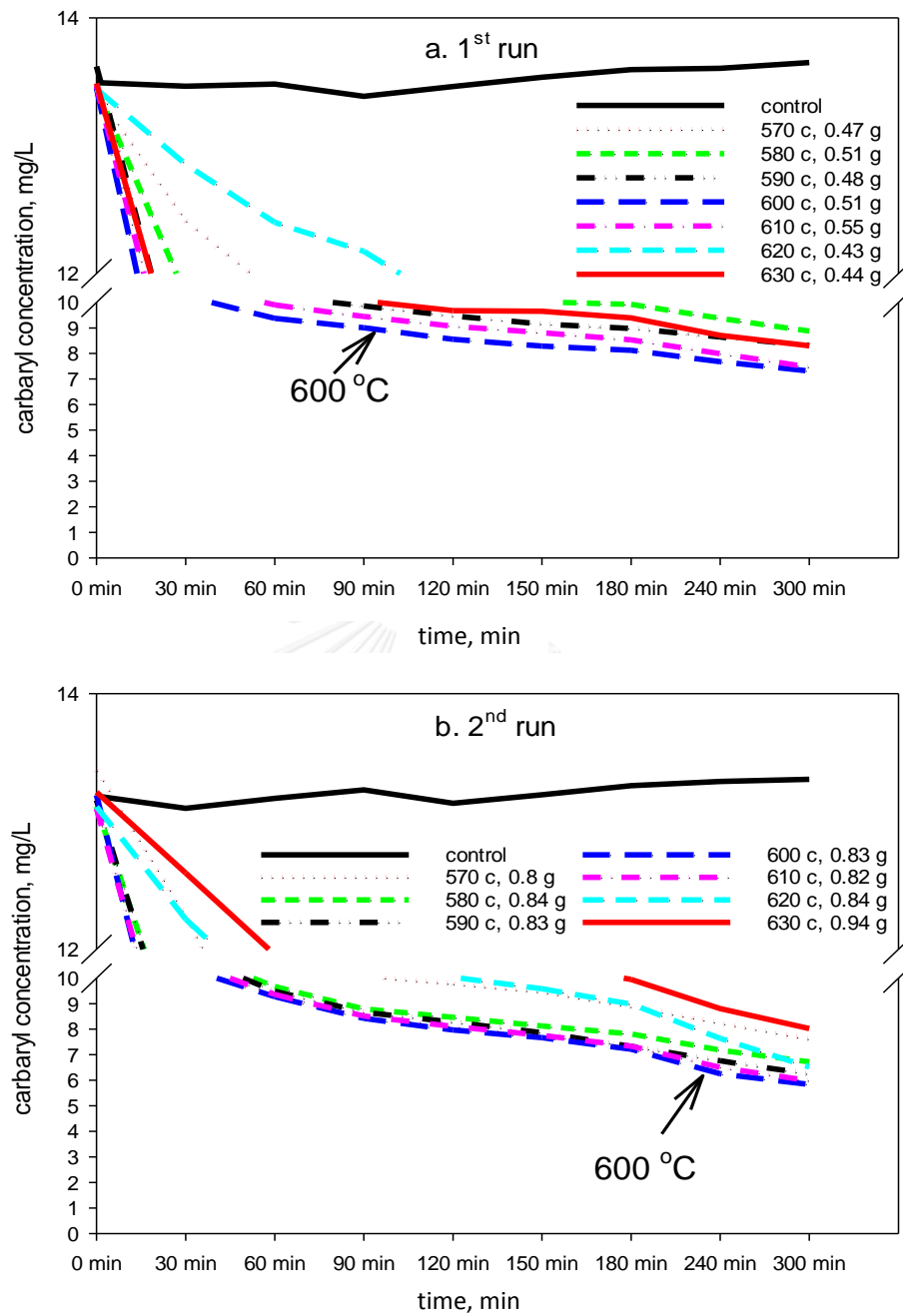


ภาพที่ 4.16 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติกใน  
กระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.16 ในครั้งที่ 1 ความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใส่แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในตู้มีลดลงจากบีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตู้มี 5% ในครั้งที่ 2 ความเข้มข้นของคาร์บาริลลดลง 5.3% และครั้งที่ 3 ความเข้มข้นของคาร์บาริลลดลง 7.4% แสดงว่ามีการดูดซับเกิดขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับนั้นจัดว่าน้อยมากโดยไม่เกิน 8% เช่นเดียวกับการใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล ส่วนการมีแสงวิซิเบลภายในห้องทดลองมีผลในการสลายสารคาร์บาริลที่น้อยมาก โดยครั้งที่ 1 พบว่าบีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบวางไว้ภายใต้แสงวิซิเบลต่างจากบีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตู้มี 5.7% ครั้งที่ 2 มีความแตกต่าง 7.9% และครั้งที่ 3 มีความแตกต่าง 9.7% ขณะที่ความแตกต่างระหว่างบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตู้มีและบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบภายใต้แสงวิซิเบลมีความแตกต่างเพียง 0.8%, 2.8% และ 2.4% จากการทดลอง 3 ซ้ำ ตามลำดับ แสดงว่าแสงวิซิเบลแทบไม่มีผลในการสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่การลดลงของคาร์บาริลที่ปรากฏน่าจะมาจากการดูดซับของแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า แต่ยังมีปริมาณที่น้อยมากไม่ถึง 10% ดังกล่าว

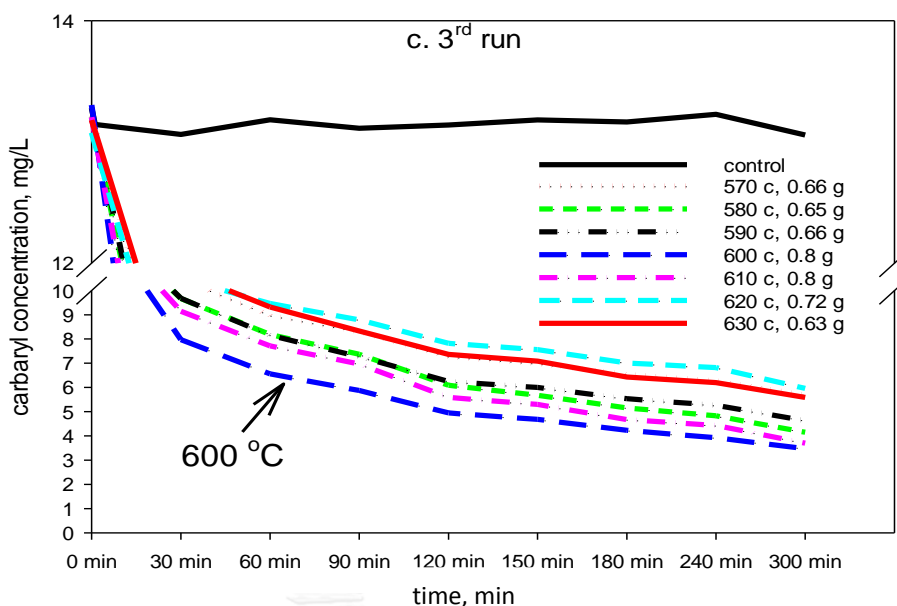
#### 4.2.3 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้กรดไฮโดรคลอริก

การศึกษาเริ่มจากการกำหนดจำนวนชั้นเคลือบแผ่นกรองใยแก้วจำนวน 13 ชั้น (น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์เฉลี่ย  $0.68 \pm 0.16$  กรัมต่อแผ่น) แล้วใช้อุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 570, 580, 590, 600, 610, 620 และ 630 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิ calcination ที่ให้ผลดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซลเจล ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 4.17 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากกระบวนการโซล-เจล ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก

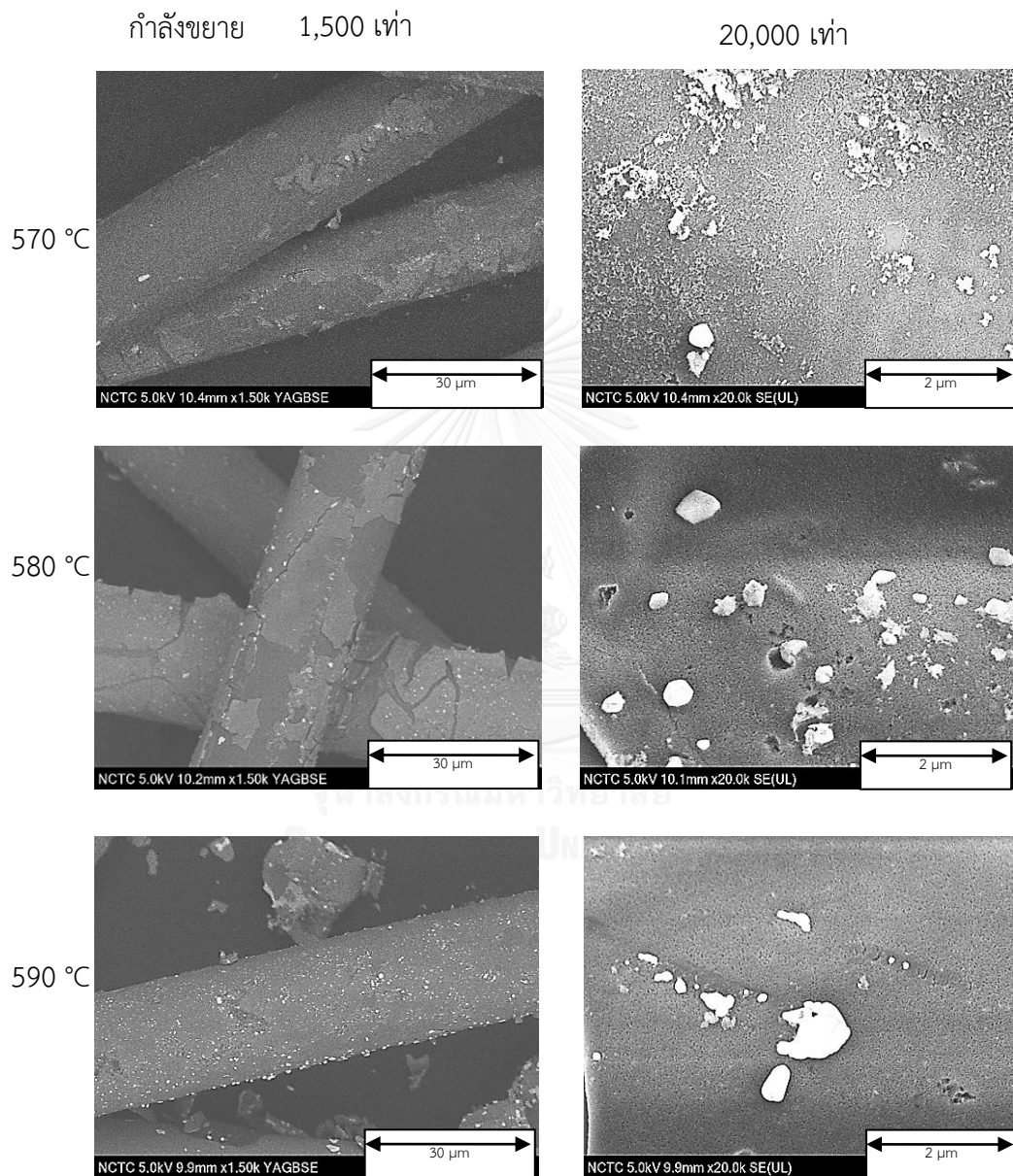
(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่สลายคาร์บาริลได้ดีที่สุด โดยการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 เมื่อครบเวลา 300 นาที พบความเข้มข้นคาร์บาริลเหลืออยู่ 7.31, 5.83 และ 3.46 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 13.45, 13.2 และ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 45.6%, 55.8% และ 73.9% ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างกันจากการใช้เครื่องวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.10 โดยเลือกเฉพาะอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลต่ำ ปานกลาง และสูงที่สุด

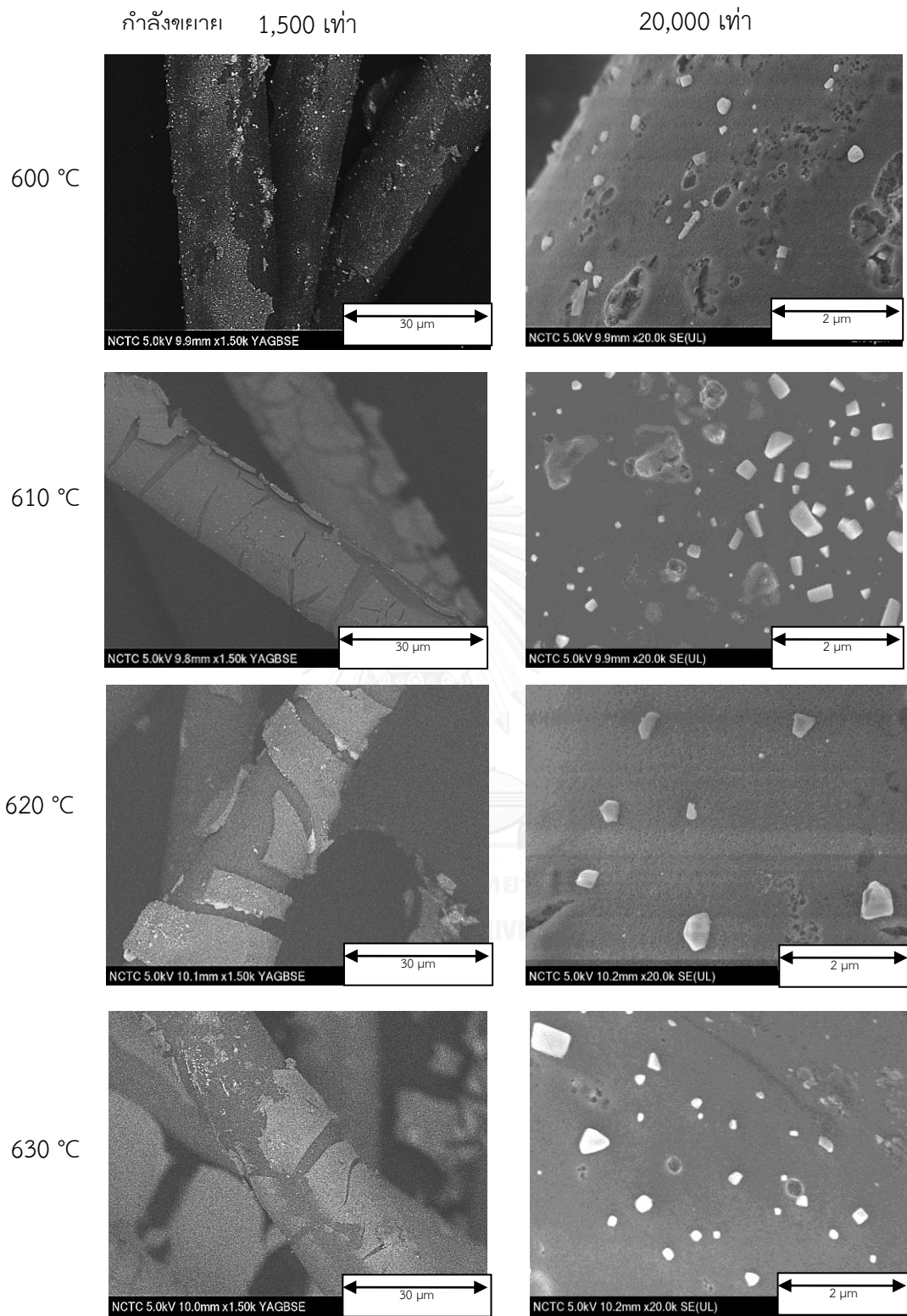
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไฮโดรคลอริก

อุณหภูมิ (°C)	Anatase (101 at 25.4°)						Rutile (110 at 27.5°)		
	peak intensity			ขนาดผลึกไทเทเนียม (°A)			peak intensity		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
570	131	110	118	175	154	156	0	0	0
590	155	140	145	198	177	184	0	0	0
600	162	145	147	169	164	179	0	0	0

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ค่า peak intensity ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่าสูงที่สุดแต่ขนาดผลึกไม่ได้มีขนาดใหญ่ที่สุดตามไปด้วย และเมื่อนำแผ่นกรองเคลือบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถแสดงได้ในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล



ภาพที่ 4.18 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการ  
โซล-เจล

จากภาพที่ 4.18 พบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจลนั้น ปรากฏเป็นอนุภาคของเงินกระจายอยู่ทั่วไปอย่างชัดเจน โดยไม่ปรากฏเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ หากเทียบกับการใช้กรดไนตริก และกรดอะซิติก เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (BET) โดยเลือกเฉพาะอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลต่ำ ปานกลาง และสูงที่สุด แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.8

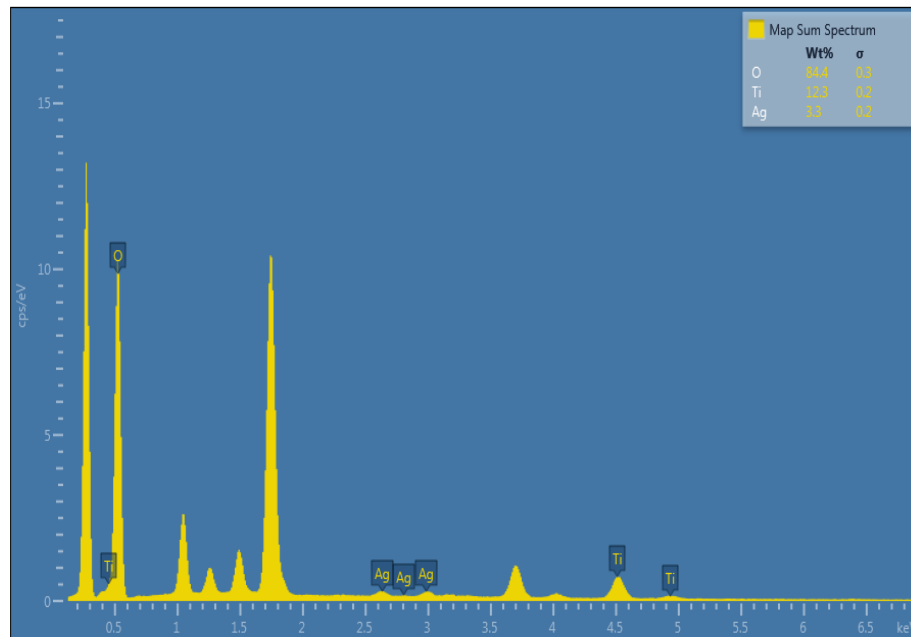
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวแผ่นกรองเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก

อุณหภูมิ (°C)	พื้นที่ผิว Multipoint BET (m <sup>2</sup> /g)
570	8.16
590	7.76
600	11.75

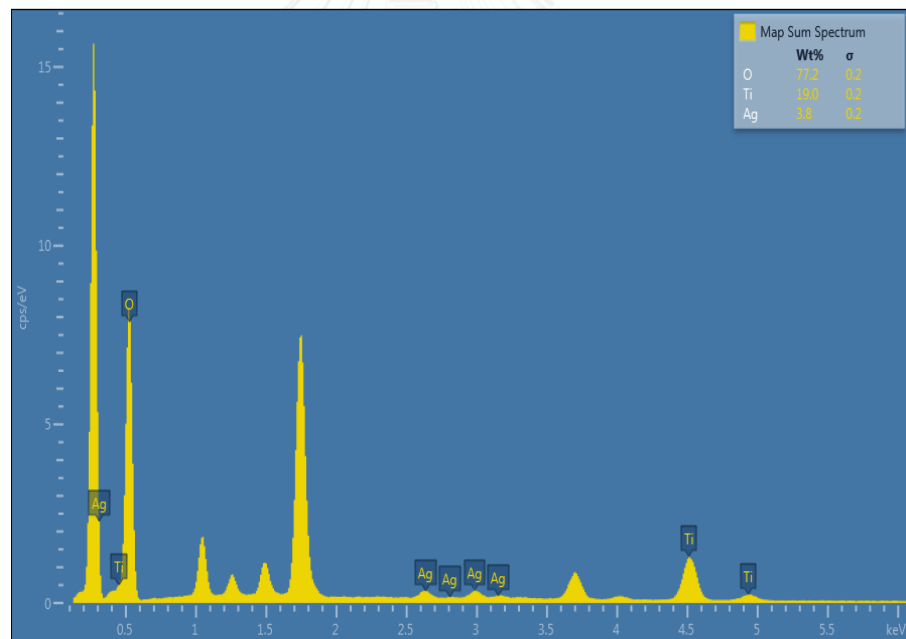
จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าพื้นที่ผิวจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นั้นมีมากที่สุด และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกรองด้วยเครื่อง EDX สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.19

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล

อุณหภูมิ (°C)	ไทเทเนียม (%wt/wt)	เงิน (%wt/wt)	ออกซิเจน (%wt/wt)
570	12.3	3.3	84.4
590	19	3.8	77.2
600	20.4	3.8	75.8



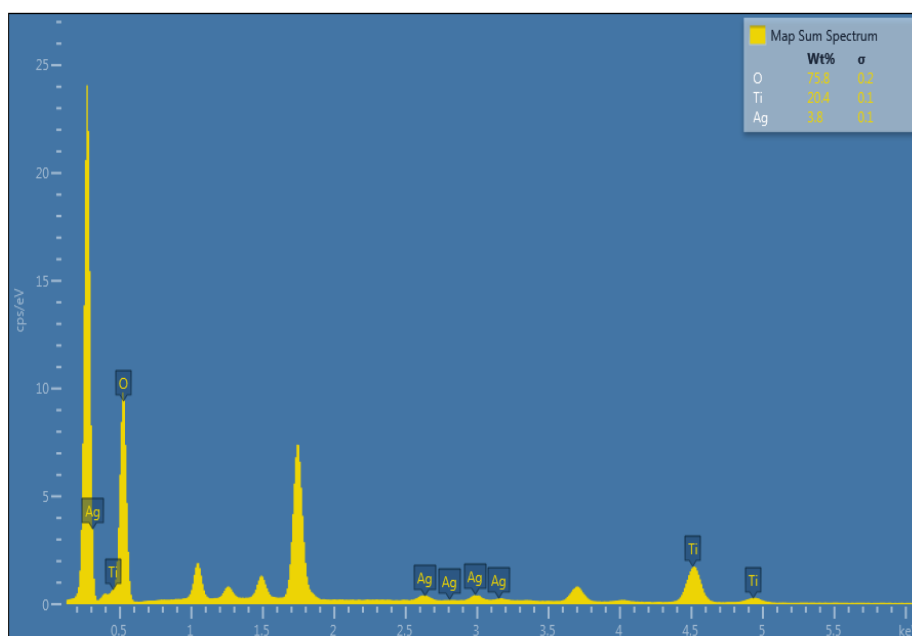
a. 570 °C



b. 590 °C

ภาพที่ 4.19 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล



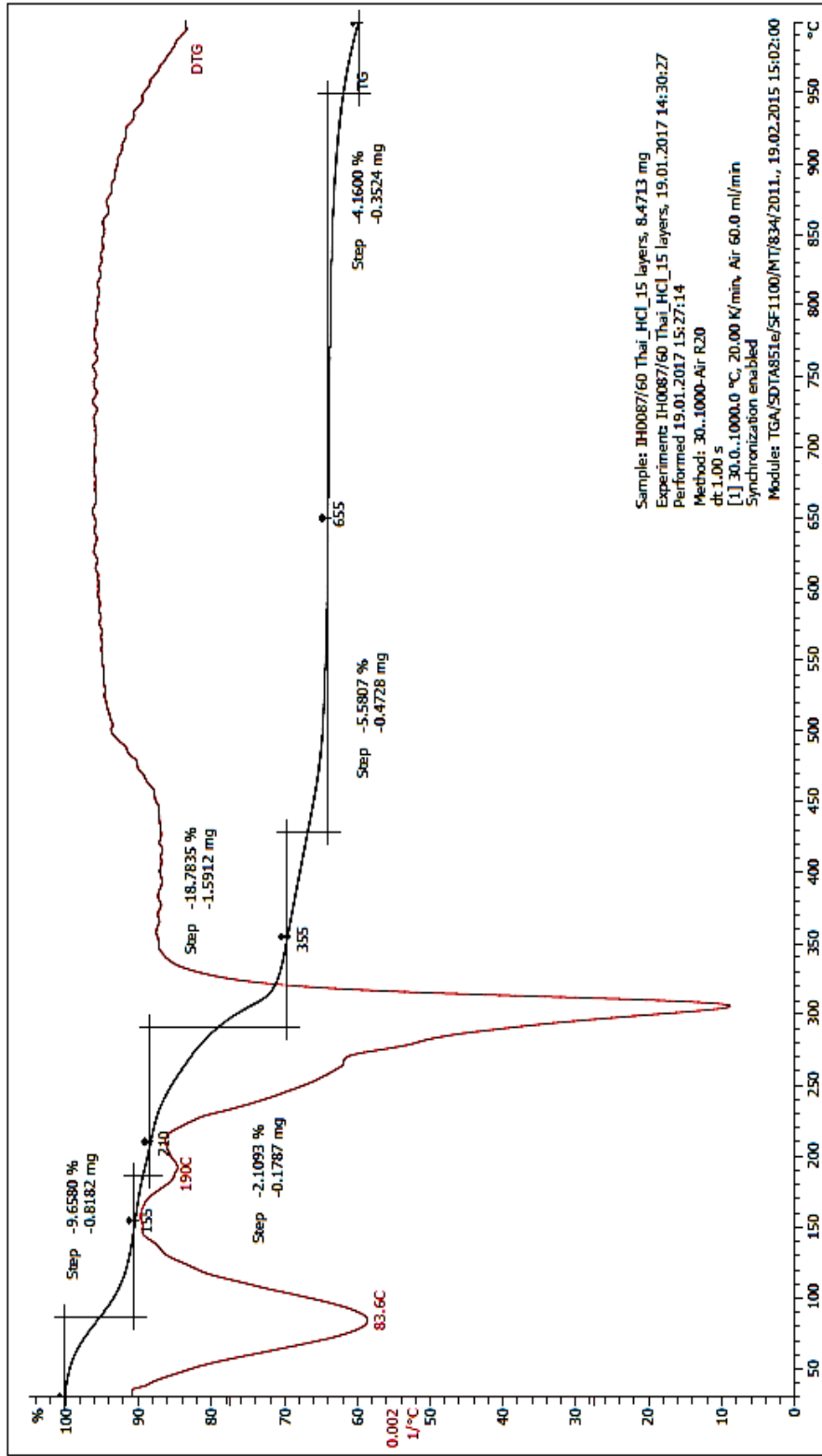


c. 600 °C

ภาพที่ 4.19 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.19 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นั้นมีค่า 20.4% ซึ่งสูงที่สุด สอดคล้องกับ peak intensity ของอะนาเทสที่มากที่สุด และการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิวที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเช่นกัน

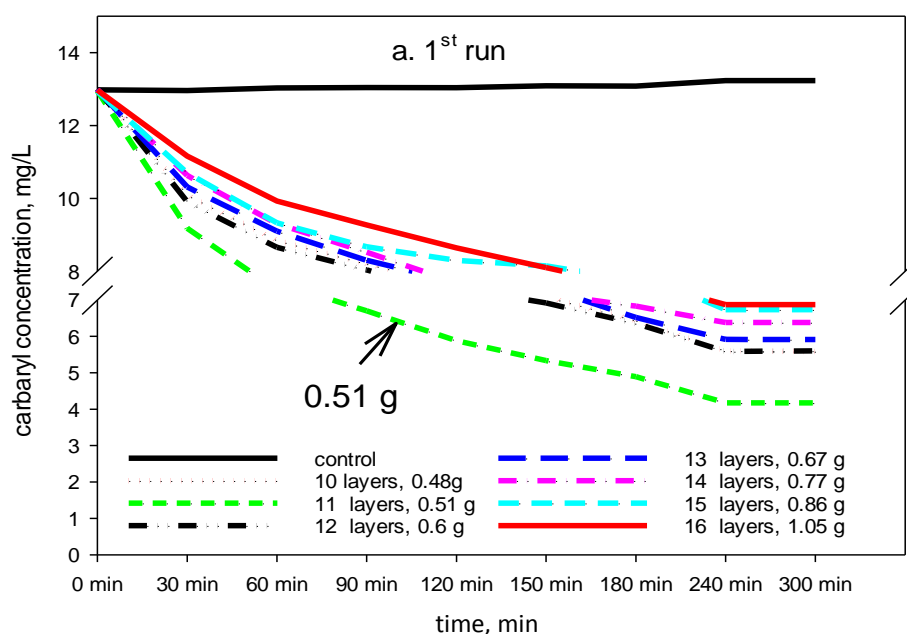
นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของโพลิเมอร์ในกระบวนการโซล-เจลจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) ดังแสดงในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 การสลายตัวของโพลีเมอร์ในการเคลือบแผ่นกรองด้วยกระบวนการโซล-เจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก

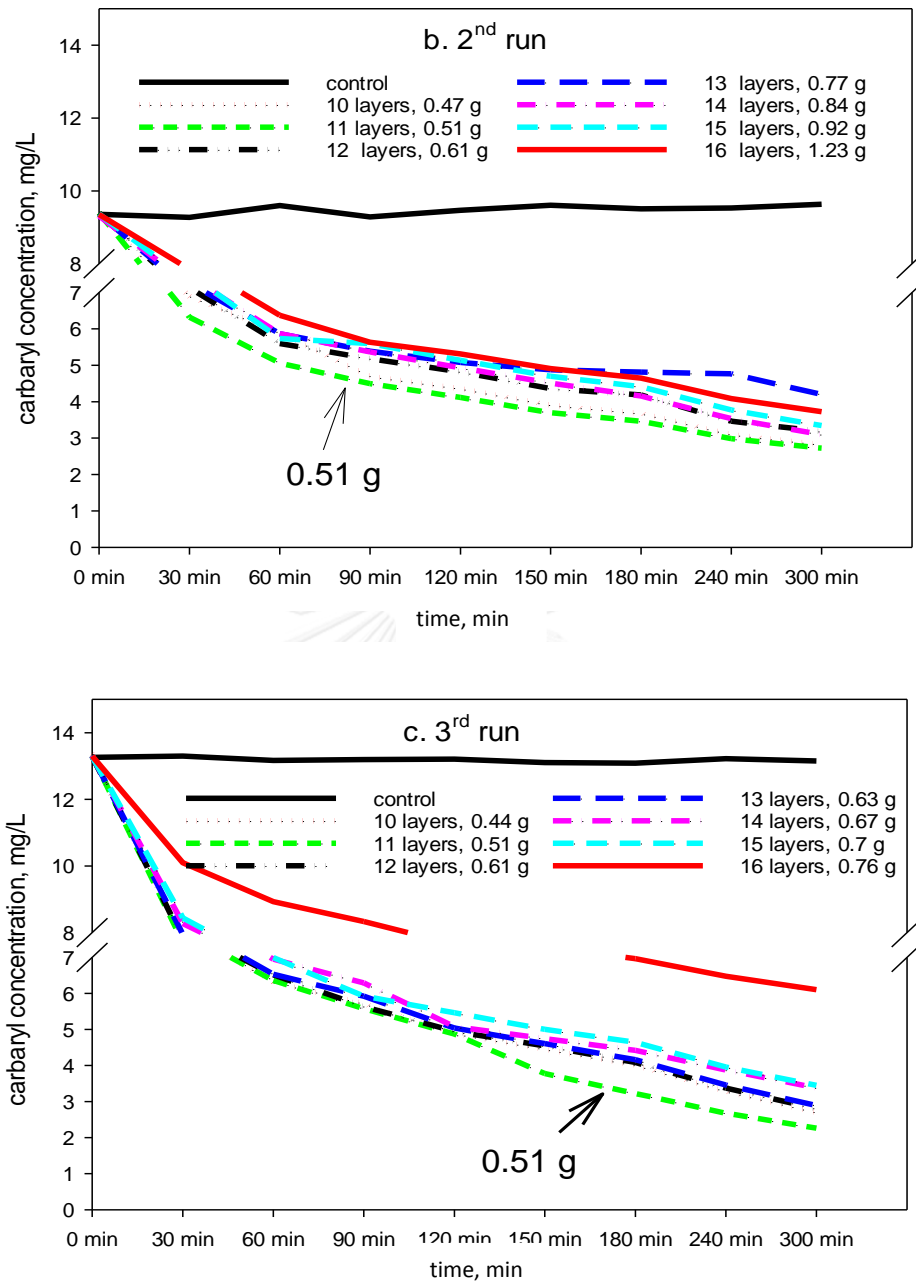
จากภาพที่ 4.20 พบว่าการสลายตัวของสารโพลีเอทิลีน ไกลคอลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นการใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จึงไม่มีสารโพลีเอทิลีน ไกลคอลหลงเหลืออยู่

หลังจากที่ได้อุณหภูมิ calcination ที่เหมาะสมแล้ว จึงมีการศึกษาจำนวนชั้นเคลือบหรือปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองที่เหมาะสมในการสลายคาร์บาริลโดยทำการเคลือบ 10, 11, 12, 13, 14, 15 และ 16 ชั้น นำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองตั้งแต่ 0.44 กรัมต่อแผ่น ไปจนถึง 1.23 กรัมต่อแผ่น ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.21 ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ลดลงไปตามช่วงเวลา



ภาพที่ 4.21 การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



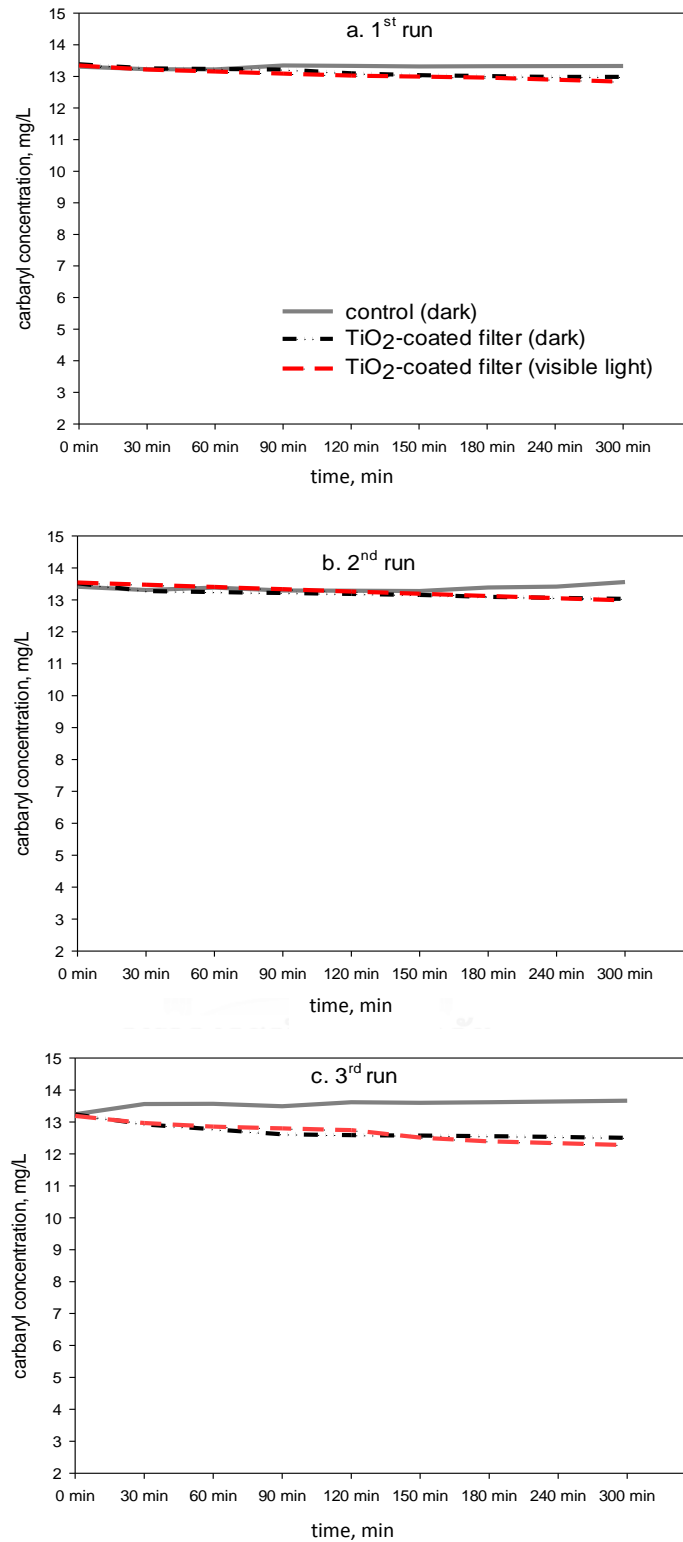
ภาพที่ 4.21 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก และใช้จำนวนชั้นเคลือบที่ต่างกัน

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3-3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าการเคลือบจำนวน 11 ชั้น (น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์  $0.51 \pm 0.005$  กรัมต่อแผ่น) สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุดคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บาริล 67.8%, 71% และ 72.2% จากการศึกษารั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยมี

คาร์บาริลคงเหลือที่เวลา 300 นาที คือ 4.17, 2.72 และ 2.26 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 12.95, 9.39 และ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าการใช้กรดไนตริก และกรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล โดยในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร จึงเทียบเท่ากับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $2.56 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร ใกล้เคียงกับการใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล

นอกจากนี้ในการศึกษายังมีการทดสอบการดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล โดยเปรียบเทียบระหว่างปีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริล (control) ในตู้มืดกับปีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้ในตู้มืด รวมถึงมีการทดสอบอิทธิพลของแสงวิซิเบิลภายในห้องโดยนำปีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบจำนวน 1 แผ่นใส่ในสารละลายคาร์บาริลวางไว้นอกห้องสี่งูวีเอ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง นาน 300 นาที น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเฉลี่ย  $0.51 \pm 0.004$  กรัมต่อแผ่น ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.22



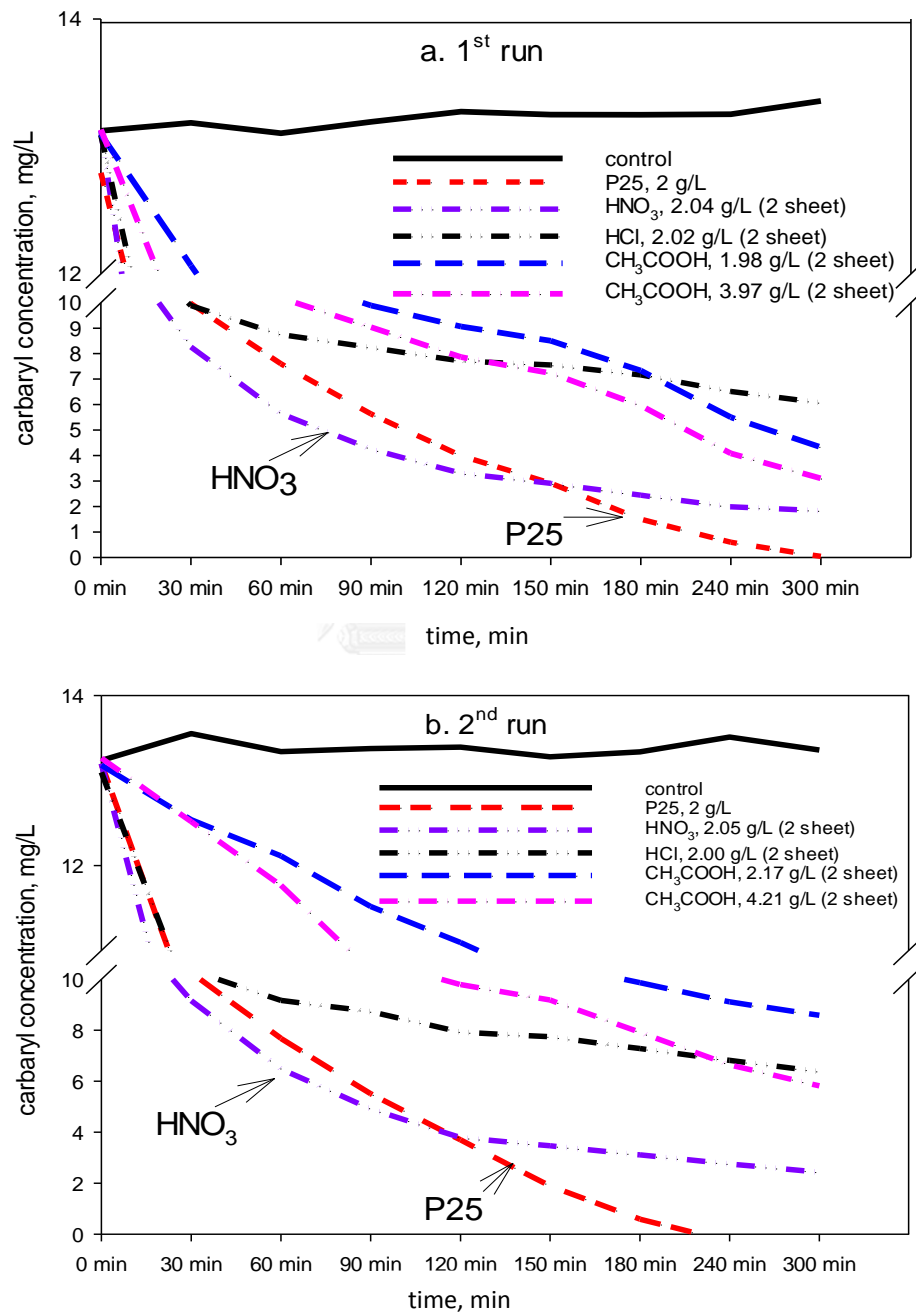
ภาพที่ 4.22 การดูดซับคาร์บาริลด้วยแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์  
ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.22 ในครั้งที่ 1 ความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใส่แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวมีลดลงจากปีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตัวมี 2.6% ในครั้งที่ 2 ความเข้มข้นของคาร์บาริลลดลง 3.8% และครั้งที่ 3 ความเข้มข้นคาร์บาริลลดลง 8.5% แสดงว่ามีการดูดซับเกิดขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับนั้นจัดว่าน้อยมากโดยไม่เกิน 8.5% ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้กรดไนตริกและกรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล ส่วนการมีแสงวิซิเบิลภายในห้องทดลองมีผลในการสลายสารคาร์บาริลที่น้อยมากเช่นกัน โดยครั้งที่ 1 พบว่าปีกเกอร์ทดลองที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบและได้รับแสงวิซิเบิลต่างจากปีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตัวมี 3.6% ครั้งที่ 2 ความแตกต่างมี 4.2% และครั้งที่ 3 ความแตกต่างมี 10% ขณะที่ความแตกต่างระหว่างปีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตัวมีและปีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบภายใต้แสงวิซิเบิลในครั้งที่ 1, 2 และ 3 คือ 1.1%, 0.4% และ 1.8% ซึ่งจัดว่าน้อยมาก จึงสรุปได้ว่าแสงวิซิเบิลและการดูดซับของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจลมีผลต่อการลดลงของคาร์บาริลที่น้อยมากไม่เกิน 10%

#### 4.3 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจล

หลังจากทราบปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการสลายคาร์บาริลในน้ำทั้งจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลจากการใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการสลายคาร์บาริลพร้อมๆ กันโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร (2 กรัมต่อลิตร) ใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกซึ่งมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.53-0.54 กรัมต่อแผ่น จำนวน 2 แผ่น ( $2.07 \pm 0.04$  กรัมต่อลิตร) ใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกซึ่งมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์  $0.52 \pm 0.03$  กรัมต่อแผ่น จำนวน 2 แผ่น ( $2.08 \pm 0.09$  กรัมต่อลิตร) และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกซึ่งมีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.07-1.2 กรัมต่อแผ่น จำนวน 2 แผ่น ( $4.14 \pm 0.14$  กรัมต่อลิตร) โดยการทดลองใช้แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติก 2 ชุด เนื่องจากน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกที่เหมาะสมคือ 1.07-1.2 กรัมต่อแผ่น แต่แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดชนิดอื่นๆ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 0.51 – 0.53 กรัมต่อแผ่น โดยทุกชุดการทดลองใช้จำนวนแผ่น 2

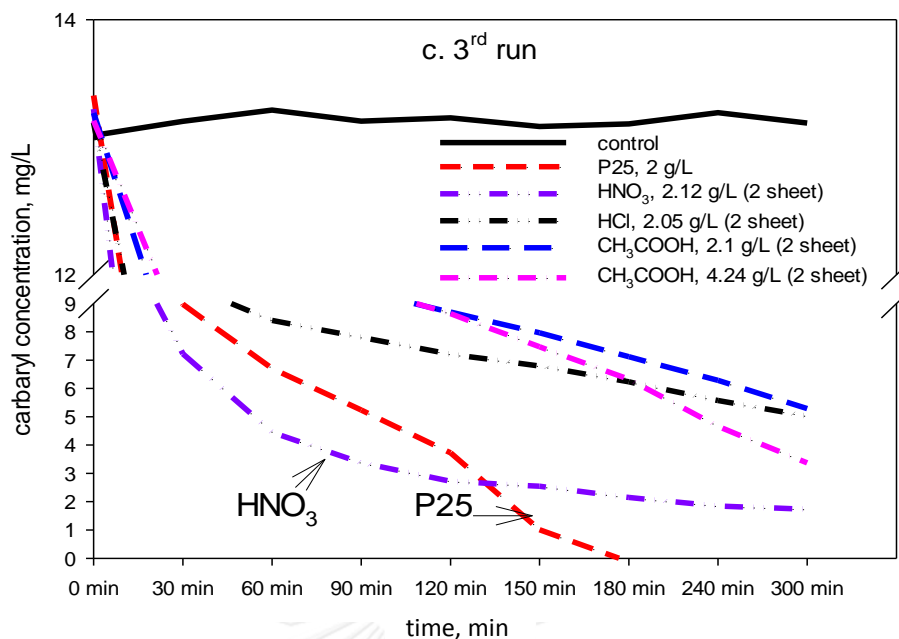
แผ่นเท่ากัน และสุดท้ายใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกซึ่งมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์  $0.51 \pm 0.05$  กรัมต่อแผ่น จำนวน 2 แผ่น ( $2.02 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร) ผลของการสลายคาร์บาริลรวม 3 ครั้งแสดงในภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจล

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3.2-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

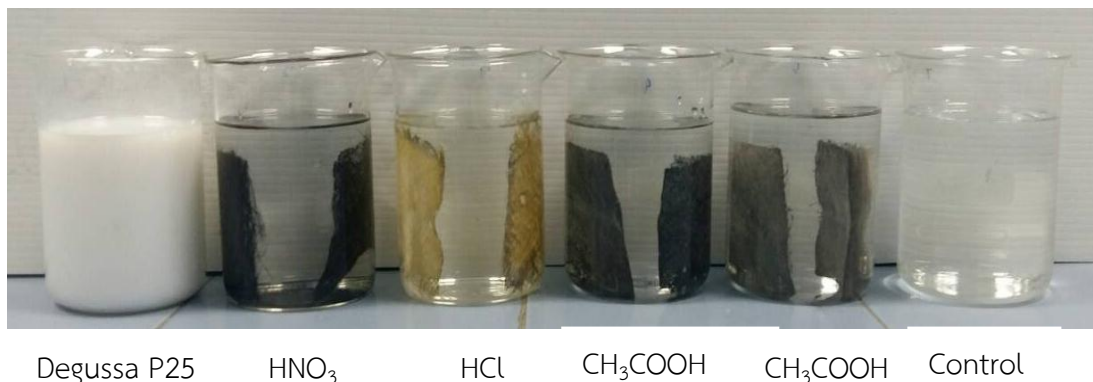




ภาพที่ 4.23 (ต่อ) การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจล

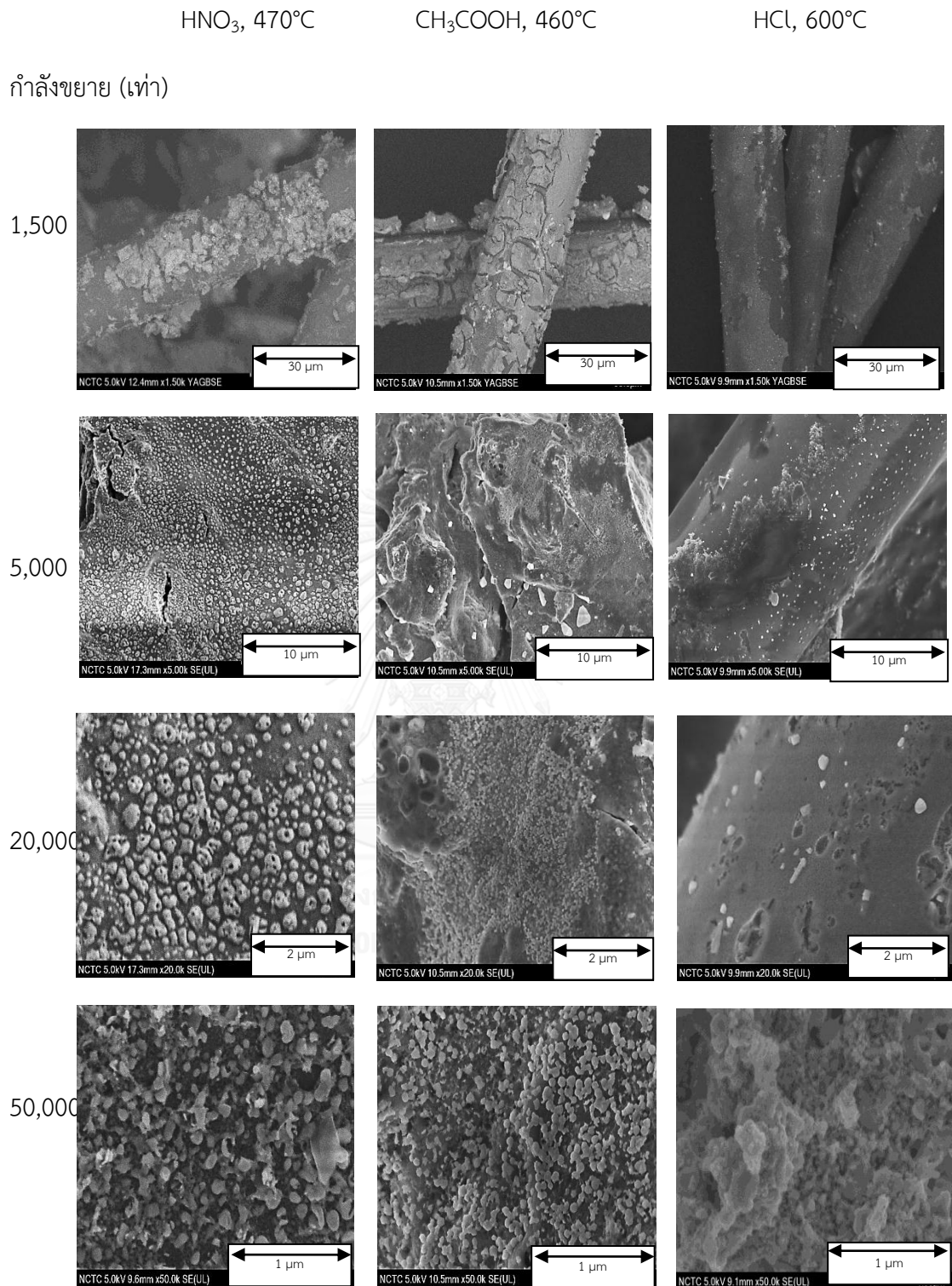
(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3.2-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าในช่วง 120 นาทีแรก จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง การใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก จำนวน 2 แผ่น ในน้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์  $2.07 \pm 0.04$  กรัมต่อลิตร) สามารถสลายคาร์บาริลได้ดีกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร โดยที่เวลา 120 นาที แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกมีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 74.9%, 71.3% และ 79.6% จากการศึกษารั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลา 120 นาที มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 68.8%, 71% และ 72.2% ตามลำดับ ซึ่งการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกให้ประสิทธิภาพดีกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจเนื่องมาจากน้ำตัวอย่างใสไม่มีความขุ่น (ภาพที่ 4.24) จึงทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้มากกว่า ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้เร็วกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความขุ่นมาบดบังการส่องของแสง (Pelizzetti และคณะ, 1990) แต่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 120 นาที ประสิทธิภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ดีกว่า เนื่องจากเมื่อแสงสามารถส่องถึงผงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างเต็มที่แล้ว การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้มาก เนื่องจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ  $25 \pm 5$  นาโนเมตร (plasmachem, 2017) ทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลได้ดีกว่าหลังจาก 120 นาที เป็นต้นไป



ภาพที่ 4.24 ปีกเกอร์ทดลองที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบ

สำหรับลำดับของการสลายคาร์บาริลในน้ำ และประสิทธิภาพการกำจัดในนาที่ที่ 300 เรียงจากมากไปหาน้อยคือ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร (85.7-100%) > โขลเจลที่ใช้กรดไนตริกความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์  $2.07 \pm 0.04$  กรัมต่อลิตร (81.6-86.9%) > โขลเจลที่ใช้กรดอะซิติกความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์  $4.06 \pm 0.12$  กรัมต่อลิตร (56.1-76.3%) > โขลเจลที่ใช้กรดอะซิติกความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์  $2.08 \pm 0.09$  กรัมต่อลิตร (34.9-67%) > โขลเจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์  $2.02 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร (51.3-61.9%) โดยกรดไนตริกให้ประสิทธิภาพดีที่สุดรองจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากกรดไนตริกนั้นก่อให้เกิดผลึกของอะนาเทสที่ชัดเจนและมีจำนวนมากว่าการใช้กรดชนิดอื่น (ภาพที่ 4.25) จึงน่าจะเป็นสาเหตุให้มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลได้มากที่สุดในกลุ่มของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลด้วยกัน



ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดต่างชนิดกันในกระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.25 พบว่าลักษณะการเกิดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไนตริกมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sayilkan และคณะ (2005) ที่ระบุว่ากรดไนตริกช่วยให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการเผามีขนาดเล็ก เพราะกรดไนตริกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ ทำให้การเกาะกันของสารเกิดได้มากขึ้นจึงมีหมู่อัลคิลหลงเหลืออยู่มาก และสอดคล้องกับงานวิจัยของกรรณิการ์ จึงสุวัฒน์นันท์ (2548) ที่กล่าวว่า การใช้กรดไนตริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดเฟสที่เป็นอะนาเทสมากยิ่งขึ้น เนื่องจากกรดไนตริกทำให้หมู่อัลคิลที่หลงเหลือเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสรูไทล์ได้ยาก ส่วนการใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดเฟสรูไทล์ได้มาก เนื่องจากหมู่อัลคิลที่หลงเหลือเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสรูไทล์ได้ง่าย และเมื่อนำผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ (EDX) และการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว (BET) ของแผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดต่างชนิดกันในกระบวนการโซล-เจล มาเปรียบเทียบกันใหม่สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.10

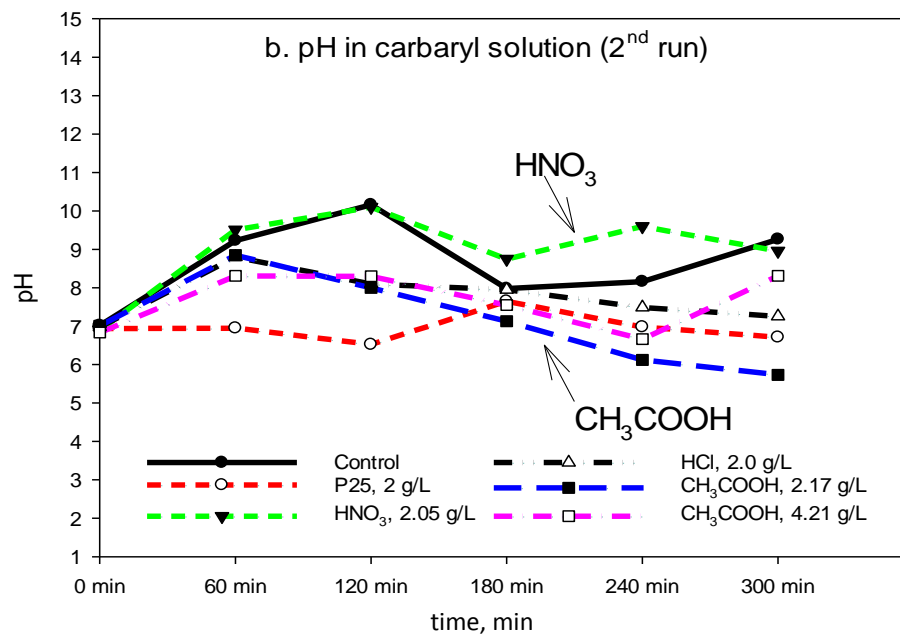
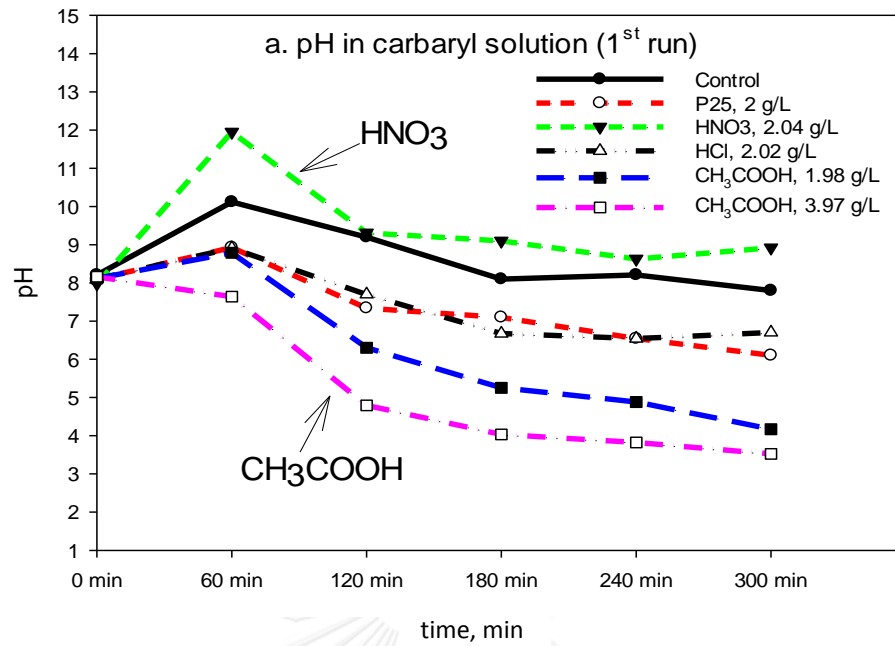
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบ XRD, EDX และ BET จากการใช้กรดแต่ละชนิดในกระบวนการโซล-เจล

ชนิดกรด	อุณหภูมิ calcination (°C)	Anatase peak intensity ค่าเฉลี่ย (ต่ำสุด-สูงสุด)	สัดส่วนของ Ti:Si	ขนาดผลึก Ti (°A) ค่าเฉลี่ย (ต่ำสุด-สูงสุด)	พื้นที่ผิว BET (m <sup>2</sup> /g)	ขนาดรูพรุน (°A)
ไนตริก	470	86 (62-99)	0.7:1	250 (143-396)	6.77	17.0
อะซิติก	460	50 (52-75)	0.4:1	255.3 (201-361)	28.28	19.1
ไฮโดรคลอริก	600	151 (145-162)	0.6:1	170.6 (165-179)	22.53	24.2

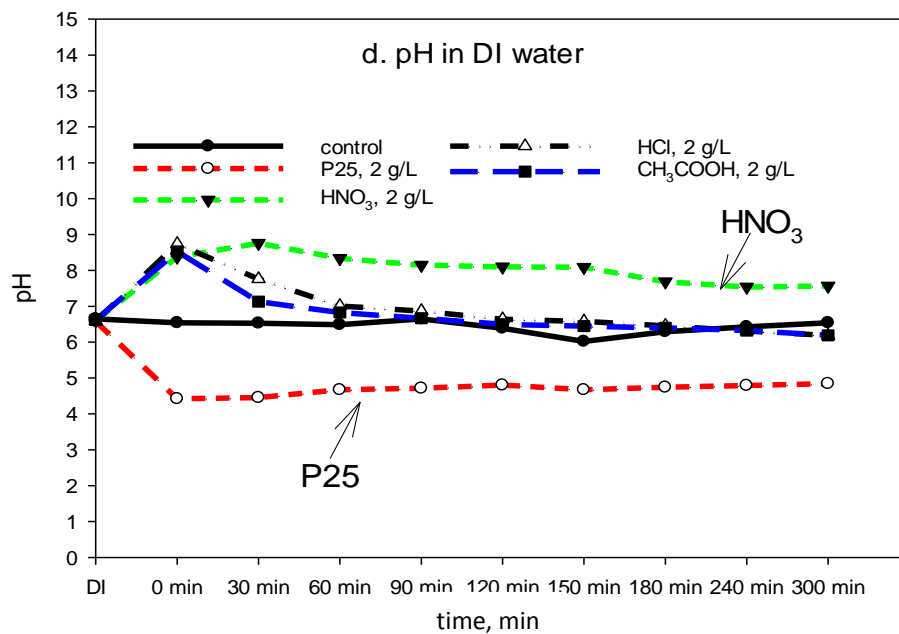
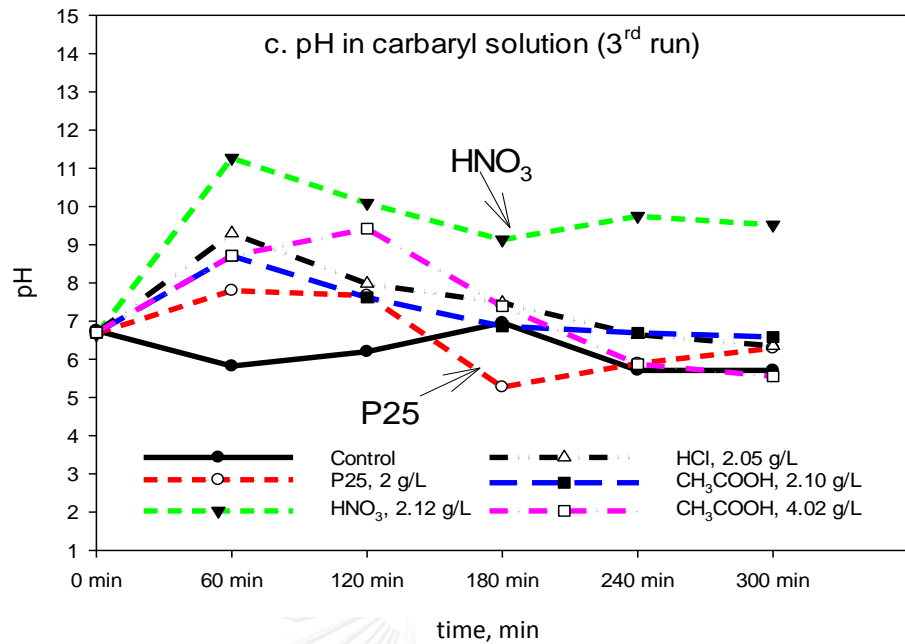
จากตารางที่ 4.10 พบว่าผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไนตริกมี peak intensity ของอะนาเทสอยู่ในช่วง 62-99 และมีขนาดผลึกอะนาเทสเฉลี่ย 250 อังสตรอม ส่วนการใช้กรดไฮโดรคลอริกซึ่งมี peak intensity ของอะนาเทสอยู่ในช่วง 145-162 และมีขนาดผลึกอะนาเทสเฉลี่ย 170.6 อังสตรอม และกรดอะซิติกมี peak intensity น้อยที่สุดอยู่ในช่วง 52-75 แต่ขนาดผลึกของอะนาเทสใหญ่ที่สุด จากการศึกษาของ Suresh และคณะ (1998) ระบุว่ากรดอะซิติกทำให้

โครงสร้างของเจลในกระบวนการโซล-เจลมีความแข็งแรงเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นกึ่ง จึงทำให้เมื่อมีการเผาในขั้นตอนการทำโซล-เจลจะทำให้มีพื้นที่ผิวสูง Hamal และคณะ (2007) ; Ohno และคณะ (2003) กล่าวว่าการศึกษาที่ผลึกอะนาเทสจะช่วยลดช่องว่างในการส่งถ่ายอิเล็กตรอน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้มาก แต่ถ้ามีขนาดที่มากไปก็จะทำให้ช่องว่างในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนน้อยตามไปด้วยการตกกลับของอิเล็กตรอนจะมีโอกาสมากทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดได้น้อยลง จากการตรวจวิเคราะห์จึงสนับสนุนได้ว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกนั้นมีขนาดผลึกอะนาเทสที่น้อยที่สุดจึงน่าจะทำให้การส่งถ่ายอิเล็กตรอนมีช่องว่างสูง ส่วนการใช้กรดอะซิติกนั้นขนาดผลึกอะนาเทสสูงที่สุด ช่องว่างในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนน้อยที่สุด แต่ก็สามารถเกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนได้ง่ายเช่นกัน ในส่วนของพื้นที่ผิวของกรดไนตริกนั้นมีค่าน้อยสุดและมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 17 อังสตรอม ซึ่งขนาดโมเลกุลของคาร์บาริลเท่ากับ 12.1 อังสตรอม (Kiso และคณะ, 2001) ขนาดรูพรุนของกรดไนตริกมีขนาดที่ใกล้เคียงกับโมเลกุลของคาร์บาริลมากที่สุด พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจะสามารถสัมผัสกับคาร์บาริลได้ดีกว่าการใช้กรดชนิดอื่น และสัดส่วนของไทเทเนียมต่อซิลิกอน (แผ่นกรองใยแก้ว) ของกรดไนตริกนั้นมีสัดส่วนของไทเทเนียมสูงที่สุดเช่นเดียวกัน ในขณะที่สัดส่วนของไทเทเนียมต่อซิลิกอนจากการใช้กรดอะซิติกนั้นมีน้อยกว่าที่พบจากการใช้กรดชนิดอื่น รวมถึงค่า peak intensity ของผลึกอะนาเทสนั้นน้อยกว่ากรดชนิดอื่นด้วย จึงน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลในน้ำของแผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติกไม่ได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ในระหว่างการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยแผ่นกรองเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดต่างชนิดกันและผงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มีการตรวจวัดค่าพีเอช ในสารละลายคาร์บาริลทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 300 นาที จำนวน 3 ครั้ง (ภาพที่ 4.26 a, b และ c) และค่าพีเอช ในน้ำกลั่น (ภาพที่ 4.26 d)



ภาพที่ 4.26 ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลและน้ำกลั่นที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล

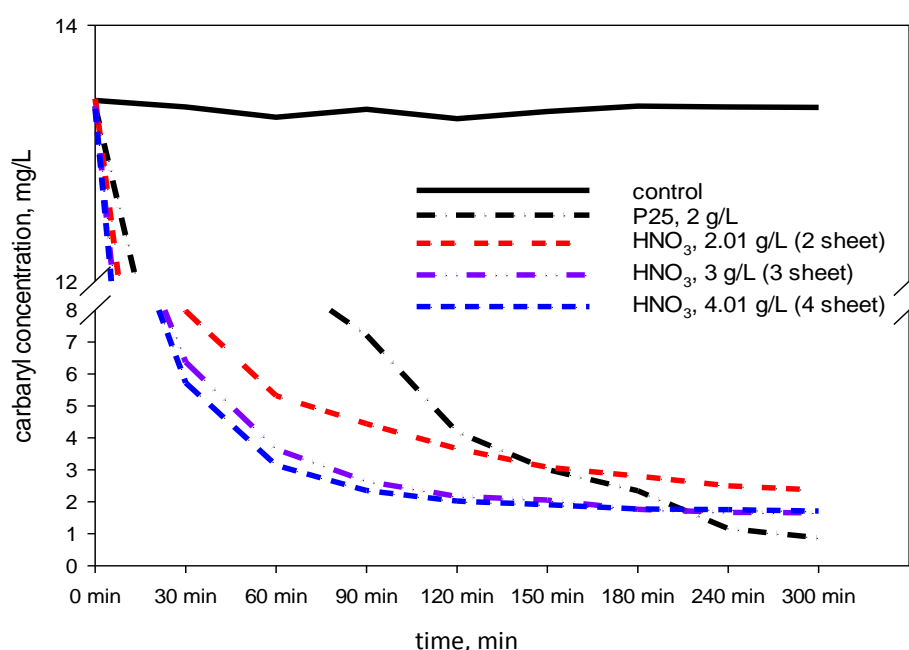


ภาพที่ 4.26 (ต่อ) ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลและน้ำกลั่นที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล

จากภาพที่ 4.26 พบว่าค่าพีเอช ของสารละลายคาร์บาริลเมื่อใช้แผ่นกรองใยแก้วที่ใช้กรดไนตริกในครั้งที่ 1 มีค่า 7.98-11.95 ครั้งที่ 2 มีค่า 6.89-10.1 และครั้งที่ 3 มีค่า 6.65-11.27 ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดทั้ง 3 ครั้ง สอดคล้องกับการทดสอบในน้ำกลั่นที่ให้ค่าพีเอช 6.61- 8.76 ซึ่งมีความเป็นด่าง

มากที่สุดเช่นกัน จึงน่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด เนื่องจากคาร์บาริลมีความคงตัวในน้ำที่เป็นกรดและสลายตัวได้ดีในสภาวะต่าง (Wolfe และคณะ, 1987)

หลังจากที่สรุปได้ว่ากรดไนตริกมีความเหมาะสมมากที่สุดในระบบการโซล-เจลสำหรับการสลายคาร์บาริลในน้ำแล้ว ลำดับต่อไปจึงเป็นการเปรียบเทียบเฉพาะแผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดไนตริกกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเพิ่มจำนวนแผ่นกรองจาก 2 แผ่น เป็น 3 แผ่น และ 4 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ใกล้เคียงกันคือ 0.49-0.51 กรัมต่อแผ่น ใช้ปริมาตรน้ำ 500 มิลลิลิตร ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.27

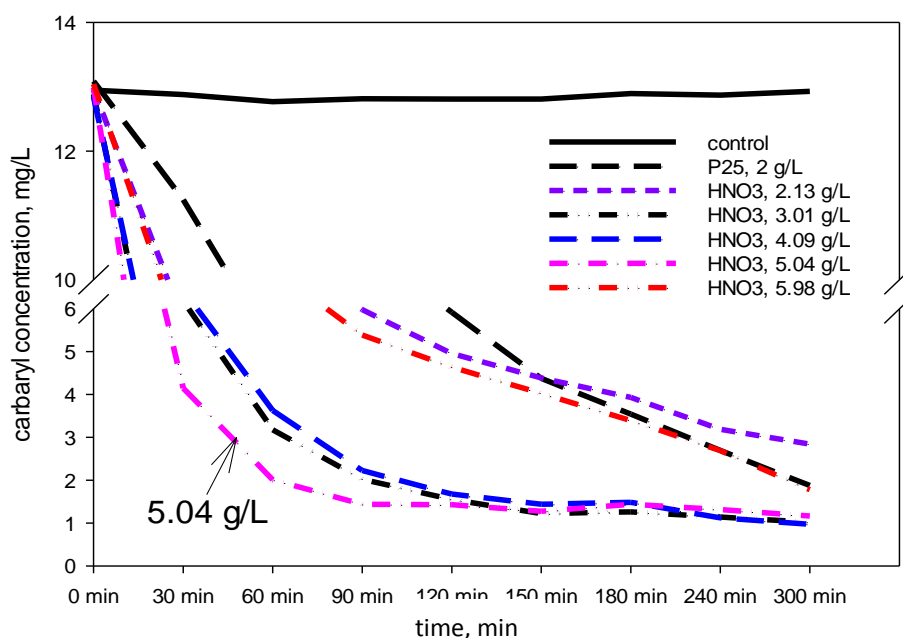


ภาพที่ 4.27 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก (ความเข้มข้น 3.8-3.9 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.27 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก จาก 2 แผ่น (2.01 กรัมต่อลิตร) เป็น 3 แผ่น (3.004 กรัมต่อลิตร) และ 4 แผ่น (4.01 กรัมต่อลิตร) มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วง 180 นาทีแรก ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้ 82.5% ขณะที่การใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลจากกรดไนตริก ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.01, 3.004 และ 4.01 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพ 82.4%, 87.6% และ 87.2% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามหลังจาก 180 นาที เป็นต้นไป



การใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าแผ่นกรองใยแก้วเคลือบ และเนื่องจากการทดลองใช้ปีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิเมตร ทำให้สามารถใส่แผ่นกรองใยแก้วเคลือบได้สูงสุดจำนวน 4 แผ่นเท่านั้น การจะเพิ่มแผ่นกรองใยแก้วให้มากขึ้นจึงทำได้ยาก การทดลองจึงเปลี่ยนรูปแบบเป็นการบดแผ่นกรองใยแก้วให้เป็นผงโดยใช้น้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนแผ่นกรองเคลือบไว้ก่อนที่จะทำการบดและเปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อหาความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการโซล-เจลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการสลายคาร์บาริลในน้ำ และโดยยังคงใช้น้ำตัวอย่างปริมาตร 500 มิลลิเมตร เช่นเดิม น้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเฉลี่ย  $0.5 \pm 0.05$  กรัมต่อแผ่น ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 การสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3.1-3.4 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.28 พบว่าเมื่อนำแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกที่มีน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.065 และ 2.99 กรัม มาบด (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.13 และ 5.98 กรัมต่อลิตร) ให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลที่ใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) มาก ขณะที่การใช้ผงโซล-เจลที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.51, 2.05 และ 2.52 กรัม (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.01, 4.09 และ 5.04 กรัมต่อลิตร) พบว่ามี

ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลได้ดีกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างชัดเจน โดยผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 2.52 กรัม (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.04 กรัมต่อลิตร) ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในช่วง 120 นาทีแรก แต่ประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อครบเวลา 300 นาที มาจากการใช้ผงโซล-เจล 2.05 กรัม (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 4.09 กรัมต่อลิตร) โดยมีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 92.4% รองลงมาคือผงโซล-เจล 1.51 กรัม (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.01 กรัมต่อลิตร) มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 92.1% และผงโซล-เจล 2.52 กรัม (ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.04 กรัมต่อลิตร) มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 91.1% ขณะที่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ให้ประสิทธิภาพ 85.7% ที่เวลา 300 นาที และเมื่อนำน้ำตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความขุ่นสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.11

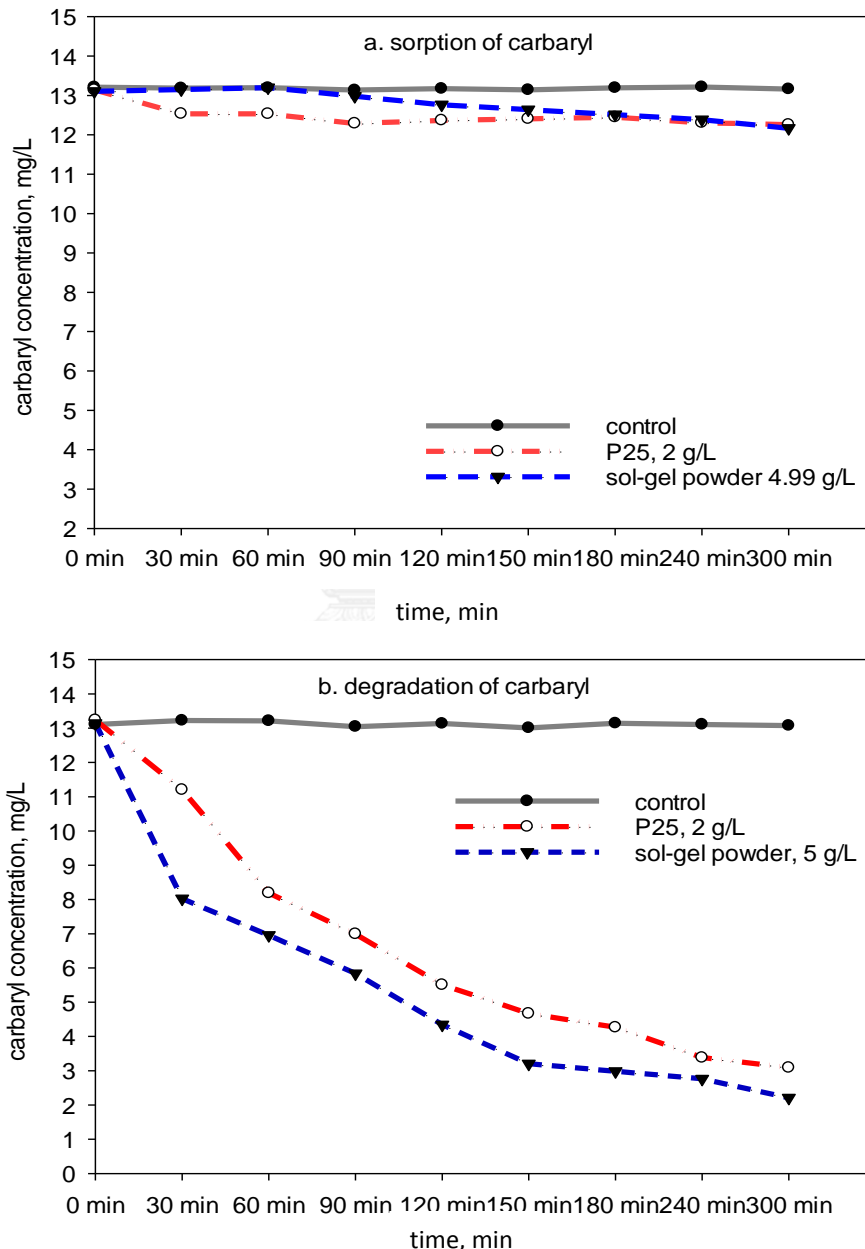
ตารางที่ 4.11 ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่างที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

ไทเทเนียมไดออกไซด์	ค่าความขุ่น (NTU)
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 2.13 กรัมต่อลิตร	1,136±9.6
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 3.01 กรัมต่อลิตร	1,952±9.1
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 4.09 กรัมต่อลิตร	2,056±15.1
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.04 กรัมต่อลิตร	3,425±14.1
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.98 กรัมต่อลิตร	3,911±9.6
ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 2 กรัมต่อลิตร	3,706±7.9

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าความขุ่นของผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.04 กรัมต่อลิตร มีค่า 3,425±14.1 NTU ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความขุ่นเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ 4,000 NTU ประสิทธิภาพของปฏิกิริยานั้นจะเริ่มลดลงจนไปใกล้เคียงกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีความขุ่น 3,706±7.9 NTU

อย่างไรก็ตาม เพื่อทดสอบว่าการสลายของคาร์บาริลในน้ำในภาพที่ 4.28 มาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นหลัก ไม่ได้มาจากการดูดซับคาร์บาริลบนผงโซล-เจล จึงมีการนำปิกเกอร์ที่ใส่ผงโซล-เจลปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.51 กรัม และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในสารละลายคาร์บาริลปริมาตร 500 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 4.99 และ

2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) วางไว้ในตู้มืด เปรียบเทียบกับปีกเกอร์ที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตู้มืด (control) ผลการศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 4.29a พร้อมกับทดสอบการสลายคาร์บาริลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 2 กรัมต่อลิตร และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5 กรัมต่อลิตร อีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.29b



ภาพที่ 4.29 การดูดซับและการสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

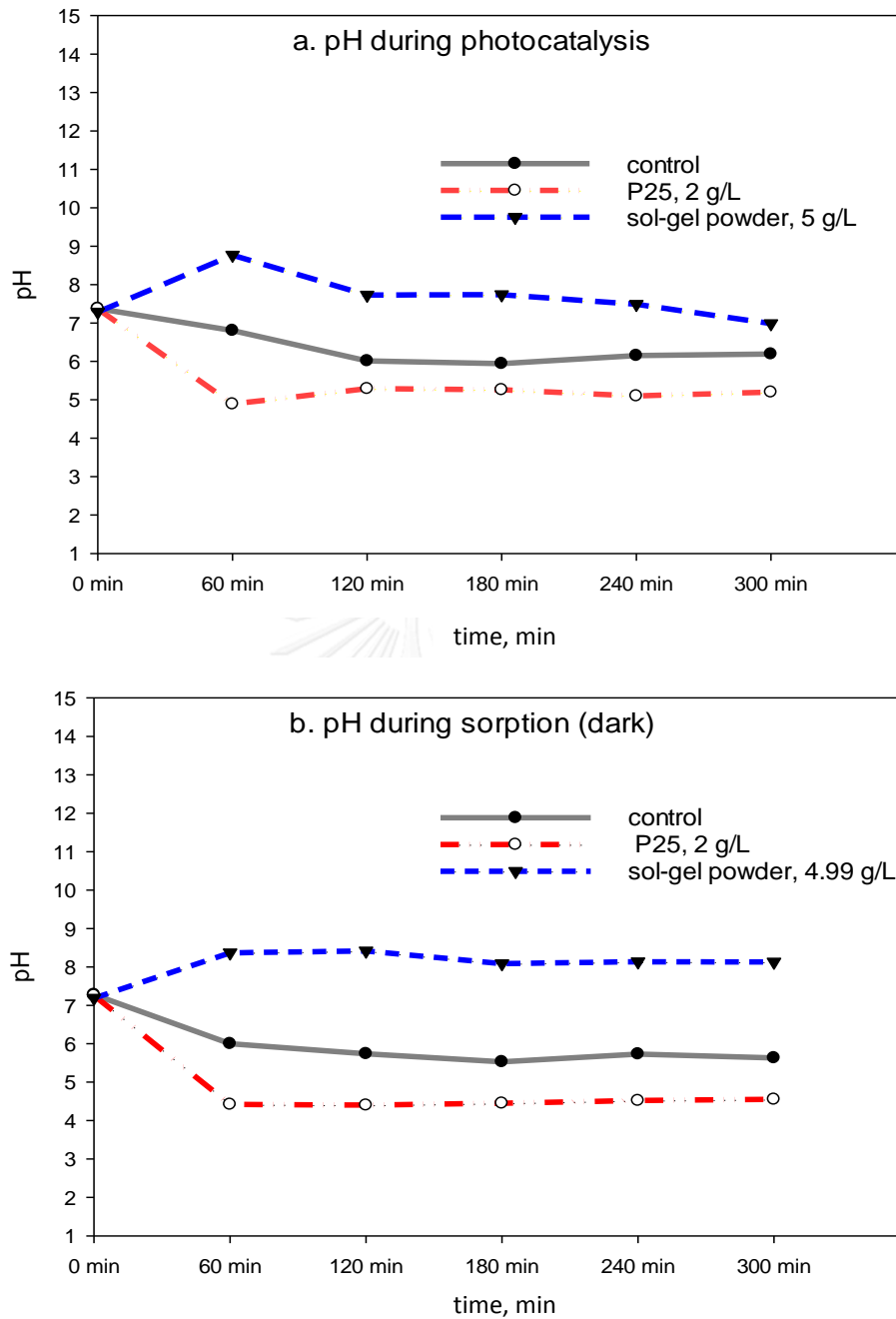
(ความเข้มข้นสียูวีเอ 3.2-3.3 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

จากภาพที่ 4.29a พบว่าความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในตู้ มีลดลงจากปีกเกอร์ทดลองที่มีเฉพาะสารละลายคาร์บาริลในตู้มีด 6.8% ส่วนความเข้มข้นของคาร์บาริลที่ใส่ผงโซล-เจลลดลง 7.5% แต่ปริมาณการดูดซับนั้นจัดว่าน้อยมากไม่ถึง 8% และเมื่อทดสอบการสลายคาร์บาริลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในภาพที่ 4.29b ชัดเจนว่าผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกสามารถสลายคาร์บาริลได้ 83.2% ขณะที่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) สลายได้ 76.6% เมื่อครบเวลา 300 นาที โดยความขุ่นของสารละลายคาร์บาริลที่ใส่ผงโซล-เจล และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) แสดงได้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่างที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

ไทเทเนียมไดออกไซด์	ค่าความขุ่น (NTU)
ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 2 กรัมต่อลิตร	3,808±18.2
ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 4.99 กรัมต่อลิตร	3,503±36.8

ในการศึกษามีการวัดพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทุกๆ 60 นาที สามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 4.30



ภาพที่ 4.30 ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

จากภาพที่ 4.30a จะเห็นได้ว่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่ไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (control) นั้นอยู่ในช่วง 5.94-7.38 ขณะที่พีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) อยู่ในช่วง 4.89-7.37 ส่วนพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก อยู่ในช่วง 6.99-8.77 ส่วนภาพที่ 4.30b ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลในตู้มืดไม่มีผง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (control) นั้นอยู่ในช่วง 5.53-7.28 ขณะที่พีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) อยู่ในช่วง 4.4-7.26 ส่วนพีเอชของสารละลายคาร์บาริลที่มีผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก อยู่ในช่วง 7.19-8.42 ซึ่งการใช้ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกมีความเป็นด่างมากที่สุด สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาความเป็นด่างของสารละลายคาร์บาริลน่าจะเป็นสาเหตุให้เอื้อต่อการสลายตัวของคาร์บาริลได้ดียิ่งขึ้นดังที่กล่าวไปในข้างต้น



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

#### 5.1 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.05 – 10 กรัมต่อลิตร ในการสลายคาร์บาริล ในน้ำภายใต้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ พบว่าความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 95.5% เมื่อครบเวลา 180 นาที รองลงมาคือผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 และ 7 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริล 92.3% และ 91.2% ตามลำดับ โดยการใช้ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 180 นาที มีคาร์บาริลเหลืออยู่  $0.65 \pm 0.18$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น  $11.4 \pm 0.4$  มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 5.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 5.2.1 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริก

การใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส พบว่าเป็นอุณหภูมิที่เกิดผลึกอะนาเทสมากที่สุดและให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลสูงที่สุดเมื่อมีน้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรอง 0.53-0.54 กรัมต่อแผ่น ในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร จึงเทียบเท่ากับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $2.65 \pm 0.027$  กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลในน้ำได้ 81.1-84.7% (ใช้แผ่นกรองเคลือบ 1 แผ่น) เมื่อครบเวลา 300 นาที พบว่ามีคาร์บาริลเหลืออยู่  $1.9 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นคาร์บาริลเริ่มต้น  $10.7 \pm 2.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นกรองเคลือบเป็น 3 แผ่น มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด 1.502 กรัม (ความเข้มข้น 3.004 กรัมต่อลิตร) พบว่าสามารถสลายคาร์บาริลได้สูงสุด 87.6% โดยเมื่อครบเวลา 300 นาที มีคาร์บาริลคงเหลือ 1.65 มิลลิกรัมต่อลิตร จากคาร์บาริลเริ่มต้น 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่หากใช้ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกแทนแผ่นกรองเคลือบ พบว่าผงโซล-เจลที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.52 กรัมต่อตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร (5.05 กรัมต่อลิตร) เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไวกว่าความเข้มข้นอื่นๆ อย่างชัดเจนในช่วงเวลา 0-120 นาที แต่เมื่อครบ 300 นาทีพบว่าโซล-เจล 4.09 กรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด 92.4% ทำให้มีความเข้มข้นของคาร์บาริลคงเหลือ 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น 12.84 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 5.2.2 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดอะซิติก

การใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส พบว่าก่อให้เกิดผลึกอะนาเทสมากที่สุด โดยน้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.07-1.2 กรัมต่อแผ่น สามารถสลายคาร์บาริลได้สูงที่สุด ในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร จึงเทียบเท่ากับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $5.78 \pm 0.37$  กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้ 88.2% เมื่อครบเวลา 300 นาที มีคาร์บาริลเหลืออยู่  $1.56 \pm 0.3$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น  $13.2 \pm 0.04$  มิลลิกรัมต่อลิตร

### 5.2.3 แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก

การใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่ามีความเหมาะสมที่สุดในการสลายคาร์บาริลในน้ำ โดยน้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์  $0.51 \pm 0.005$  กรัมต่อแผ่น สามารถสลายคาร์บาริลได้มากที่สุด ในการศึกษาใช้ปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร จึงเทียบเท่ากับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ  $2.56 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร สามารถสลายคาร์บาริลได้ 73.9% เมื่อครบเวลา 300 นาที มีคาร์บาริลเหลืออยู่  $3.05 \pm 0.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นเริ่มต้น  $11.9 \pm 2.1$  มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลเรียงจากมากไปน้อยคือ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร (100%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดไนตริก  $2.07 \pm 0.004$  กรัมต่อลิตร (86.9%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติก  $4.14 \pm 0.14$  กรัมต่อลิตร (76.4%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดอะซิติก  $2.08 \pm 0.1$  กรัมต่อลิตร (67.1%) > แผ่นกรองเคลือบที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก  $2.02 \pm 0.02$  กรัมต่อลิตร (61.9%) แต่หากเปรียบเทียบระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) กับผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก พบว่าประสิทธิภาพในการสลายคาร์บาริลเมื่อครบเวลา 300 นาที เรียงจากมากไปน้อยคือ ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 4.09 กรัมต่อลิตร (92.4%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 3.01 กรัมต่อลิตร (92.1%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.04 กรัมต่อลิตร (91.1%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 5.98 กรัมต่อลิตร (86.4%) > ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร (85.7%) > ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 2.13 กรัมต่อลิตร (78.1%)



### 5.3 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว (BET)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรวมของการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริก แล้วเผาที่อุณหภูมิ 470, 460 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิการเผาที่สามารถสลายคาร์บอนได้ดีที่สุดของแต่ละกรด พบว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 7.26, 11.66 และ 11.15 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยกรดอะซิติกมีพื้นที่ผิวมากที่สุด รองลงมาคือกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บอนที่ดีที่สุดนั้นมาจากการใช้กรดไนตริก แสดงว่าการมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากเพียงอย่างเดียวไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพในการสลายคาร์บอนสูงที่สุดได้

### 5.4 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จากการใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจลแล้วเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ครั้ง พบว่ามีค่า peak intensity ของผลึกอะนาเทส (Anatase) เท่ากับ 97, 62 และ 99 และขนาดผลึกอะนาเทสมีค่าเท่ากับ 396, 143 และ 211 อังสตรอม ตามลำดับ ส่วนการใช้กรดอะซิติกแล้วเผาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ครั้งมีค่า peak intensity ของผลึกอะนาเทสเท่ากับ 52, 75 และ 65 และขนาดผลึกอะนาเทสมีค่าเท่ากับ 361, 204 และ 201 อังสตรอม ตามลำดับ และการใช้กรดไฮโดรคลอริกแล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ครั้ง มีค่า peak intensity ของผลึกอะนาเทสเท่ากับ 162, 145 และ 147 และขนาดผลึกอะนาเทสมีค่าเท่ากับ 169, 164 และ 179 อังสตรอม ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจลก่อให้เกิดผลึกอะนาเทสที่มีขนาดใหญ่มากที่สุด รองลงมาคือการใช้กรดไนตริก และกรดอะซิติก ตามลำดับ

### 5.5 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ (EDX)

แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนของไทเทเนียม 25.2% น้ำหนักต่อน้ำหนัก ขณะที่การใช้กรดอะซิติกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนของไทเทเนียม 17.5% น้ำหนักต่อน้ำหนัก และการใช้กรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนของไทเทเนียม 20.4% น้ำหนักต่อน้ำหนัก ซึ่งค่าสัดส่วน

ไทเทเนียมจากการใช้กรดไนตริกมีมากที่สุด รองลงมาคือจากการใช้กรดไฮโดรคลอริก และกรดอะซิติกตามลำดับ

### 5.6 การดูดซับคาร์บาริลในที่มืด และอิทธิพลของแสงในห้องปฏิบัติการ (visible light)

การดูดซับคาร์บาริลโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก มีผลให้คาร์บาริลในน้ำลดลง 3.8-7.8% ส่วนการมีแสงวิซิเบิลภายในห้องทดลองมีผลในการสลายสารคาร์บาริลน้อยมากโดยความแตกต่างระหว่างบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตู้มืดและบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบภายใต้แสงวิซิเบิลต่างกัน 0.8-2.1% ส่วนการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดอะซิติกพบว่า การดูดซับส่งผลให้มีการลดลงของคาร์บาริล 5-7.4% และความแตกต่างระหว่างบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตู้มืดและบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบภายใต้แสงวิซิเบิลมีความแตกต่างเพียง 0.8-2.8% ขณะที่การใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก พบว่าการดูดซับคาร์บาริลอยู่ในช่วง 2.6-8.5% และความแตกต่างระหว่างบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองเคลือบในตู้มืดและบีกเกอร์ที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบภายใต้แสงวิซิเบิลอยู่ในช่วง 0.4-1.8% ส่วนการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตรและการใช้ผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก 4.99 กรัมต่อลิตร พบว่าการดูดซับคาร์บาริลมีค่าเท่ากับ 6.8% และ 7.5% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าแสงวิซิเบิลและการดูดซับของแผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่ใช้กรดไนตริก กรดอะซิติก และกรดไฮโดรคลอริกในกระบวนการโซล-เจล และผงโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกมีผลต่อการลดลงของคาร์บาริลที่น้อยมากไม่เกิน 10%

### 5.7 พิเอชน้ำ

ค่าพีเอชของสารละลายคาร์บาริลในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกอยู่ในช่วง 8.63-11.95 ส่วนการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดอะซิติกให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3.52-9.42 และแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกให้ค่าพีเอช อยู่ในช่วง 6.35-9.3 ขณะที่สารละลายคาร์บาริลที่ไม่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบมีพีเอช 5.71-10.12 โดยสารละลายคาร์บาริลที่มีแผ่นกรองใยแก้วเคลือบที่ใช้กรดไนตริกให้ค่าพีเอชที่เป็นต่างมากที่สุด และเมื่อนำแผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลแช่ในน้ำกลั่นภายใต้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์นาน 300 นาที พบว่าการใช้แผ่นกรองเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกทำให้น้ำกลั่นมีพีเอชอยู่ในช่วง 7.54-8.76 ส่วนการใช้แผ่นกรองเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดอะซิติกทำให้น้ำกลั่นมีพีเอชอยู่ในช่วง 6.19-8.53 และการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกมีค่า

พีเอชอยู่ในช่วง 6.18-8.74 แสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริกทำให้ตัวกลางมีความเป็นด่างมากที่สุด โดยคาร์บาริลมีความคงตัวในสภาวะกรดและสามารถสลายตัวได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง จึงอาจจะเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้การใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบของกรดไนตริกสามารถสลายคาร์บาริลได้ดีที่สุด

## 5.8 การนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment หรือ Tertiary Treatment) เป็นลักษณะการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองใยแก้วด้วยกระบวนการโซล-เจล แล้วนำลงไปวางในน้ำที่จะบำบัด โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบน้ำนิ่งหรือน้ำไหลได้โดยการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นกรองใยแก้ว และอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อยอดในแง่ของการนำเส้นใยกลับมาใช้ซ้ำ เนื่องจากแผ่นกรองใยแก้วมีลักษณะคล้ายกระดาษซึ่งสามารถวางเรียงกันได้น้ำเป็นช่องๆ (คล้ายตารางหมากรุก) ซึ่งจะทำให้สารที่ต้องการสลายสัมผัสกับแผ่นกรองใยแก้วให้ได้มากที่สุด และวางหลอดไฟยูวีเอไว้ใต้แหล่งน้ำเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งจะสามารถสลายคาร์บาริลในแหล่งน้ำได้ หรือใช้ในการสลายยาฆ่าแมลงอื่นๆ ที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกันกับคาร์บาริล

## รายการอ้างอิง

- Alhakimi, G., Studnicki, L. H., and Al-Ghazali, M. 2003. Photocatalytic destruction of potassium hydrogen phthalate using  $\text{TiO}_2$  and sunlight: application for the treatment of industrial wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 154(2-3): 219-228.
- Atiqur Rahman, A., and Muneer, M. 2005. Photocatalysed degradation of two selected pesticide derivatives, dichlorvos and phosphamidon, in aqueous suspensions of titanium dioxide. *Desalination*. 181: 161-172.
- Brinker, C. J., and Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. London: Academic Press Limited.
- Carla Garcia, J., and Takashima, K. 2003. Photocatalytic degradation of imazaquin in an aqueous suspension of titanium dioxide. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 155: 215-222.
- Chen, J. Q., Wang, D., Zhu, M. X., and Gao, C. J. 2007. Photocatalytic degradation of dimethoate using nanosized  $\text{TiO}_2$  powder. *Desalination*. 207: 87-94.
- Clemens, P., Wei, X., Wilson, B. L., and Thomas, R. L. 2013. Anatase Titanium Dioxide Coated Single Wall Carbon Nanotubes Manufactured by Sonochemical-Hydrothermal Technique *Journal of Composite Materials*. 3: 21-32.
- Danish, L. (2014). *Photocatalyst Mosquito Trap Principle*. [online]. Available from: <http://www.supesolar.com/mosquito-fly-trap/photocatalyst-mosquito-trap-principle.htm>.
- El Yadini, A., Marouane, B., Ahmido, A., Dunlop, P., Anthony Byrne, J., EL Azzouzi, M., and EL Hajjaji, S. 2013. Photolysis and photodegradation of Fenamiphos insecticide by using slurry and supported  $\text{TiO}_2$ . *Journal of Materials and Environmental Science*. 4(6): 973-980.
- Environmental Protection Agency. (2012). *National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria Table*. [online]. Available from: <http://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table>

- Extension Toxicology Network. (1992). *hafe life carbaryl* [online]. Available from: <http://pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/carbaryl-dicrotophos/carbaryl-ext.html>.
- Fujishima, A., Rao, T. N., and Tryk, D. A. 2000. Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 1(1): 1-21.
- Fujishima, A., and Zhang, X. 2006. Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. *Comptes Rendus Chimie*. 9(5-6): 750-760.
- Gelover, S., Mondragón, P., and Jiménez, A. 2004. Titanium dioxide sol-gel deposited over glass and its application as a photocatalyst for water decontamination. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 165(1-3): 241-246.
- Gilbert, S. (2014). *Carbaryl*. [online]. Available from: <http://www.toxipedia.org/display/toxipedia/Carbaryl>.
- Hamal, D. B., and Klabunde, K. J. 2007. Synthesis, characterization, and visible light activity of new nanoparticle photocatalysts based on silver, carbon, and sulfur-doped TiO<sub>2</sub>. *Journal of Colloid and Interface Science*. 311(2): 514-522.
- Haxim Power Inc. (2005). *Photocatalys*. [online]. Available from: <http://haximpower.com/incphp?inc>
- Herrmann, J.-M. 1991. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today* 53: 115-129.
- Jauhar, L., and Kulshrestha, S. K. 1985. Histopathological Effects Induced by Sublethal Doses of Sevin and Thiodan on the Gills of *Channa striatus* BL. . *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* 13: 395-400.
- Kim, D. J., Hahn, S. H., Oh, S. H., and Kim, E. J. 2002. Influence of calcination temperature on structural and optical properties of TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel dip coating. *Materials Letters*. 57(2): 355-360.
- Kiso, Y., Sugiura, Y., Kitao, T., and Nishimura, K. 2001. Effects of hydrophobicity and molecular size on rejection of aromatic pesticides with nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*. 192(1): 1-10.
- Konstantinou, I. K., Sakkas, V. A., and Albanis, T. A. 2001. Photocatalytic degradation of the herbicides propanil and molinate over aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions:

- identification of intermediates and the reaction pathway. *Applied Catalysis B: Environmental*. 34(3): 227-239.
- Kulshrestha, S. K., and Arora, N. 1984. Effect of sublethal doses of carbaryl and endosulfan on the skin of *Channa striatus* Bl. *Journal Environmental Biology*. 5: 141-147.
- Kung, H. H., and E.I., K. 1996. Preparation of oxide catalysts and catalyst supports a review of recent advances. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. 64: 203-214.
- Lawrence Livermore National Laboratory. (2014). *A mastery of solgel chemistry*. [online]. Available from: <https://str.llnl.gov/str/May05/Satcher.html>.
- Linsebigler, A. L., Lu, G., and Yates, J. T. 1995. Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Review*. 95: 735-758.
- Marie Herrmann, J., Chantal, G., Arguello, M., Agüera, A., Tejedor, A., Piedra, L., and Fernández-Alba, A. 1999. Photocatalytic degradation of pesticide pirimiphos-methyl: Determination of the reaction pathway and identification of intermediate products by various analytical methods. *Catalysis Today*. 54(2-3): 353-367.
- Matsumura, F. (1976). *Toxicology of Insecticides*. New York Plenum Press Publisher.
- Max Planck Institute of Colloids and Interfaces. (2014). *Sol-gel chemistry of carbon*. [online]. Available from: [http://www.mpikg.mpg.de/1571937/Sol-gel\\_chemistry\\_of\\_carbon](http://www.mpikg.mpg.de/1571937/Sol-gel_chemistry_of_carbon).
- Ohno, T., Tokieda, K., Higashida, S., and Matsumura, M. 2003. Synergism between rutile and anatase TiO<sub>2</sub> particles in photocatalytic oxidation of naphthalene. *Applied Catalysis A: General*. 244(2): 383-391.
- Pal Toor, A., Verma, A., Jotshi, C. K., Bajpai, P. K., and Singh, V. 2006. Photocatalytic degradation of Direct Yellow 12 dye using UV/TiO<sub>2</sub> in a shallow pond slurry reactor. *Dyes and Pigments*. 62: 53-60.

- Paris, D. F., Lewis, D. L., Barnett, J. T., and Baughman. (1987). *Microbial degradation and accumulation of pesticides in aquatic systems*. New York A Wiley-Interscience Publication.
- Pelizzetti, E., Pramauro, E., Minero, C., and Serpone, N. 1990. Sunlight photocatalytic degradation of organic pollutants in aquatic systems. *Waste Management*. 10(1): 65-71.
- plasmachem. (2017). *TiO<sub>2</sub> - Nanoparticles, type P25*. [online]. Available from: <http://www.plasmachem.com/shop/en/-type-p25/283-pl-tio-p25.html>.
- Riedel, R. (2004). *Handbook of Ceramic Hard Material*. Weinheim: Wiley-VCH.
- San, N., Hatipoglu, A., Kocturk, G., and Cinar, Z. 2001. Prediction of primary intermediates and the photodegradation kinetics of 3-aminophenol in aqueous TiO<sub>2</sub> suspensions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 139: 225-232.
- Sanders, H. O., and Cope, O. B. 1966. Toxicities of several pesticides to two species of Cladocerans. *Transactions of the American Fisheries Society*. 95: 165-169.
- Saqib, M., and Muneer, M. 2002. Semiconductor mediated photocatalysed degradation of an anthraquinone dye, Remazol Brilliant Blue R, under sunlight and artificial irradiation source. *Dyes Pigments*. 53: 237-249.
- Sayilkan, F., Asilturk, M., Sayilkan, H., Onal, Y., Akarsu, M., and Arpac, E. 2005. Characterization of TiO<sub>2</sub> Synthesized in Alcohol by a Sol-Gel Process: The Effects of Annealing Temperature and Acid Catalyst. *Turkish Journal of Chemistry*. 29: 697-706.
- Shankar, M. V., Cheralathan, K. K., Arabindoo, B., Palanichamy, M., and Murugesu, V. 2004. Enhanced photocatalytic activity for the destruction of monocrotophos pesticide by TiO<sub>2</sub>/H $\beta$ . *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 223: 195-200.
- SpecialChem. (2014). *Carbendazim*. [online]. Available from: <http://www.specialchem4coatings.com/tc/tio2/?id=hiding+power>.
- Suresh, C., Biju, V., Mukundan, P., and Warriar, K. G. K. 1998. Anatase to rutile transformation in sol-gel titania by modification of precursor. *Polyhedron*. 17: 3131-3135.

- Tamimi, M., Qourzal, S., Assabbane, A., Chovelon, J.-M., Ferronato, C., and Ait-Ichou, Y. 2006. Photocatalytic degradation of pesticide methomyl: determination of the reaction pathway and identification of intermediate products. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 5: 477–482.
- Ubonchonlakate, K., Sikong, L., and Saito, F. 2012. Photocatalytic disinfection of P.aeruginosa bacterial Ag-doped TiO<sub>2</sub> film. *Procedia Engineering*. 32: 656 – 662.
- Windholz, M., Budavari, S., Blumetti, R. F., and Otterbein, E. S. (1983). *The Merck index*. 10th ed.
- Wold, A. 1993. Photocatalytic Properties of TiO<sub>2</sub>. *Chemistry of Materials*. 5: 280-283.
- Wolfe, N. L., Zepp, R. G., and Paris, D. F. 1987. Carbaryl, propham and chloroprotham : A comparison of the rates of hydrolysis and photolysis with the rate of biolysis. *Water Research* 12: 565-571.
- World Health Organization. (1986). *CARBAMATE PESTICIDES: A GENERAL INTRODUCTION*. [online]. Available from: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc64.html>.
- Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X., and Lu, L. 2002. Rapid synthesis of nanocrystalline TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange. *Journal of Solid State Chemistry*. 165: 193-198.
- Yu, G., Zhao, K., Du, K., and Chen, W. 1999. Preparation, microstructure and photocatalytic activity of the porous TiO<sub>2</sub> anatase coating by sol-gel processing. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 17: 163–171.
- กรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย. (2557). รังสีอัลตราไวโอเล็ต. [online]. Available from: <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.html>.
- กรรณิการ์ จิ่งสุวัฒน์นนท์. 2548. การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลเจลเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2559). ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช. [online]. Available from: [http://www.oae.go.th/ewt\\_news.php?nid=146](http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=146).
- กระทรวงสาธารณสุข. (2557). ข้อมูลการประกอบอาชีพเกษตรกรรมในประเทศไทย. [online]. Available from: <http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/210>.



กรีนเนท. (2559). พืชภัยสารเคมีเกษตร. [online]. Available from:

<http://www.greennet.or.th/article/263>.

ฐาปนันท์ พุทธธา. 2549. การกำจัดพินอลที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบโดยใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นงนุช อ่องสุวรรณ. 2530. อิทธิพลของคาร์บาริลต่อปลาช่อน : ความเป็นพิษเฉียบพลันและการยอมรับการติดเชื้อ *Aeromonas hydrophila*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุษบากร คงเรือง. 2553. การพัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผัก. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประยูร ดีมา. (2522). วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเกษตรและสาธารณสุข. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปรีชา ฉัตรสันติประภา, บังอร ธารพล, and พงศ์ศรี ไบอดุลย์. (2548). ศึกษาการแพร่กระจายของ วัตถุประสงค์ในการเกษตรในแม่น้ำท่าจีน ใน ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2548 (pp. 188-201). กรุงเทพมหานคร.

ปิยะรัตน์ จันทร์ศิริพรชัย , and นิวัตร จันทร์ศิริพรชัย (2551). ค่าการทำงานของเอนไซม์โกลบินเอสเทอเรสในซีรัมและพยาธิสภาพของตับในไก่ไข่ที่สัมผัสคาร์บาริลในขนาดที่ใช้รักษาโรคปรสิตภายนอก (pp. 4). กรุงเทพมหานคร.

ผกาสินี คล้ายมาลา, ปรีชา ฉัตรสันติประภา, and พงศ์ศรี ไบอดุลย์. (2549). การสำรวจสารพิษตกค้างในแม่น้ำบางปะกง ใน ผลการปฏิบัติงานประจำปีงบประมาณ 2549 (pp. 141-154). กรุงเทพมหานคร.

พรพิมล เจริญสง. 2538. ปริมาณสารตกค้างคาร์บาริลและคลอร์ไพริฟอสในดิน น้ำและตะกอนบริเวณสนามกอล์ฟแหลมฉะเชิงเทราเนชันแนล คันทรีคลับ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาณุมาศ นาคเจือทอง. 2554. การกำจัดสารพิษตกค้างคาร์เบนดาซิมในผลผลิตทางการเกษตรด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โอโซน และโฟโตคะตะไลซิสร่วมกับโอโซน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ราชัน เลิศพยัคฆ์รัตน์. 2554. การเตรียมและการตรวจสอบลักษณะแผ่นฟิล์มบางของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริพันธ์ สุขมาก. (2540). สารพิษตกค้างในผลิตผลการเกษตร 2. ใน การประชุมวิชาการกองวัตถุประสงค์การเกษตร ประจำปี 2540 (pp. 9-22). กรุงเทพมหานคร.

สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ. (2530). เกณฑ์คุณภาพน้ำเพื่อการคุ้มครองทรัพยากรสัตว์น้ำจืด (Vol. 75, pp. 38). กรุงเทพมหานคร.

สยามเคมี. (2558). ไททาเนียมไดออกไซด์. [online]. Available from:

<http://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์/>.

อนรรฆพันธ์ คำตัน. 2552. ผลของลักษณะที่แตกต่างกันของสภาพผลึกไทเทเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีโซล-เจลต่อปริมาณการสร้างไฟบริน: การศึกษาเปรียบเทียบในห้องปฏิบัติการ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อิสรพงษ์ เชื้อสันเทียะ, สิริณ คุณเพิ่มศิริ, and สายัณห์ ผุดวัฒน์. 2555. การคำนวณสมบัติทางแสงอย่างง่ายของฟิล์มไททาเนียที่เตรียมโดยเทคนิคโซลเจล ในระบบฟิล์มไททาเนีย-กระจก-ไทนาเนีย. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.





ภาคผนวก

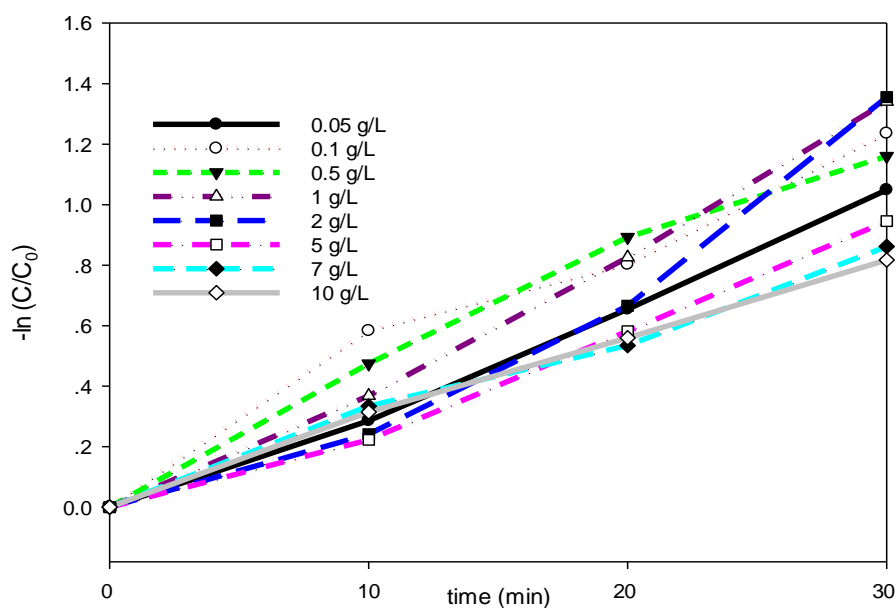
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก การคำนวณอัตราการสลายตัวของคาร์บาริลโดยวิธีการจลนพลศาสตร์



### การคำนวณอัตราการสลายตัวของคาร์บาริลโดยวิธีการจลนพลศาสตร์ (kinetics)

การสลายตัวของคาร์บาริลในน้ำจากการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05-10 กรัม ต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร โดยใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาใดๆ ต่อกับความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาเริ่มต้น ( $-\ln(C/C_0)$ ) กับ ระยะเวลา (t) พบว่าเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order Reaction) ดังแสดงในภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 จลนพลศาสตร์ทางเคมีเมื่อใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน

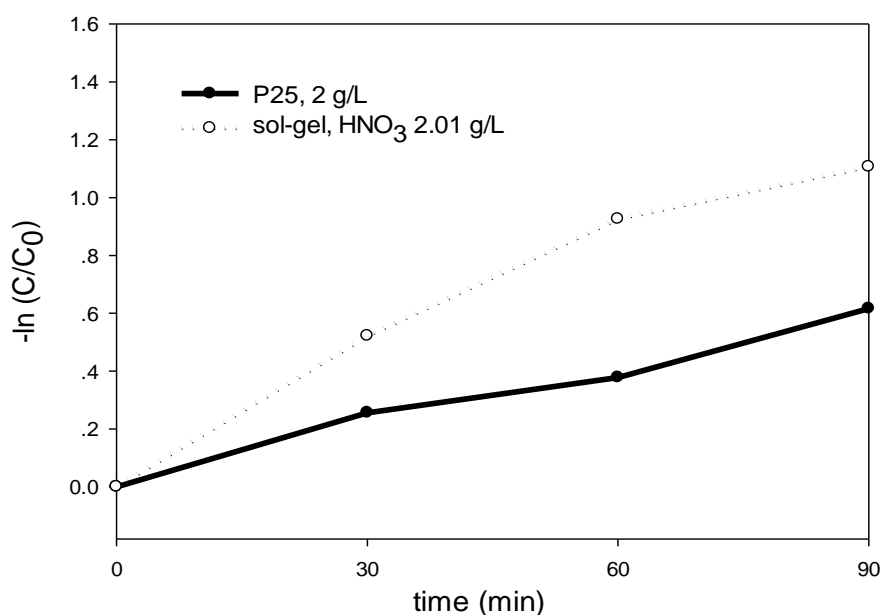
จากภาพที่ ก.1 สามารถสรุปค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $R^2$ ) และค่าความชัน (k) หรือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (rate constant) ได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 สัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน

Titanium dioxide (g/L)	Rate constant ( $\text{min}^{-1}$ )	Linear regression ( $R^2$ )
0.05	0.3515	0.9950
0.1	0.3927	0.9720
0.5	0.3900	0.9856
1	0.4479	0.9947
2	0.4492	0.9523
5	0.3196	0.9887
7	0.2786	0.9913
10	0.2697	0.9969

จากตารางที่ ก.1 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร มีค่า 0.4492 นาที<sup>-1</sup> ซึ่งมากกว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นอื่น

แต่เมื่อนำค่าการสลายตัวของคาร์บาริลในน้ำมาเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณความเข้มข้น 2 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร ที่มีประสิทธิภาพการสลายคาร์บาริลที่ดีที่สุด เปรียบเทียบกับการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบโซล-เจลจากการใช้กรดไนตริกที่มีน้ำหนักไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.53-0.54 กรัมต่อแผ่นซึ่งเป็นน้ำหนักที่มีประสิทธิภาพที่สลายคาร์บาริลได้ดีที่สุด จำนวน 2 แผ่น มีปริมาณความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.01 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร มาเปรียบเทียบ โดยใช้แสงจากหลอดไฟแบล็คไลท์ในรูปของความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาใดๆ ต่อดัชนีความเข้มข้นของคาร์บาริลที่เวลาเริ่มต้น ( $-\ln(C/C_0)$ ) กับ ระยะเวลา (t) พบว่าเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order Reaction) ดังแสดงในภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก.2 เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ทางเคมีของผงไทเทเนียมไดออกไซด์กับโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

จากภาพที่ ก.2 สามารถสรุปค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $R^2$ ) และค่าความชัน ( $k$ ) หรือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (rate constant) ได้ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของผงไทเทเนียมไดออกไซด์กับโซล-เจลที่ใช้กรดไนตริก

Titanium dioxide	Rate constant ( $\text{min}^{-1}$ )	Linear regression ( $R^2$ )
P25, 2 g/L	0.1971	0.9839
sol-gel HNO <sub>3</sub> , 2.01 g/L	0.3724	0.9591

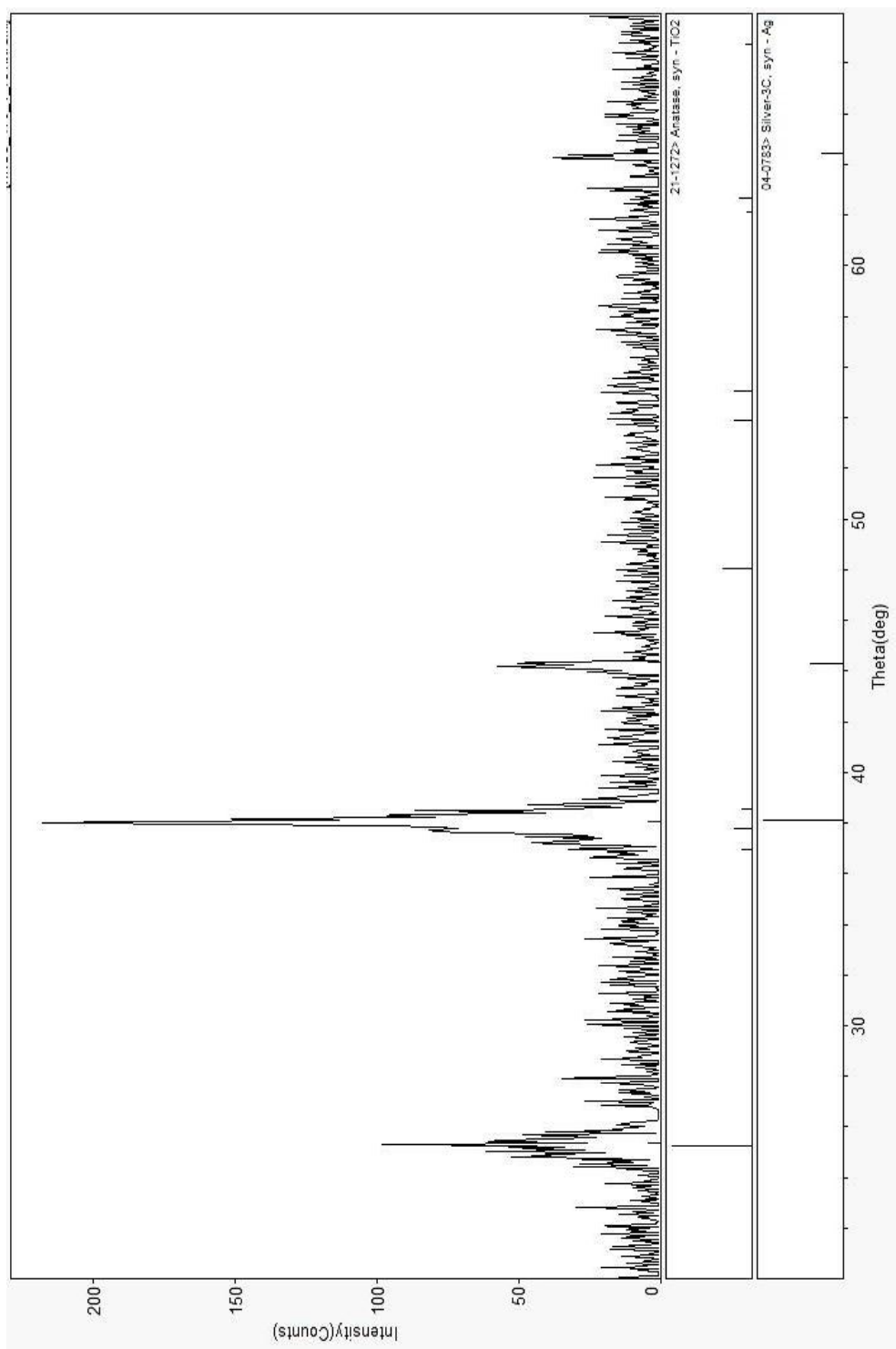
จากตารางที่ ก.2 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเวลา 0-90 นาที จากการใช้โซล-เจลของกรดไนตริกที่ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.01 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร มีค่า 0.3724 นาที<sup>-1</sup> ซึ่งมากกว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 2 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล-เจลจากกรดไนตริกนั้น มีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมากกว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร

ข รูปแบบการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

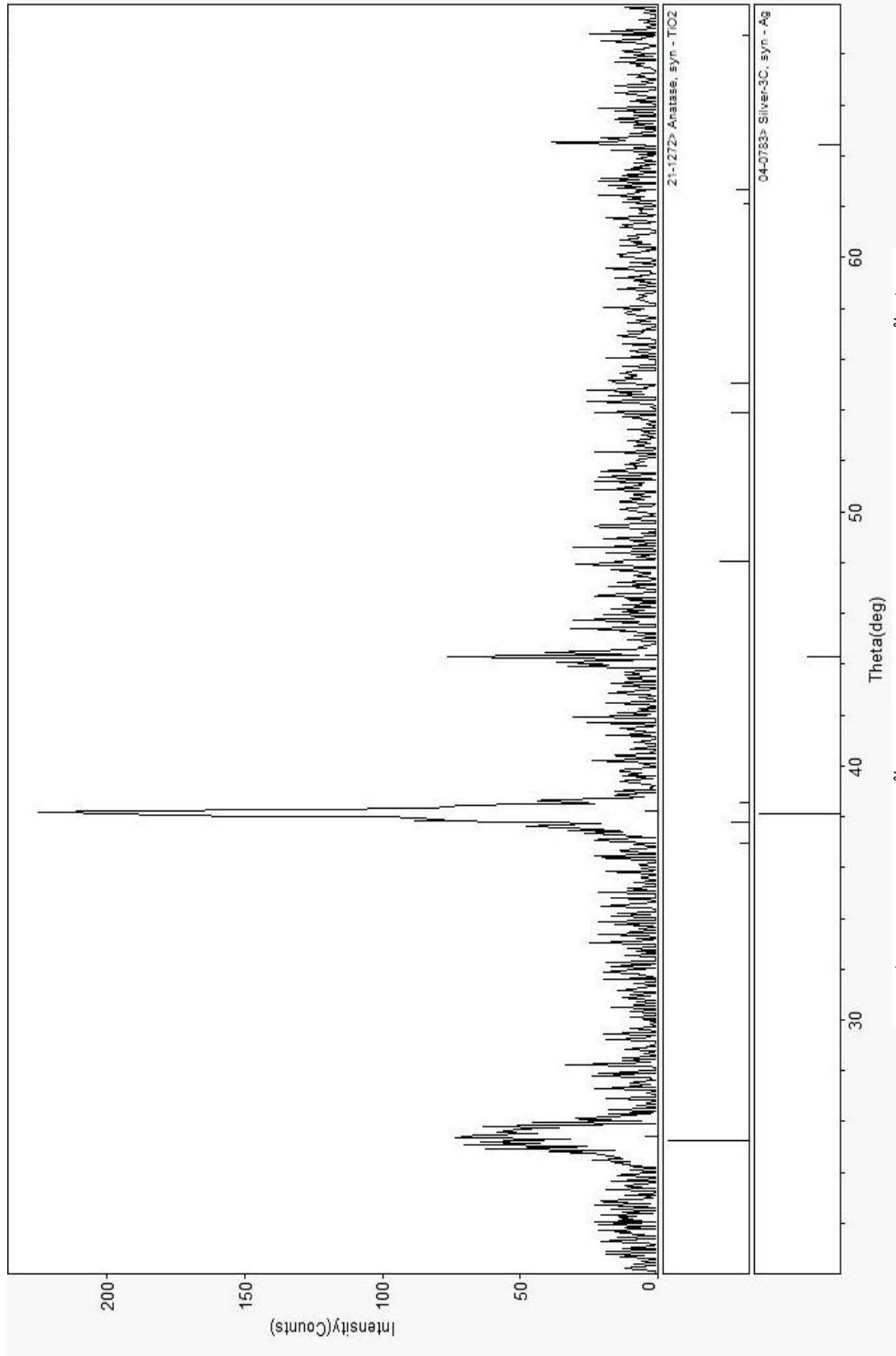




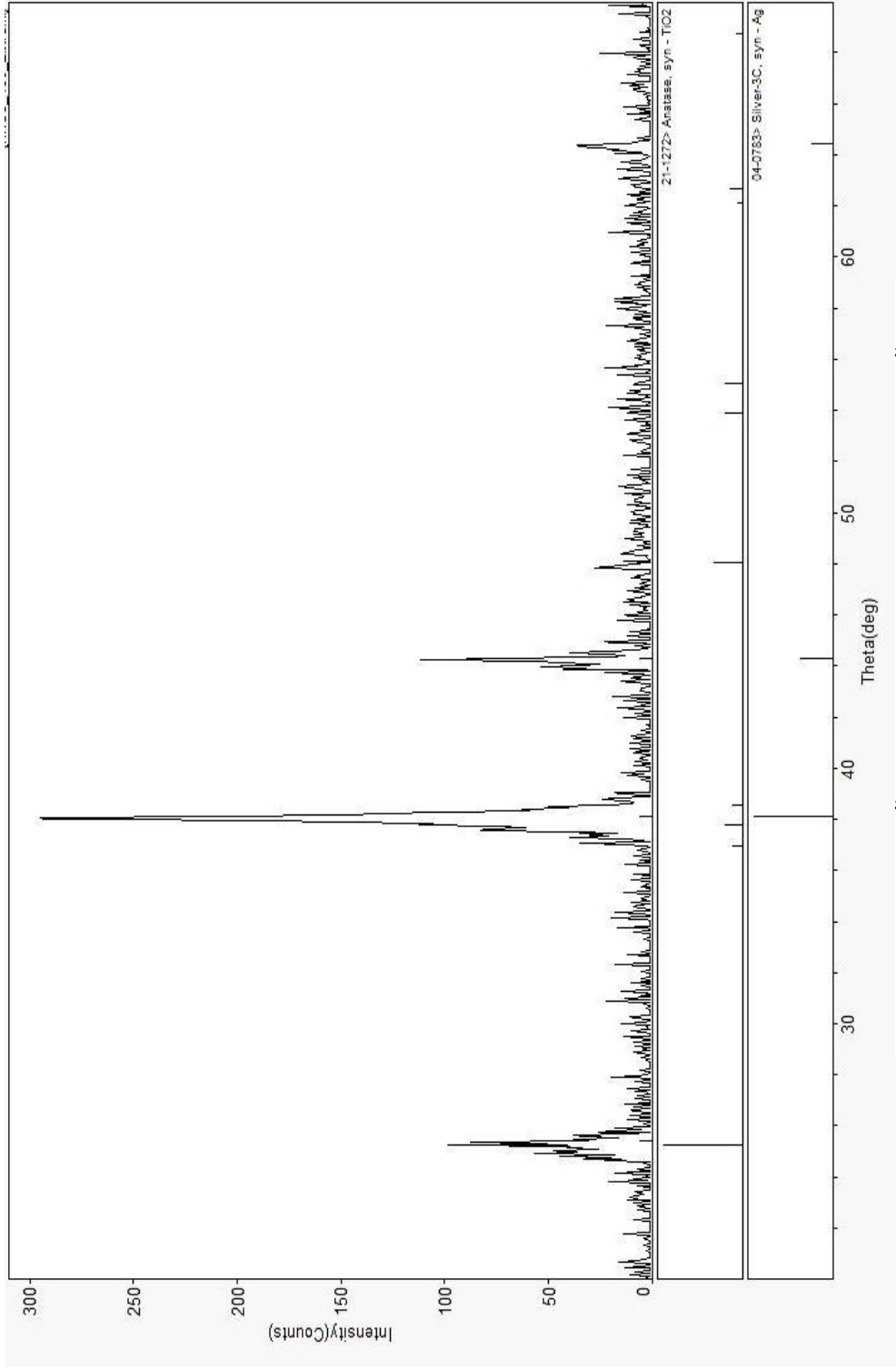
รูปแบบการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์จากกรดไนตริกอุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ข.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดไนตริก ครั้งที่ 1

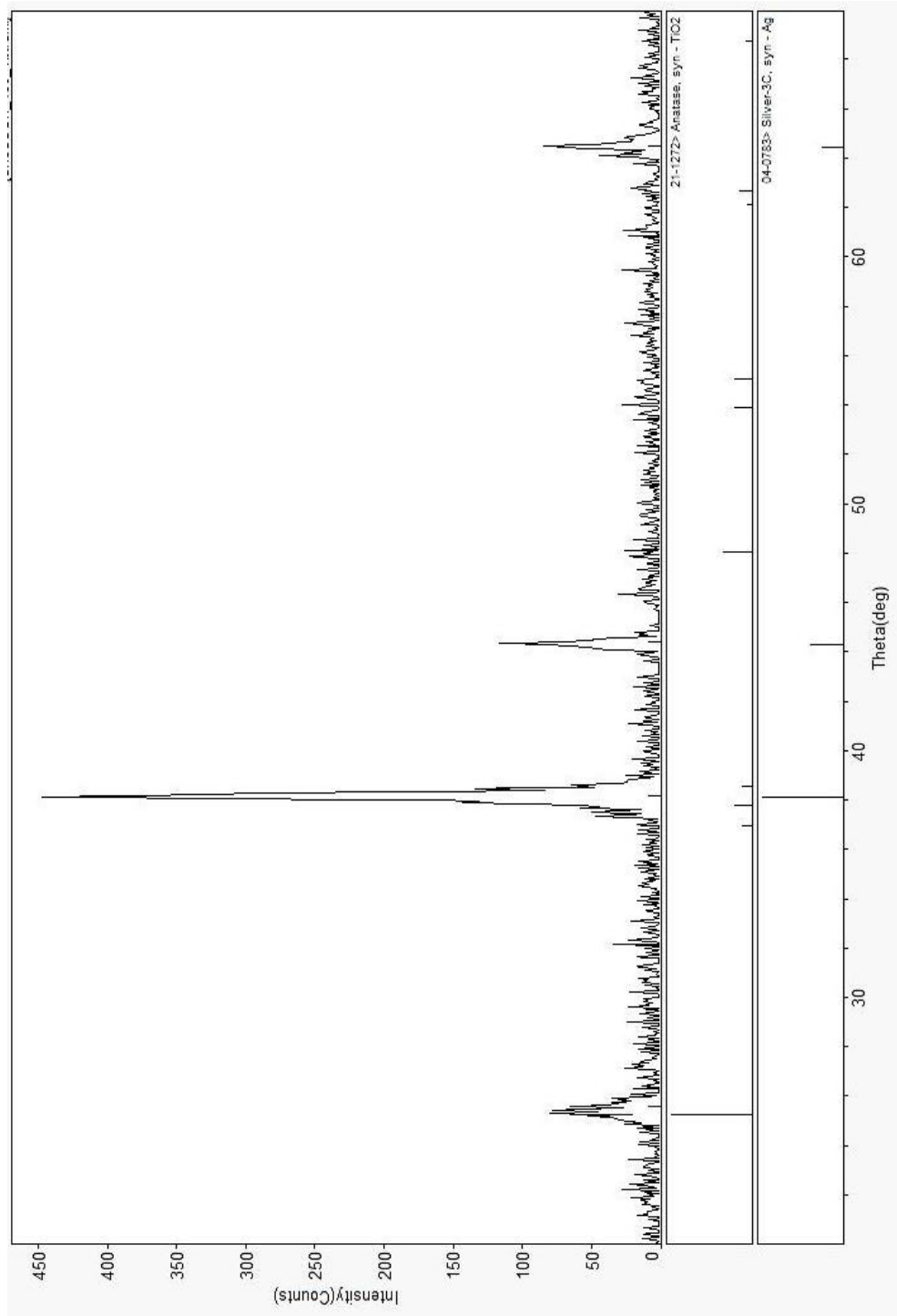


ภาพที่ ข.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้การไนตริก ครึ่งที่ 2

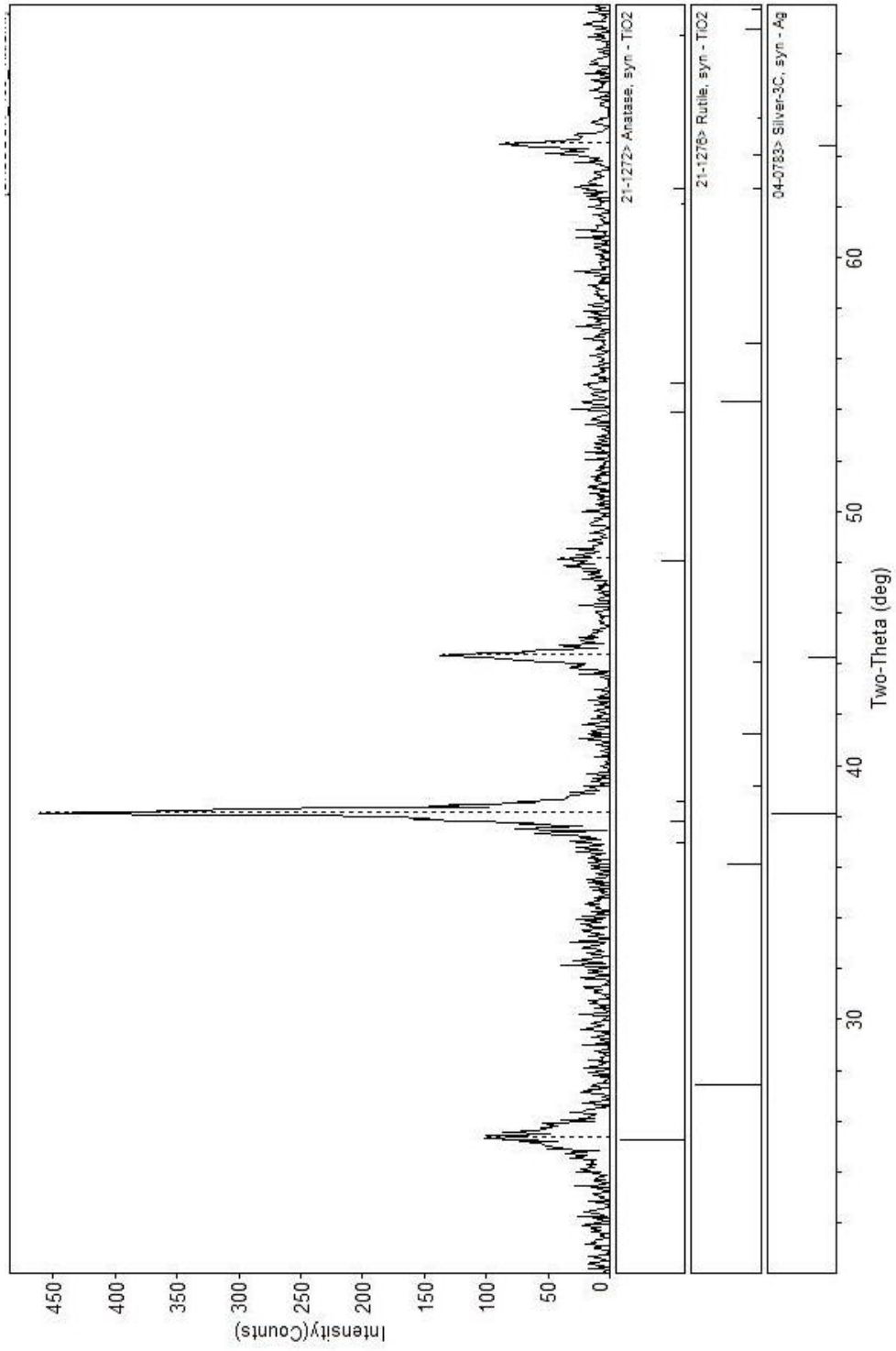


ภาพที่ ข.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้การโตไนตริก ครั้งที่ 3

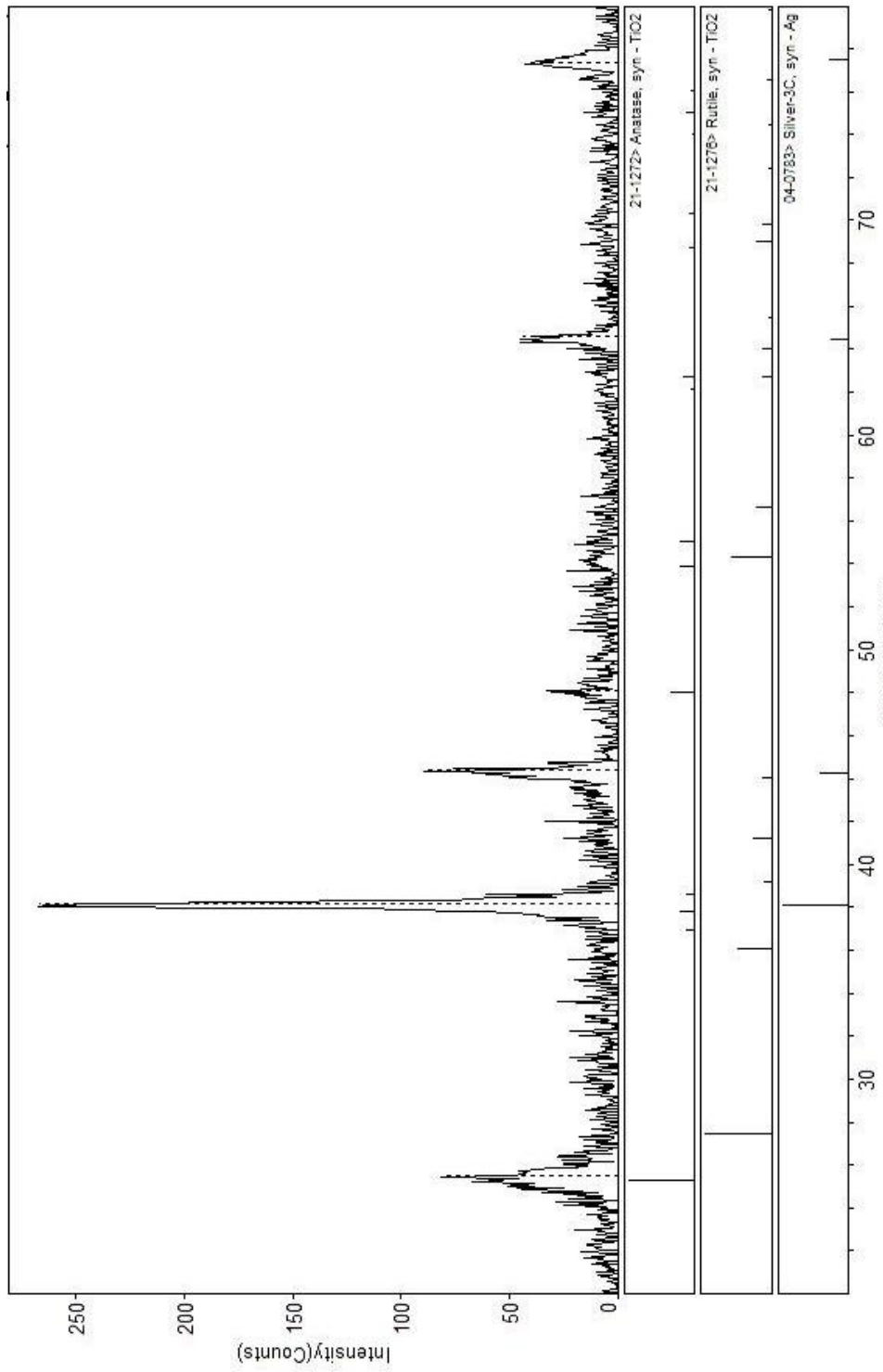
รูปแบบการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์จากกรดอะซิติกอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ข.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดอะซิติก ครึ่งที่ 1

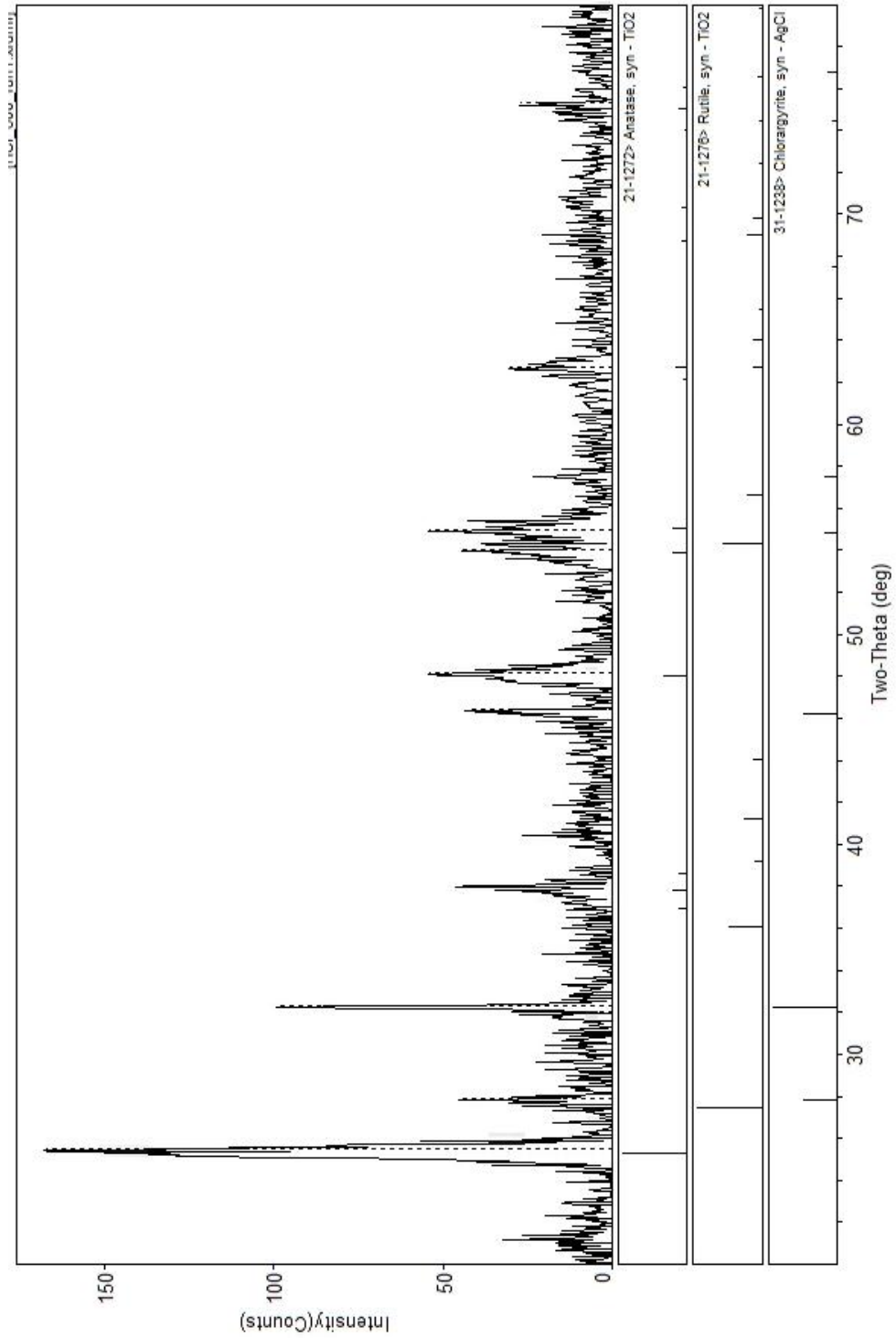


ภาพที่ ข.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดอะซิติก ครั้งที่ 2

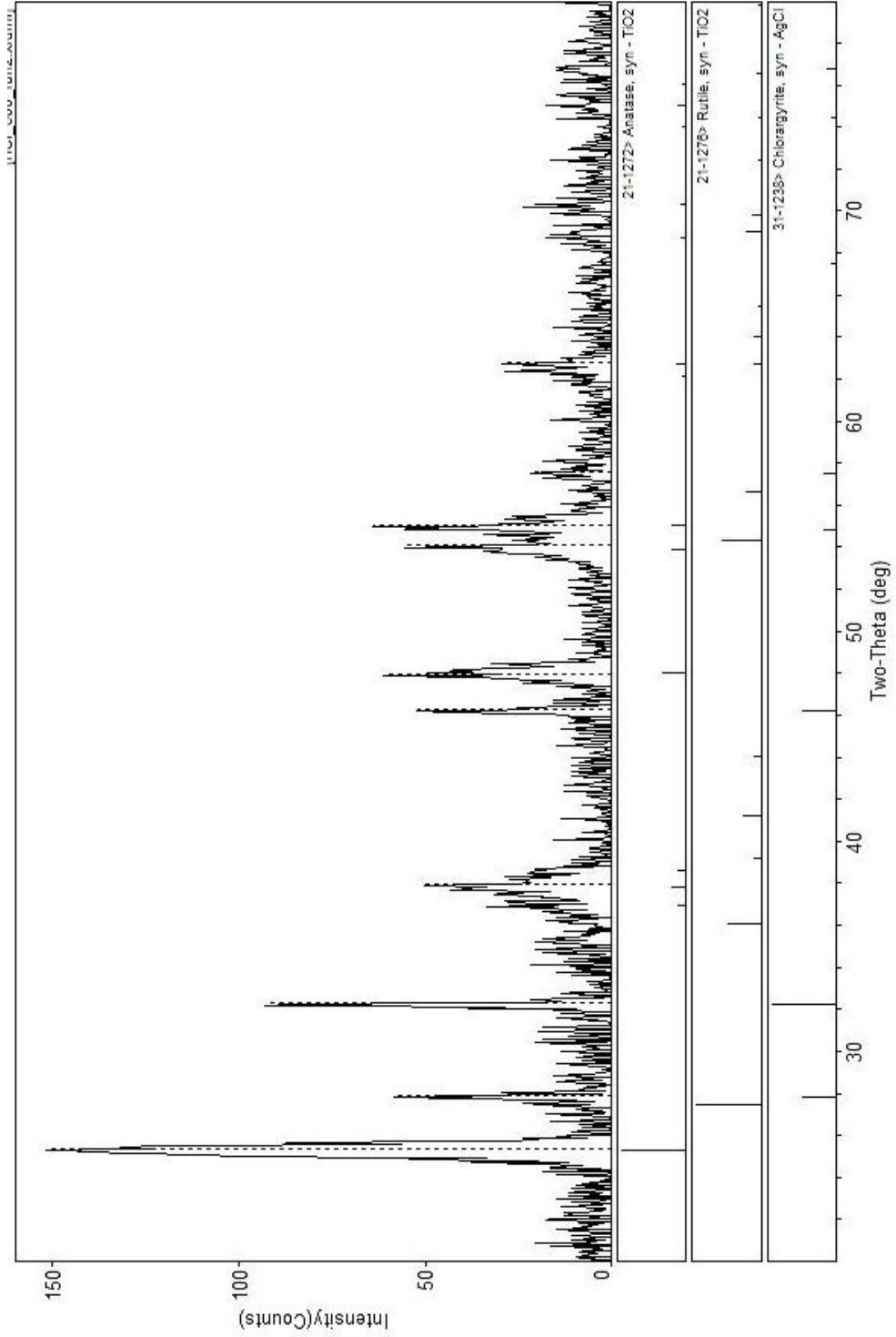


ภาพที่ ข.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรตอะซิติก ครั้งที่ 3

รูปแบบการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของการใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์จากกรดไฮโดรคลอริกอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

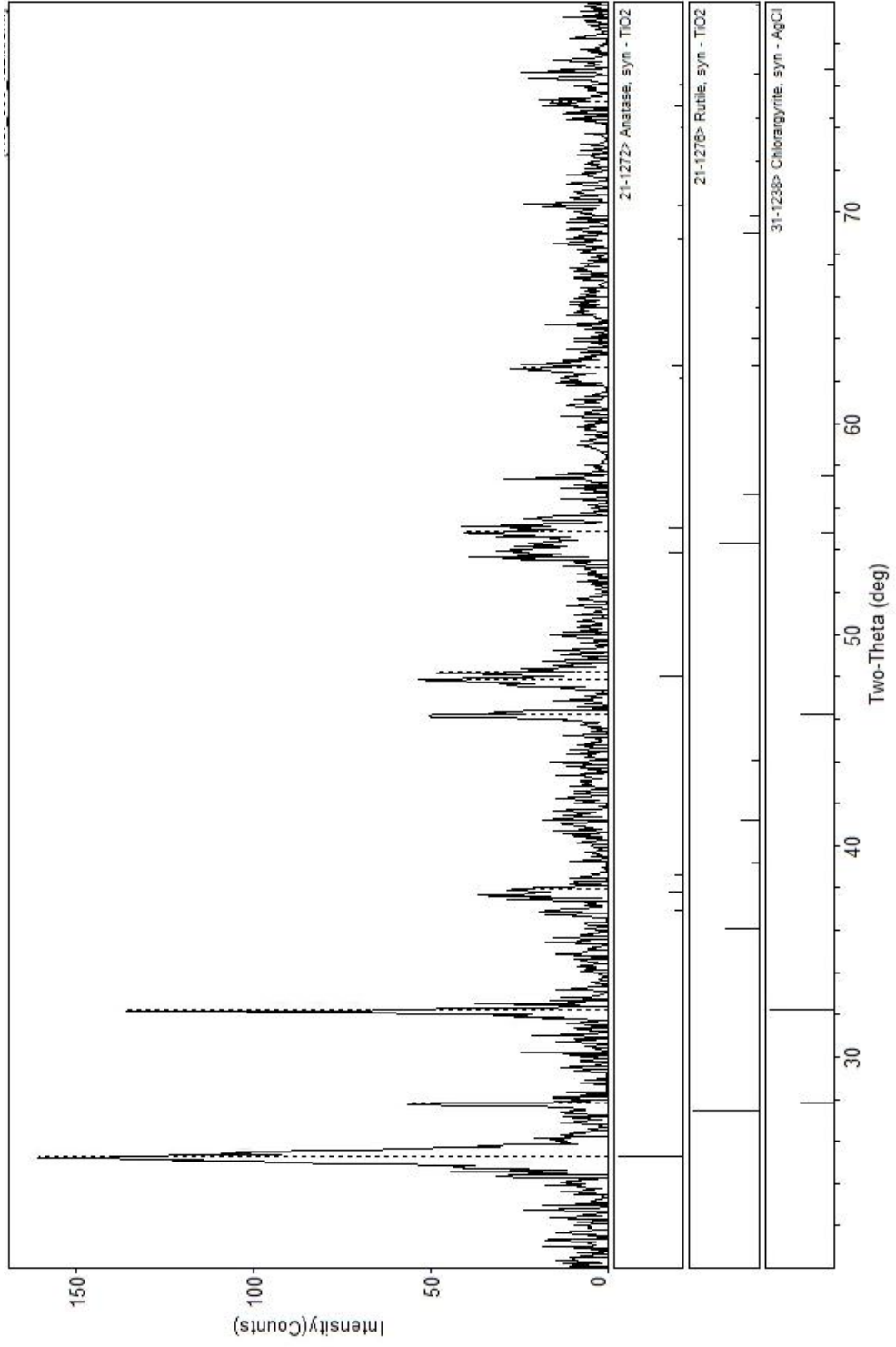


ภาพที่ ข.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดไฮโดรคลอริกครั้งที่ 1.



ภาพที่ ข.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้การโตเอ็ดเรคโอริกครั้งที่ 2





ภาพที่ ข.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากการใช้กรดไฮโดรคลอริกครั้งที่ 3

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิริพัชร โภยโกโคสวรรณค์ เกิดเมื่อวันที่ 16 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2534 ที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียน วิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา 2 เมื่อปีการศึกษา 2551 และ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมคณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสห สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2556

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

สิริพัชร โภยโกโคสวรรณค์, อัจฉริยา สุริยะวงศ์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ และ ภารดี ช่วย บำรุง. 2560. การสลายคาร์บอนในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 25 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) : 975-988.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY