



การพัฒนาสารเคลือบผิว $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{X}$ ระดับนาโน
The Development of Nano Coating Material of $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{X}$

จิราภรณ์ คำจันทร์
Jiraporn Damchan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University

2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาสารเคลือบผิว TiO₂/SnO₂/X ระดับนาโน
ผู้เขียน นางสาวจิราภรณ์ คำจันทร์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ วงศ์นาวา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี กุปตานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี กุปตานนท์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม นียมवास)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม นียมवास)

.....กรรมการ
(ดร.อานอบ กิ่งพะชา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

Thesis Title	The Development of Nano Coating Material of TiO ₂ /SnO ₂ /X
Author	Miss Jiraporn Damchan
Major Program	Materials Engineering
Academic Year	2007

Abstract

The development of coating material of TiO₂ by doping some additives, either SiO₂ or SnO₂ and both of them, to improve the photocatalytic efficiency and hydrophilic property by sol-gel technique which sol-gel solution will be coated on soda lime glass by spin coating method. Therefore, the objective of this research is to study the effect of the amount of not only additive materials and calcinations temperature but also film thickness those result in physical properties, phase transformation, the photocatalytic reaction and hydrophilic property of TiO₂ films. For TiO₂ powder, it was found that anatase phase appears at the temperature range of 300 – 600 °C and mixed phases of anatase and rutile exist together at 700 °C. The addition of either SiO₂ or SnO₂ results in a decrease in the crystal of anatase phase which becomes more stable at the temperature over than 700 °C. In addition, the testing of photocatalytic reaction and hydrophilic property of the films calcined at temperature of 500 °C were done by means of methylene blue degradation under UV irradiation for 6 hours and contact angle of water droplet on film surface at various time of UV irradiation respectively. It was found that TiO₂/3SnO₂ and TiO₂/5SiO₂ films could degrade methylene blue by 98.13 % and 82.79 % respectively, whereas that of pure TiO₂ was 78.05 %. Furthermore, the efficiency of photocatalytic reaction of TiO₂/SiO₂/SnO₂ film calcined at the temperature of 600 °C was 82.51 %, while that of pure TiO₂ was only 68.06 %. The contact angle of water drop on the uncoated and three layers coated films of TiO₂, TiO₂/15SiO₂, TiO₂/3SnO₂ and TiO₂/SiO₂/SnO₂ for 30 minutes irradiation time were 6, 13, 0, 0 and 7 degrees respectively. When number of coating layers was increased from 1 to 2 layers, the photocatalytic efficiency and hydrophilic property of the films increased due to a decrease in contact angle. In contrast, the three layers of film thickness caused to raise contact angle because of cracks on the film surface. In this finding, the addition of SiO₂ can improve

hydrophilic property, whereas that of SnO₂ can improve the photocatalytic efficiency. Therefore, coating material of TiO₂/SiO₂/SnO₂ can provide the better property in both photocatalytic and hydrophilic properties.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เล็ก สีคง ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ รศ.กัลยาณี คุปตานนท์ และ ผศ.ดร.สุธรรม นิยมवास กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมาตลอดจนช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์และ
ให้ข้อเสนอแนะที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา การตลอดจนเป็น
แบบอย่างในการนำวิชาความรู้ไปใช้ในการดำเนินชีวิตต่อไป

ขอขอบคุณศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยีภาคใต้
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้งบประมาณอุดหนุน
บางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความร่วมมือและคำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดี
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และภาควิชา
ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือทดสอบในงานครั้งนี้ รวมทั้งบุคคลอื่นที่ไม่
สามารถเอ่ยนามไว้ในที่นี้ได้ทั้งหมด ที่สนับสนุน เสียสละเวลากำลังกายและให้กำลังใจผู้วิจัยมา
ตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอบคุณ นายชาญชัย บุญช่วย ที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดี เพื่อนๆร่วมรุ่น
ฟิสิกส์มหาวิทยาลัยทักษิณ ทุกคน ที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขและรับฟังปัญหาและทุกข์สุขตลอดการศึกษา
ปริญญาโท เพื่อนๆที่ๆน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุที่ช่วยเหลือแนะนำและเป็น
ปรึกษาที่ดีในทุกโอกาส

ผู้วิจัยขออุทิศส่วนดีและประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ แด่คุณพ่อ ไสว
และคุณแม่ผวน และครอบครัวคำจันทร์ ซึ่งเป็นผู้ให้กำลังใจ คำปรึกษา และเป็นแบบอย่างที่ดีมา
ตลอดจนถึงวันนี้

จิราภรณ์ คำจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(6)
สารบัญ	(7)
รายการตาราง	(9)
รายการรูป	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	3
1.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	3
1.2.2 ปรากฏการณ์โฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic effect)	7
1.2.3 กระบวนการ โซล - เจล	9
1.2.4 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)	14
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
1.4 วัตถุประสงค์	27
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	27
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	27
2 วิธีการวิจัย	28
2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	28
2.2 กระบวนการสังเคราะห์ผง TiO ₂ และ TiO ₂ /SiO ₂ TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	28
2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	30
2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงและฟิล์ม	35
2.5 การทดสอบปฏิกิริยาของฟิล์มในการย่อยสลายสีของ Methylene blue	36
2.6 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง	39
	(7)

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3 ผลและการอภิปรายผล	41
3.1 อธิธิพลของอุณหภูมิ	41
3.2 อธิธิพลของสาร โด๊ป (Dopants)	45
3.3 อธิธิพลของความหนาฟิล์ม	70
4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	82
4.1 บทสรุป	82
4.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	88
ภาคผนวก	93
ก. การคำนวณหาค่าขนาดผลึกและปริมาณเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์	94
ข. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวี ในเวลาต่างๆ	96
ประวัติผู้เขียน	109

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง TiO_2	6
3.1	ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง TiO_2 เเผที่อุณหภูมิต่างๆ	47
3.2	ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เเผที่อุณหภูมิต่างๆ	48
3.3	ขนาดผลึกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เตรียมด้วยวิธีโซล - เจล ที่อุณหภูมิต่างๆ	53
3.4	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสี Methylene blue (MB) โดยฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ที่เวลา รับรังสียูวี 6 ชั่วโมง อุณหภูมิสังเคราะห์ 300, 400 และ 500 °C	56
3.5	ขนาดผลึกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย SiO_2 และ SnO_2 เตรียมด้วยวิธี โซล - เจล และเผอุณหภูมิ 600 °C ของฟิล์มเคลือบ 3 ชั้น	63
3.6	ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของสารละลาย Methylene blue ที่ความยาวคลื่น 644 nm หลังการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ฟิล์ม 3 ชั้น เคลือบ	66
3.7	ความขรุขระของชั้นฟิล์มสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C วิเคราะห์ด้วย AFM	72
3.8	ความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 °C วิเคราะห์ด้วย เครื่อง AFM	72
3.9	ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำของชั้นฟิล์มที่ความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น อุณหภูมิเผ 500 °C	80
4.1	เปรียบเทียบและสรุปสมบัติต่างๆของสารเคลือบ	84
ก.1	ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของฟิล์มสามองค์ประกอบ ที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	94
ข.1	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวีเวลาต่างๆของฟิล์ม ไทเทเนียมไดออกไซด์	96
ข.2	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวีเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ	97
ข.3	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ	98

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.4	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	99
ข.5	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ	100
ข.6	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ	101
ข.7	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	102
ข.8	ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	103
ข.9	เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ	104
ข.10	เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ	105
ข.11	เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	105
ข.12	เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์มสามองค์ประกอบที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	106
ข.13	มุมสัมผัสของกระจกโซดาไลม์ที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มที่เติม SiO_2 และ SnO_2 เมื่อได้รับรังสียูวี สักระยะที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	107
ข.14	มุมสัมผัสของกระจกโซดาไลม์ที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับรังสียูวี สักระยะที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	108

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	การนำโฟโตคะตะไลติก ไปใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์ในการทำความสะดวกตัวเอง	2
1.2	โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูไนต์	5
1.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) ของ TiO_2	8
1.4	การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล	10
1.5	กระบวนการโซล-เจล	12
1.6	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล	13
1.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็ว เวลาและปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง	14
1.8	กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ TiO_2 โดยการโด๊ปด้วย La และ N	18
1.9	กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ ในคอมโพสิตฟิล์ม $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$	18
1.10	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทสและรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hurum และคณะ เกี่ยวกับเฟสรูไทล์	19
1.11	ภาพถ่าย FESEM ของ TiO_2 Nanotube arrays	22
1.12	การจัดโครงสร้างการจับยึดบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก	25
1.13	มุมสัมผัสของของแข็งตามสมการ Young: $\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta$ เมื่อ γ คือ แรงดึงผิวระหว่างทั้งสามเฟส	26
2.1	การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล	31
2.2	การเตรียมสารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล	32
2.3	การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล	33
2.4	การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล	34
2.5	เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ความเร็วสูงสุด 1700 รอบต่อนาที	35
2.6	โครงสร้างของ Methylene blue	37

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.7 Spectrum การดูดกลืนแสงของ Methylene blue ที่ความเข้มข้น (0.5×10^{-5}) – (3×10^{-5}) โมลาร์	37
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue (0.5×10^{-5}) – (3×10^{-5}) โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer	38
2.9 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของแข็ง	39
2.10 เปรียบเทียบขนาดของมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิก ของพื้นผิวฟิล์ม	40
3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเผาที่ 500 °C	42
3.2 ภาพถ่าย SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิเผา 300 °C และ 400 °C	42
3.3 กราฟ DTA ของผงเจด TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	43
3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิเผา 105 - 700 °C	43
3.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับอัตราการย่อยสลายสีของ Methylene blue เมื่อได้รับแสงยูวี 6 ชั่วโมง	44
3.6 XRD spectrum ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสาร SiO_2 ก) $TiO_2/5SiO_2$ ข) $TiO_2/10SiO_2$ / ค) $TiO_2/15SiO_2$ ง) $TiO_2/20SiO_2$	46
3.7 XRD พีคของผง TiO_2/SiO_2 เมื่ออุณหภูมิเผา 700 °C ที่ 5 mol% SiO_2 - 20 mol% SiO_2	46
3.8 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C ₀ ของ Methylene blue โดยฟิล์ม TiO_2/SiO_2 ภายเวลาในการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	50
3.9 ความสัมพันธ์ปริมาณตัวเติม SiO_2 กับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของ Methylene blue ที่ อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบและเวลาที่ได้รับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง	50
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับเวลาที่รับรังสียูวี ของกระจกและกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เติม SiO_2 ในปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 500 °C และมี 3 ชั้นเคลือบ	51

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.11	เปรียบเทียบมุมสัมผัสของผิวกระจกที่ไม่เคลือบ เคลือบด้วย TiO_2 และ TiO_2 ที่เติมด้วย SiO_2 ที่ปริมาณต่างๆภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสียูวี เป็นเวลา 30 นาที	52
3.12	ผล XRD ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม SnO_2 1-10 mol% และอุณหภูมิ 300 °C, 400 °C และ 500 °C ก) $\text{TiO}_2/1\text{SnO}_2$ ข) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ ค) $\text{TiO}_2/5\text{SnO}_2$ ง) $\text{TiO}_2/10\text{SnO}_2$	53
3.13	ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 ของ Methylene blue โดยฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ภายใต้เวลาในการรับรังสียูวีของฟิล์ม ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ ที่อุณหภูมิสังเคราะห์ ก) 300 °C ข) 400 °C และ ค) 500 °C	56
3.14	ชิ้นงานกระจกก่อนและหลังทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยทดสอบการย่อยสลายสี Methylene blue ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	57
3.15	ความเข้มข้นของ Methylene blue ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับรังสียูวีที่เวลา 0, 4, 2 และ 6 ชั่วโมง โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย 3 mol% SnO_2 เป็นโฟโตคะตะลิสต์	57
3.16	มุมสัมผัสเมื่อได้รับรังสียูวีของกระจกและกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย SnO_2 ในปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิสังเคราะห์ 500 °C และเคลือบ 3 ชั้น	58
3.17	XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 3 ชั้น เมื่อเติมสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ก) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ข) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ ค) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ ง) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$	59
3.18	XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 3 ชั้น เมื่อเติมสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ก) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ข) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ ค) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ ง) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$	60
3.19	XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 3 ชั้น เมื่อเติมสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ก) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ข) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ ค) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ ง) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$	61

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อเติมสาร SiO ₂ และ SnO ₂ และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (ก) TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂ (ข) TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂ (ค) TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂ (ง) TiO ₂ /10SiO ₂ /10SnO ₂	62
3.21	XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อเติมสาร 15 mol%SiO ₂ และ SnO ₂ และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C	62
3.22	การลดลงของความเข้มข้นของ Methylene blue ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เมื่อเทียบกับ เวลาในการรับรังสีของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เติมด้วยสาร SiO ₂ และ SnO ₂ สำหรับฟิล์มที่เคลือบ 3 ชั้นและเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก) TiO ₂ /SiO ₂ /xSnO ₂ ข)TiO ₂ /3SiO ₂ /xSnO ₂ ค)TiO ₂ /5SiO ₂ /xSnO ₂ ง)TiO ₂ /10SiO ₂ /xSnO ₂ จ) SiO ₂ /15SiO ₂ /xSnO ₂ (x คือปริมาณของ SnO ₂ ที่เติม เท่ากับ 1, 3, 5 และ 10mol %)	65
3.23	เปรียบเทียบการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์มที่มีองค์ประกอบต่างๆ ที่ อุณหภูมิสังเคราะห์ 600 °C และได้รับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง	67
3.24	มุมมองสัมผัสของสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เผาที่อุณหภูมิ 500 °C และฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ	68
3.25	รูปมุมมองสัมผัสของฟิล์ม TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂ ก) รับรังสียูวี 0 นาที ข) รับรังสียูวี 10 นาที ค) รับรังสียูวี 20 นาที ง) รับรังสี 30 นาที	69
3.26	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองสัมผัสกับเวลาที่ได้รับรังสียูวีของกระจกโซดาไลม์ เคลือบ ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วย SiO ₂ และ SnO ₂ ความหนา 3 ชั้น และที่ อุณหภูมิเผา 600 °C	69
3.27	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO ₂ ที่อุณหภูมิเผา (ก) 300 °C (ข) 400 °C และ (ค) 500 °C ที่ความหนา 1 ชั้นเคลือบ	70
3.28	ภาพถ่ายพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดย วิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C	71
3.29	ภาพถ่ายพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดย วิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C	71

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30	71
ภาพถ่ายพื้นผิวของชั้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C	
3.31	73
ภาพถ่าย AFM ความขรุขระของผิวฟิล์ม (ก) TiO ₂ (ข) TiO ₂ /5SiO ₂ (ค) TiO ₂ /5SnO ₂ สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 500 °	
3.32	74
การกระจายตัวของธาตุต่างๆบนผิวฟิล์ม TiO ₂ ที่ความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น (L= จำนวนชั้นการเคลือบของชั้นฟิล์ม)	
3.33	75
การกระจายตัวของธาตุต่างๆบนผิวฟิล์ม TiO ₂ /3SnO ₂ ที่ความหนา 1, 2 และ 3 (L= จำนวนชั้นการเคลือบของชั้นฟิล์ม)	
3.34	76
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 1 ชั้นเคลือบ	
3.35	76
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 2 ชั้นเคลือบ	
3.36	76
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 3 ชั้นเคลือบ	
3.37	77
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มTiO ₂ /SnO ₂ มีความหนา 1 ชั้นเคลือบ	
3.38	77
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มTiO ₂ /SnO ₂ มีความหนา 2 ชั้นเคลือบ	
3.39	77
ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มTiO ₂ /SnO ₂ มีความหนา 3 ชั้นเคลือบ	
3.40	78
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น	
3.41	79
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์ม TiO ₂ /5SiO ₂ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น	
3.42	79
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์ม TiO ₂ /3SnO ₂ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น	

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

$x\text{TiO}_2/y\text{SiO}_2/z\text{SnO}_2$	x บ่งบอกถึงปริมาณ TiO_2 ในฟิล์มสูตรต่างๆ ในหน่วย mol% y บ่งบอกถึงปริมาณ SiO_2 ในฟิล์มสูตรต่างๆ ในหน่วย mol% z บ่งบอกถึงปริมาณ SnO_2 ในฟิล์มสูตรต่างๆ ในหน่วย mol%
A_a	ความเข้มของพีคอะนาเทส (101) ที่ได้จาก XRD
A_r	ความเข้มของพีครูไทล์ (110) ที่ได้จาก XRD
A_b	ความเข้มของพีคบรูไคต์ (121) ที่ได้จาก XRD
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Methylene blue
C	ความเข้มข้นของ Methylene blue ณ เวลาทดสอบ
M	หน่วยความเข้มข้นเป็นโมลาร์
MB	Methylene blue
$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Tin (IV) chloride pentahydrate
t	ขนาดผลึก
TEOS	Tetraethyl orthosilicate
TTIP	Titanium (IV) isopropoxide
W_a	สัดส่วนน้ำหนักของเฟสอะนาเทส
W_r	สัดส่วนน้ำหนักของเฟสรูไทล์
W_b	สัดส่วนน้ำหนักของเฟสบรูไคต์
γ	แรงดึงผิว
γ^{sl}	พลังงานอิสระหน้าสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว
γ^{sv}	พลังงานพื้นผิวอิสระของของแข็ง
γ^{lv}	พลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลว
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
β	Line width at half maximum height
θ	มุมสัมผัส (Contact angle)

บทที่ 1

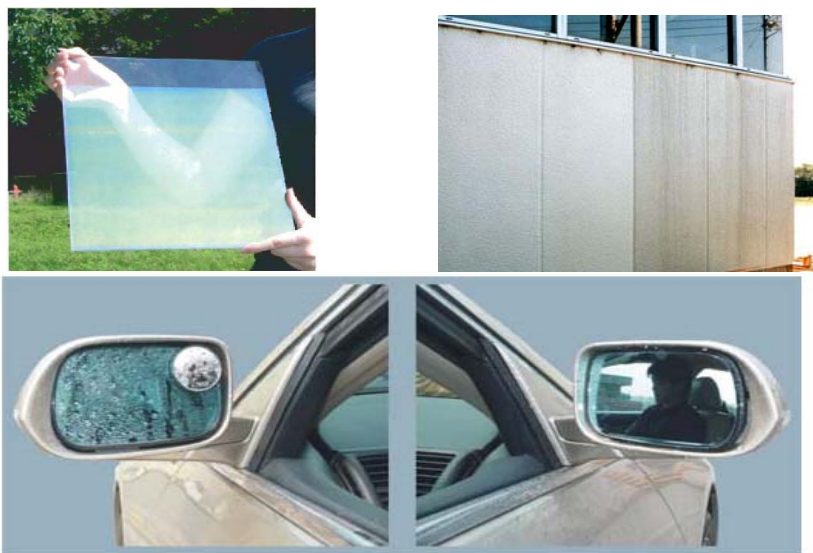
บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันปัญหาการทำความสะอาดพื้นผิวผลิตภัณฑ์ เช่น กระจก ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาคารบ้านเรือน ส่วนประกอบในรถยนต์ กระจกนิรภัย สิ่งก่อสร้าง อาคารสำนักงานขนาดใหญ่ นิยมก่อสร้างด้วยกระจกมากขึ้น และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงตามมา คือ การทำความสะอาด โดยเฉพาะในบริเวณที่มีฝุ่นละอองมาก หรือเขม่าควันที่มาจากรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีคราบสกปรกที่มาจากน้ำมันจากมือที่จับต้องผิวกระจก หากทิ้งไว้เป็นเวลานานสิ่งสกปรกดังกล่าว จะติดแน่นผิวกระจกกำจัดออกได้ยากขึ้น ดูเหมือนมีสารบางอย่างมาเคลือบอยู่ ทำให้ดูหมอง ไม่ใสสะอาด สำหรับปัญหาการทำความสะอาด นอกจากจะเกิดขึ้นกับกระจกแล้ว เครื่องสุญญากาศต่างๆ ที่มีใช้ในบ้านเรือน การทำความสะอาดเสื้อผ้าหรืออื่นๆ เป็นต้น ปัญหาที่กล่าวมาเหล่านี้ปัจจุบันมีวิธีการทำความสะอาดได้ด้วยน้ำยาทำความสะอาด กำจัดพวกคราบน้ำมัน แต่ข้อเสียของการใช้น้ำยาทำความสะอาด คือ ผู้ใช้อาจแพ้ฝุ่นละอองของน้ำยาทำความสะอาดได้ และยิ่งการทำความสะอาดอาคารขนาดใหญ่ คงต้องเสียค่าใช้จ่ายไม่น้อยในการทำสะอาดแต่ละครั้ง แต่ปัจจุบันนี้ได้มีนวัตกรรมใหม่ คือ การทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง หรือทำความสะอาดได้ง่าย ไม่สิ้นเปลืองแรงงาน เวลา และค่าใช้จ่ายในการทำสะอาด กระบวนการที่ว่านั้นก็ คือ การเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ด้วยสารเคลือบที่มีสมบัติโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) และ สมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic property) ซึ่งก็คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยปกติไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตสีขาว กระจกขาว ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียร ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี และเป็นสารไม่มีพิษ หรือก่ออันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ผลจากสมบัติโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำลายและสลายสารอินทรีย์ (Organic compounds) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic compounds) บางชนิดได้ ซึ่งได้แก่ สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะสารพิษ ที่มีอยู่ในน้ำ อากาศ หรือในดิน ตลอดจนสามารถฆ่าแบคทีเรีย ไวรัส ที่เกาะอยู่บนผิวได้ โดยไม่ปล่อยสารพิษ หรืออันตรายจากปฏิกิริยา และมีการนำ TiO_2 เคลือบบนหลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อใช้ในการฟอกอากาศเสียให้เป็นอากาศดี (Wang, U.S. Patent No.0206813, 2004) ในขณะที่มีงานวิจัยที่มีการจด

สิทธิบัตรทางด้านนี้ เช่น นำ TiO_2 เป็นคะตะลิสต์ในการสลายสารพิษที่อยู่ในอากาศ ได้แก่ NO_2 , NO , NO_x (Hubbell. et al., U.S. Patent No.0159309, 2005) และบำบัดน้ำเสียโดยกำจัดสาร Hydrocarbons, Phenols, Chloroaromatic ส่วนสมบัติพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่เรียกว่าไฮโดรฟิลิก หมายถึง ชอบน้ำ ส่งผลให้หยดน้ำที่มาเกาะบนพื้นผิวไม่สามารถคงรูปเป็นหยดน้ำอยู่ได้ แต่จะแผ่กระจายเป็นฟิล์มบางๆ คลุมผิวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้กระจกไม่เป็นฝ้าขาว ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งปกติพื้นผิวของกระจกเมื่อมีความชื้นในอากาศมาสัมผัสจะเกิดเป็นหยดน้ำเล็กๆ มาเกาะได้ง่ายทำให้เกิดเป็นฝ้าขุ่นมัว กระจกที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิกดังกล่าวก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้ จากสมบัติทั้งสองดังกล่าวข้างต้น ช่วยให้การทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพ โดยทำให้สิ่งสกปรก สารอินทรีย์ต่างๆ จะถูกทำลายเมื่อได้รับแสงแดดด้วยกลไกโฟโตคะตะไลติก และในขณะเดียวกันด้วยสมบัติไฮโดรฟิลิก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาผิวที่เป็นไฮโดรฟิลิกในการทำความสะอาดผิวตัวเอง (Self – cleaning) และมุ่งพัฒนาสารเคลือบผิวที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ โดยได้ปสารบางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านโฟโตคะตะไลติก และไฮโดรฟิลิก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย สะดวก และเป็นไปได้สูงสุด



รูปที่ 1.1 การนำโฟโตคะตะไลติก ไปใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์ในการทำความสะอาดตัวเอง (ที่มา: www.aist.go.jp ; www.novapure.com : 30/08/2548)

1.2 ทฤษฎีและหลักการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) และสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning) ของสารเคลือบที่สังเคราะห์ ดังนั้นในรายละเอียดที่ศึกษาจะกล่าวถึงหัวข้อสำคัญที่เกี่ยวข้องดังนี้

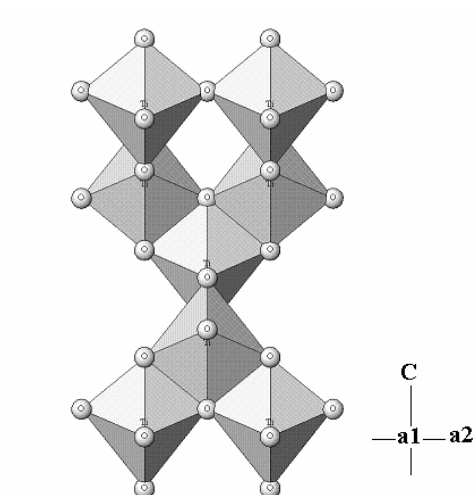
1.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมมีค่าธรรมชาติการหักเหของแสงสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้การที่ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสง) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซินและสารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการ Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมเนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียมจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน

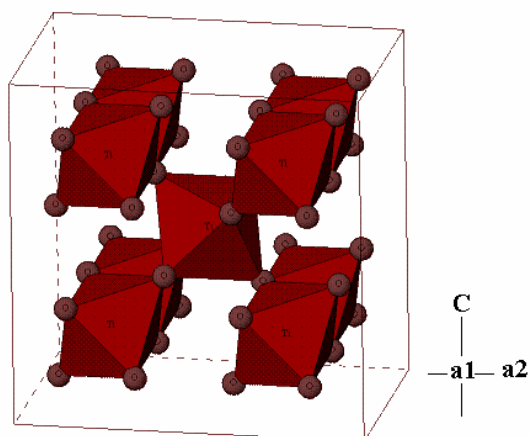
และรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 1.2 คือ รูไทล์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal อะนาเทสมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal และบรูไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic (ตารางที่ 1.1) อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ (Yang et al., 2002) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ คืออัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำเป็นคู่กัน เช่นในระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ จากการศึกษาของ Yang และคณะ (2002) พบว่าระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์ที่ดีเนื่องจาก High quantum yield สูง ความแตกต่างของแถบการนำใน TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^- - hole pair และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกที่ทำให้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย

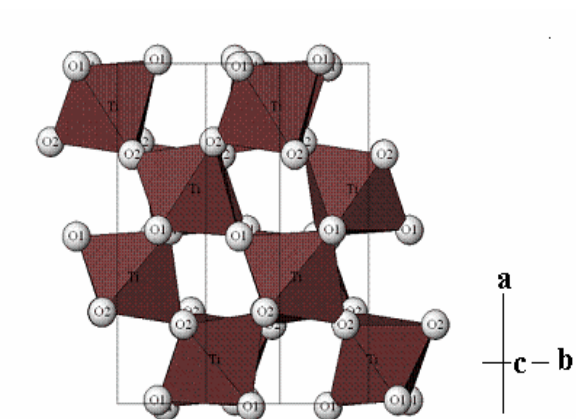
(ก) อะนาทาส



(ข) รูไทล์



(ค) บรูไคต์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาทาส (ข) รูไทล์ (ค) บรูไคต์
(ที่มา: <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm> : 13/03/2551)

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้าง TiO₂

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

Material name			Rutile			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
$a(\text{Å}), b(\text{Å}), c(\text{Å})$			4.593(2)	4.593(2)	2.959(2)	
$\alpha(\text{deg}), \beta(\text{deg}), \gamma(\text{deg})$			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			62.42			
D_x (g/cm ³)			4.25			
Space group			$P4_2/mnm$ (No.136)			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	$2a$	1	0	0	0	0.42(6)
O	$4f$	1	0.3051(7)	0.3051(7)	0	0.6(6)

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

Material name			Anatase			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
$a(\text{Å}), b(\text{Å}), c(\text{Å})$			3.7842(13)	3.7842(13)	9.5146(15)	
$\alpha(\text{deg}), \beta(\text{deg}), \gamma(\text{deg})$			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			136.3			
D_x (g/cm ³)			3.89			
Space group			$I4_1/amd$ (No.141)			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	$4a$	1	0	0	0	0.390(63)
O	$8e$	1	0	0	0.2081(2)	0.613(90)

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

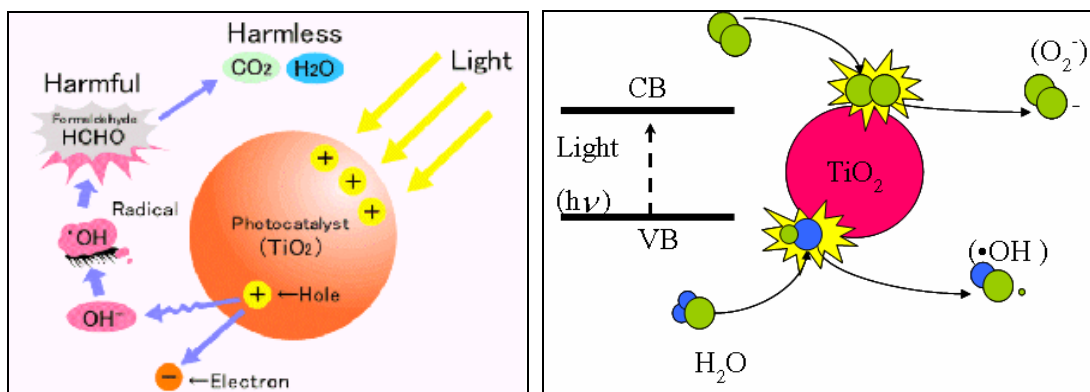
Material name		Brookite				
Composition		TiO ₂				
System		Orthorhombic				
Temperature (°C)		25				
<i>a</i> (Å), <i>b</i> (Å), <i>c</i> (Å)		9.174(2)	5.449(2)	5.138(2)		
α (deg), β (deg), γ (deg)		90	90	90		
Unit cell volume (Å ³)		257				
<i>D_x</i> (g/cm ³)		4.13				
Space group		<i>Pbca</i> (No.61)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

1.2.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic effect)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกถูกค้นพบโดย Fujishima เมื่อปี ค.ศ.1967 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เป็นโฟโตคะตะลิสต์ จะเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ หลักการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเมื่อวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นและจะกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำทำให้ในแถบเวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวกขึ้น เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH•) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O₂⁻) ดังแสดงในสมการ (1.1) - (1.3) โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโฟโตคะตะลิสต์



ไฮดรอกซิลเรดิคัลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
(ที่มา: www.antonio.licciulli.unile.it : 23/11/2548)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกใช้เป็นโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) อย่างแพร่หลาย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษ มีสมบัติทางเคมีที่เสถียรและมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูง มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างรุนแรง ในขณะที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) สูงด้วย มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มที่เคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า 0° ภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างในผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์หลุด เกิดหลุมประจุบวกขึ้นซึ่งหลุมประจุบวกจะตอบสนองต่อผิวของออกซิเจนอะตอมและเกิดหมู่ไฮดรอกซิล จากปรากฏการณ์นี้จึงมีการนำไปใช้งานทางด้านต่างๆ เช่น การทำความสะอาดตัวเองของกระเบื้องหรือการป้องกันจากหมอกจับกระจกรถยนต์ตอนอากาศเย็น (Kanai N. et al., 2004; Hubbell et al., U.S. Patent 0159309, 2005)

การศึกษาประสิทธิภาพโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอะนาเทส เป็นไปอย่างกว้างขวาง มีการใช้ตัวโด๊ปลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการศึกษาที่เน้นใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมและการทำความสะอาดตัวเอง นอกจากนี้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกไปศึกษาการทำลายเชื้อโรคและกำจัดเซลล์มะเร็ง ซึ่งเป็น

โรคที่มีอัตราการตายของคนมาเป็นอันดับต้นๆ (Blake et al., 1999) รูปแบบของโฟโตคะตะลิสต์ที่เตรียมขึ้นเพื่อนำไปใช้งานอาจอยู่ในรูปผงหรือเป็นฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุที่ต้องการทดสอบก็ได้

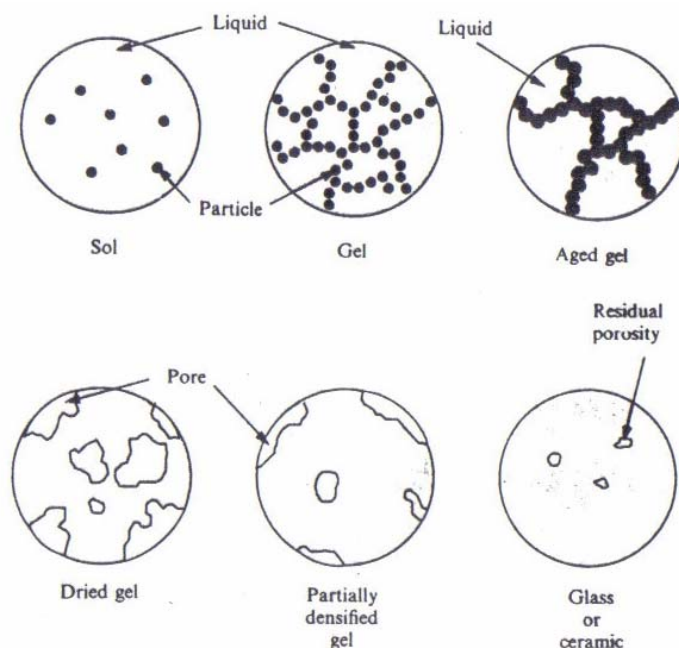
สมบัติทางพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่เรียกว่าชอบน้ำ ส่งผลให้หยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวไม่สามารถคงเป็นรูปหยดน้ำได้ แต่จะแผ่กระจายเป็นฟิล์มบางๆปกคลุมผิวอย่างสม่ำเสมอคล้ายกระจกบางใสทำให้กระจกไม่เป็นฝ้าขาว เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าต่ำมากจนกระทั่งเป็นศูนย์ (Superhydrophilicity) เมื่ออยู่ภายใต้แสงเป็นเวลานาน พื้นผิวของกระจกเมื่อมีความชื้นในอากาศสัมผัสสัก็จะเกิดเป็นหยดน้ำเล็กๆ มากมายมาเกาะได้ง่ายทำให้เกิดเป็นฝ้าขุ่นขาว เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวกระจกมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20 - 30 องศา (พรนภา, 2005) หยดน้ำบนพื้นผิวจึงคงสภาพเป็นหยด กระจกที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสมบัติชอบน้ำดังกล่าวกระจกจะใสและไม่มีฝ้า หรือที่เรียกว่า Anti-fogging glass ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ให้เห็นอย่างชัดเจน

จากสมบัติดังกล่าวข้างต้น ช่วยให้การทำความสะอาดด้วยตัวเองของพื้นผิวที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพ โดยทำให้สิ่งสกปรก สารอินทรีย์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นฝุ่นละออง เขม่าควัน คราบน้ำมันที่มาเกาะที่ผิวของกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ กั้นอย่างหลวมๆ ซึ่งจะถูกกำจัดออกได้เองเมื่อมีการสัมผัสกับแสงแดดด้วยกลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกและในขณะเดียวกันด้วยสมบัติชอบน้ำ ทำให้หยดน้ำถูกทำลายกลายเป็นแผ่นฟิล์มของน้ำบางๆ ซึ่งจะชะล้างสิ่งสกปรกที่ถูกทำลายเหล่านั้นหลุดออกไปได้ง่าย เนื่องจากน้ำที่ปกคลุมผิวนั้นเป็นแผ่นฟิล์มที่บางจึงช่วยทำให้กระจกนั้นแห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ทิ้งรอยหรือคราบสิ่งสกปรกให้เห็นเหมือนกระจกปกติ

นอกจากนี้กลไกการทำความสะอาดด้วยตัวเองนี้สามารถเกิดขึ้นได้เองและทำงานได้เป็นอย่างดีเมื่อมีฝนตก โดยฝนจะช่วยให้การชะล้างมีประสิทธิภาพไม่ต้องทำความสะอาดซ้ำ ในกรณีที่อากาศแห้งก็สามารถทำความสะอาดได้ง่ายโดยการฉีดพ่นน้ำธรรมดาสิ่งสกปรกก็หลุดได้ง่าย

1.2.3 กระบวนการ โซล - เจล (Brinker and Scherer, 1990; เล็ก สีคง, 2547)

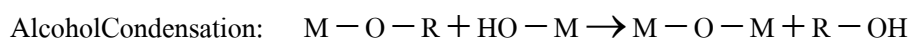
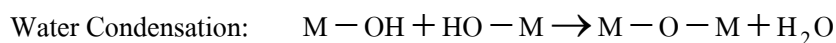
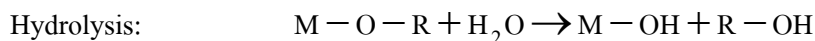
กระบวนการผลิตด้วยวิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกแก้ว และโดยเฉพาะวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” ดังในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

(ที่มา: <http://phys.suwan.ac.kr/jgyoon/lab/solgel.html> : 11/01/05 ; Brinker and Scherer, 1990)

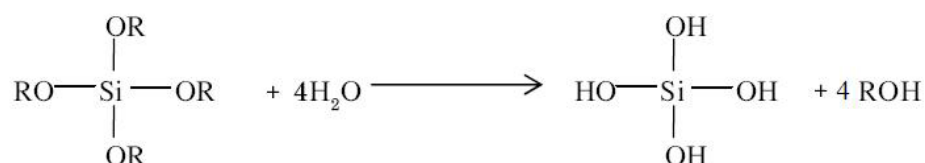
ปฏิกิริยาในกระบวนการ โซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นเป็นน้ำ (Water condensation) และการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการข้างล่าง มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในภาวะที่ต่างกันทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



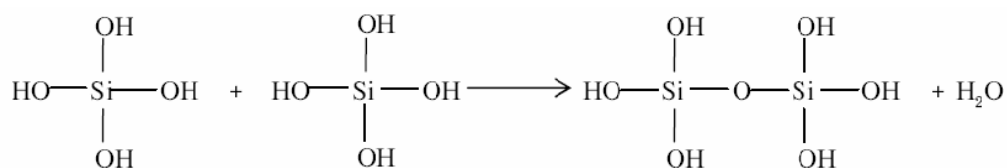
เมื่อ M แทน โลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทนกลุ่มอัลคอกซิล (Alkoxy group)

ขั้นตอนแรกของการทำโซล - เจล คือผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำสารตั้งต้น ที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล - เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะบางชนิดที่ไวต่อการ

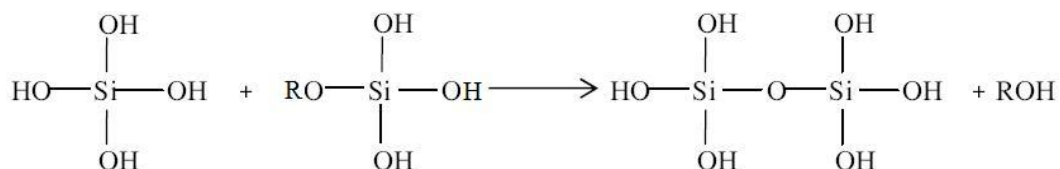
เกิดปฏิกิริยา เช่น Metal alkoxide เป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น Tetramethoxysilane (TMOS) และ Tetraethoxysilane (TEOS) ส่วนอัลคอกไซด์(Alkoxide) ชนิดอื่น เช่น อะลูมิเนต (Aluminate) ไทเทเนต (Titanate) และบอร์เรต (Borate) มีใช้กันแพร่หลาย และมักใช้ร่วมกับ TEOS เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ ซึ่ง R คือ CH_3 (TMOS) C_2H_5 (TEOS) หรือ C_3H_7 จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำดังสมการ



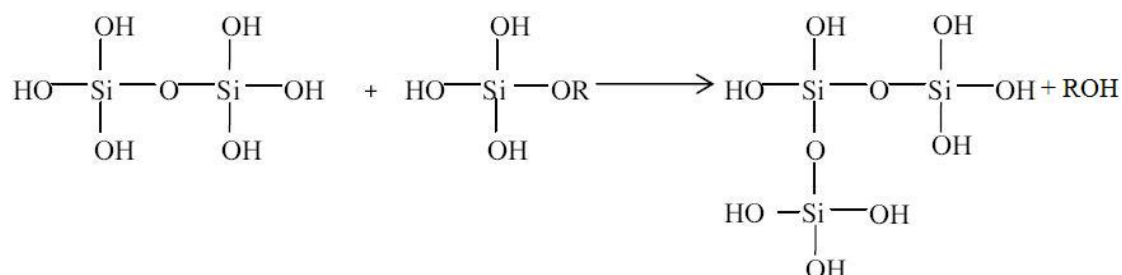
และในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาควแน่นในน้ำ



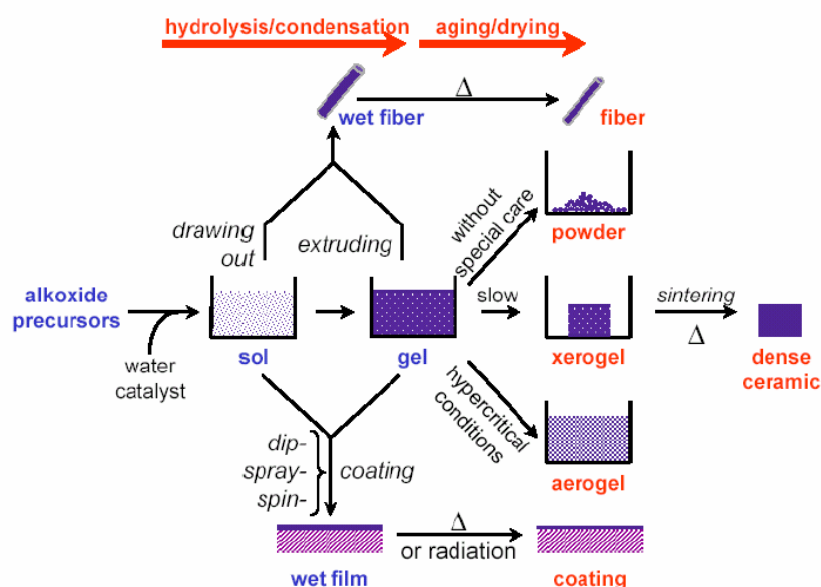
หรือ การควแน่นเป็นแอลกอสอลล์



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงตาข่ายซิลิกา(Silica network) อยู่ในภาวะที่เรียกว่า เจล จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า พอลิคอนดีนเซชัน



ในกระบวนการผลิตทั้งจากภาวะที่เป็น โซล หรือ เจล เมื่อเข้าสู่ภาวะทำให้แห้งจะ ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย(Fiber) แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผง (Powder) และฟิล์มเคลือบ (Coating film) เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป (รูปที่ 1.5)



รูปที่ 1.5 กระบวนการ โซล-เจล

(ที่มา: <http://phys.suwon.ac.kr/~jgyoon/lab/solgel.html> :11/01/2548)

วิธี โซล-เจล ประกอบด้วย การเตรียมสารละลายเนื้อเดียวกัน เปลี่ยนสารละลาย เป็น โซล สำหรับ TEOS ปฏิกิริยาจะเริ่มด้วยการไฮโดรไลซิสกลุ่ม Alkoxyyl หนึ่งหรือมากกว่าของ โมเลกุล TEOS ในการผลิตจะใช้น้ำและแอลกอฮอล์ 2 โมเลกุลประกอบด้วย OH- group จะถูกพอลิ เมอไรซ์โดยกำจัดน้ำออก ทำให้เกิดการฟอร์มตัวด้วยพันธะ Si – O – Si และเมื่อต่อกับกลุ่มอื่นก็จะ ได้เป็นพันธะ Si – O – Si – O – Si การขึ้นกระบวนการทำให้ได้โมเลกุลเป็นเส้นยาวหรืออนุภาคเป็น 3 มิติที่โมเลกุลเส้นตรงและอนุภาคละเอียดประกอบด้วยพันธะซ้ำๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.4

ข้อดีของวิธีโซล – เจล

- ทำให้เกิดพันธะบางๆระหว่างวัสดุฐาน (Substrate) กับตัวสารเคลือบ
- สามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้
- สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่าย ๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อน
- ทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูง
- มีความบริสุทธิ์สูง
- ความเป็นเนื้อเดียวกัน

- เตรียมได้ด้วยอุณหภูมิต่ำ

การนำเทคโนโลยีโซล-เจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผนังเคลือบ ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว (รูปที่ 1.6) สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารและวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่ หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุลสามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจลมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมและลักษณะและสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองตอบความต้องการของผู้บริโภคได้จริง

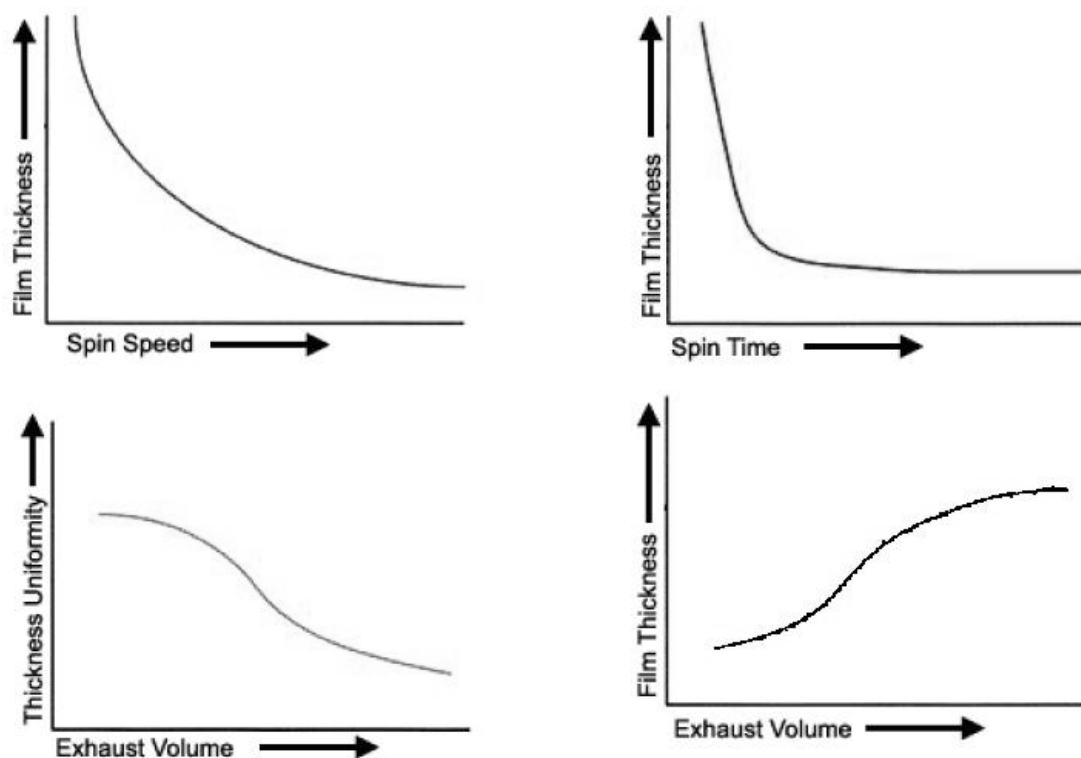


รูปที่ 1.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล

(ที่มา: <http://www.1.sivento.com/wps3/portal/en/aerosil/industries/glass/eponate.html:12/01/2548>)

1.2.4 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการเคลือบที่นิยมใช้ในการผลิตฟิล์มบาง โดยกระบวนการหยดสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุฐานและเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง (3,000 รอบต่อนาที) ความเร่งสู่ศูนย์กลางทำให้สารเคลือบกระจายไปทั่วแผ่นรอง สุดท้ายจะเกิดฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุฐาน ความหนาและสมบัติอื่นๆของฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคลือบ เช่น ความหนืด อัตราการทำให้แห้ง (Rate of drying) เฟอร์เซ็นต์ของแข็งและแรงตึงผิว (Surface tension) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาฟิล์มในกระบวนการหมุนเหวี่ยงคือ ความเร็วของการหมุน เวลาในการหมุน ปริมาณของสารเคลือบ จากกราฟในรูปที่ 1.7 จากความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาฟิล์มกับความเร็วในการหมุนและเวลาในการหมุน โดยความหนาฟิล์มจะบางลงเมื่อความเร็วและเวลาในการหมุนมากขึ้น และฟิล์มที่หนาจะมีความเร็วในการหมุนสูง เวลาในการหมุนน้อย และปริมาณของสารเคลือบมาก



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็ว เวลาและปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการหมุนเหวี่ยง

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สามารถทำได้ด้วยวิธีได้ปัลโหลหรือ ไอออนโหล และอโหล ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ Harizonov และคณะ (2001) ทำการศึกษาของระบบของ TiO_2/MnO ที่เตรียมด้วยวิธี โซล-เจลโดยใช้ไทเทเนียมเอทอกไซด์ (Titanium ethoxide) และ แมงกานีสไนเตรต (Manganese nitrate) เป็นสารตั้งต้น ซีโรเจล (Xerogel) ที่ได้ทำให้แห้งที่ $80\text{ }^\circ\text{C}$ และ เผาด้วยอุณหภูมิ $560\text{ }^\circ\text{C}$ ในอากาศ 1 ชั่วโมง พบว่าวิธีโซล-เจลสามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพและ MnO จะมีผลต่อการลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากเฟส อะนาเทส ไปเป็นเฟสรูไทล์และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโฟโตคะตะลิสต์ด้วย

Lee และคณะ (2002) ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) และสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปัลด้วย Al และ W ทำให้ระบบของฟิล์มที่ได้ปัลด้วย W จะแสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกดีที่สุดและฟิล์มที่ได้ปัลด้วย Al แสดงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

ศึกษาผลของการเคลือบของ TiO_2 บนคาร์บอน (active carbon) (Li et al., 2005) เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ได้ปัลด้วย Zinc ferrite (TiO_2 (ZnFe_2O_4)) (Cheng et al., 2004) เตรียมจากวิธี Sol-gel และใช้อุณหภูมิในเผา $400\text{ }^\circ\text{C}$, $500\text{ }^\circ\text{C}$ และ $600\text{ }^\circ\text{C}$ ทดสอบสลายตัว Methyl orange (MO) พบว่าที่ $400\text{ }^\circ\text{C}$ ผง TiO_2 (ZnFe_2O_4) จะแสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีกว่าเผาที่อุณหภูมิอื่นๆ และมีขนาดผลึกใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ประจุที่ผิว (Surface charge) โดยพื้นที่ผิวส่งผลถึงการดูดซับ MO บน TiO_2 (ZnFe_2O_4) ที่เป็นคะตะลิสต์ ดังนั้นที่อุณหภูมิ $400\text{ }^\circ\text{C}$ TiO_2 (ZnFe_2O_4) จะแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด

Bakardjieval และคณะ (2004) ได้ศึกษาการสลายตัวของ 4 - chlorophenol โดยกระบวนการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งใช้อนุภาค TiO_2 แบบอะนาเทสเปรียบเทียบกับอนุภาคในระดับนาโนของ $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, TiO_2/ZnO และ $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ ที่เตรียมด้วยวิธี Homogeneous precipitation โดยเตรียมได้จาก TiOSO_4 ด้วยวิธี Hydrolysis วิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวโฟโตคะตะลิสต์จากการวิเคราะห์ผลพบว่าที่ $1\% \text{Zr}^{4+}$ จะสลาย 4-chlorophenol ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับ $\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, TiO_2/ZnO และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

Wang และคณะ (2004) ทำการได้ปัลไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย Zr^{4+} (Zirconium ions) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเป็นคะตะลิสต์ โดยใช้ ZrOCl_2 , $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ เป็นสารตั้งต้นในการ

สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยการปรับค่าปริมาณ Zr^{4+} ในสูตรทางเคมีของ $Ti_{1-x}Zr_xO_2$ ต่างๆกัน ดังนี้ 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 พบว่า TiO_2 ที่ได้ปด้วย Zr^{4+} มีประสิทธิภาพสูงกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ และพบว่า $Ti_{0.94}Zr_{0.06}O_2$ ให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกดีที่สุด เพราะการได้ป Zr^{4+} ทำให้ขนาดของผลึกเล็กลงในขณะที่พื้นที่ผิวมากขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้มากขึ้น

Wang และคณะ(2005) ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ $ZnO/TiO_2/SnO_2$ ในอัตราส่วนของ $ZnO : TiO_2 : SnO_2$ คือ 4 : 1 : 1 และเผาที่อุณหภูมิ 200 - 1300 °C ศึกษาการสลาย MO ในปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงโดยใช้ $ZnO/TiO_2/SnO_2$ ในรูปผงเป็นตัวคะตะลิสต์ ได้ปใน MO และกระตุ้นด้วยแสงยูวี (Hg lamp) โดยมีความเข้มแสง $2.9 \times 10^4 \mu W/cm^2$ ที่เวลาการรับแสงแตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาถึง 700 – 900 °C จะเกิดเฟสของ ZnO และ TiO_2 และฟอร์มตัวเกิดเป็น Zn_2TiO_4 (ลูกบาศก์) ขึ้น เฟสอะนาเทสของ TiO_2 จะเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1000 - 1100 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสในภาวะเป็น TiO_2 บริสุทธิ์ (800 - 900 °C) เกิดเฟสใหม่ขึ้นด้วยที่ 1100 °C คือ Zn_2SnO_4 (ลูกบาศก์) และเกิด $Zn_2Ti_{0.5}Sn_{0.5}O_4$ ขึ้นที่อุณหภูมิ 1300 °C พื้นที่ผิวของตัวอย่างจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอบผืน

Kang และคณะ (2005) ได้ศึกษาการกำจัดสาร Methyl orange ในของเหลวด้วย V/TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีโซล – เจล กำหนดให้อัตราส่วนของ V (1.0 5.0 10.0 wt%)/ TiO_2 โดยผสม TTIP (99.95%) กับ V_2O_5 (99.99%) กำหนดให้ค่า pH เท่ากับ 1 นำไปกลั่นให้ไอระเหยออกที่ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง TiO_2 และ V/TiO_2 จะเกิดเฟสอะนาเทสขึ้นเมื่อนำไปเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำผง V/TiO_2 ทดสอบการสลายตัวของ Methyl orange ความเข้มข้น 20 - 100 ppm โดยใช้ผง V/TiO_2 0.1, 0.5 และ 1.0 กรัม ละลายในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร แล้วกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดยูวีด้วยความยาวคลื่นเท่ากับ 254 nm จากการศึกษพบว่า V/TiO_2 ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเกิดเฟสอะนาเทสและรูไทล์ผสมกันและมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 70 nm พื้นที่ผิว 15.0 m^2/g จะมีพื้นที่ผิวมากกว่า TiO_2 บริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าเพียง 7.0 m^2/g เมื่อเพิ่มปริมาณวาเนเดียมขนาดของอนุภาคและปริมาตรของช่องว่างจะมีค่ามากขึ้นด้วย และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD วาเนเดียมจะเข้าไปแทนที่ไทเทเนียมไอออนจนกระทั่งวาเนเดียมมีปริมาณ 5.0 wt% V/TiO_2 จะมีสมบัติที่ชอบน้ำมากกว่า และสามารถสลาย Methyl orange ได้ดีกว่า TiO_2 บริสุทธิ์

Li และคณะ (2005) ศึกษาผลของการเคลือบของ TiO_2 บนคาร์บอน (Active carbon) เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยใช้ Tetrabutylorthotitanate ($Ti(OC_4H_9)_4$) เตรียมโดยวิธีโซล-เจล แล้วนำไปเคลือบบนคาร์บอน ทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกโดยสลายตัว

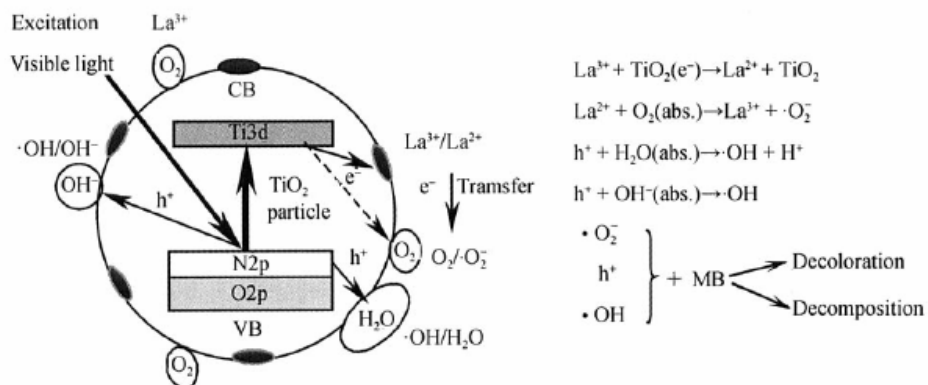
Rhodamine B พบว่าที่อุณหภูมิ 450 °C เกิดเฉพาะเฟสอะนาเทสขึ้น จนกระทั่งที่ 550 °C อะนาเทส จะเปลี่ยนเป็นรูไทล์ทั้งหมด สำหรับ TiO_2 บริสุทธิ์ ที่ 450 °C และ 550 °C จะเกิดเฟสรูไทล์มากกว่า TiO_2/AC และขนาดผลึกของ TiO_2 ใหญ่กว่า TiO_2/AC โดยอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกเร็วกว่า TiO_2/AC

การนำอนุภาคของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) (Lee et al., 2003) ใช้ Titanium tetraisopropoxide (TTIP) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับน้ำใน Sodium bis(2-ethylhexyl)sulfosuccinate (AOT) ได้อนุภาคของ TiO_2 และอนุภาคของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เตรียมได้จากเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ พบว่าเฟสรูไทล์มีผลต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าเฟสอะนาเทสที่อุณหภูมิ 800 °C โครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัสของซิลิกาทำให้อนุภาค TiO_2 (Anatase) มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และยับยั้งการเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์ ขนาดผลึกมีขนาดเล็กและพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา อนุภาค $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ มีสมบัติเป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์มากกว่า TiO_2 ที่บริสุทธิ์และที่ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2 = 90/10$ จะแสดงสมบัติเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่ดีที่สุด

1.3.2 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

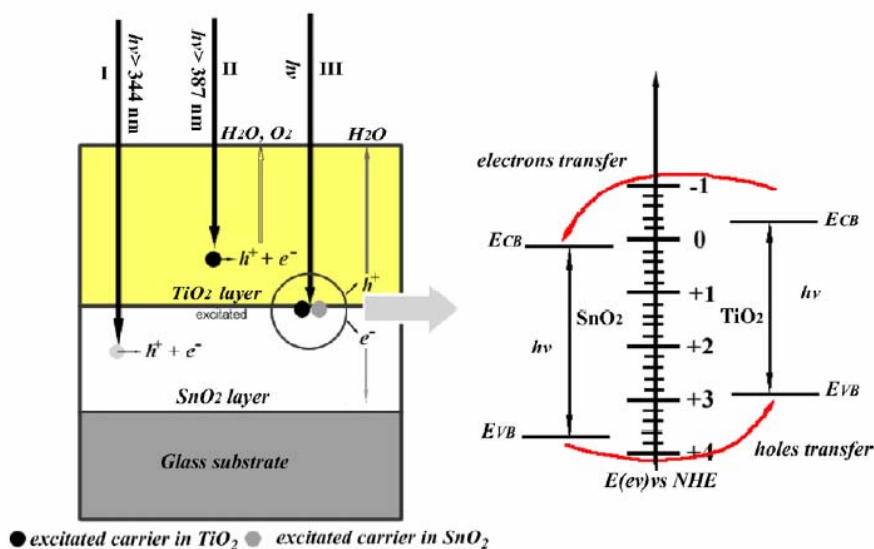
1) การได้ปด้วยโลหะหรืออโลหะ การเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการได้ปด้วยโลหะและอโลหะเป็นวิธีที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของการได้ปโลหะและอโลหะมีได้อธิบายไว้หลายๆโมเดลด้วยกัน แตกต่างกันไปตามชนิดของตัวได้ป

Liu และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ปด้วยไนโตรเจน (N) และแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน (La, N) พบว่าโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 °C ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ปแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจน คือ เฟสอะนาเทส และเกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปด้วยไนโตรเจน ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนให้ผลสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยไนโตรเจน เนื่องจากขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนเล็กกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ปด้วยไนโตรเจน การได้ปด้วยแลนทานัมร่วมกับไนโตรเจนมีกลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ดังในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 กลไกการเพิ่มปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของ TiO₂ โดยการได้ไปด้วยแลนทานัมและไนโตรเจน (Liu et al., 2007)

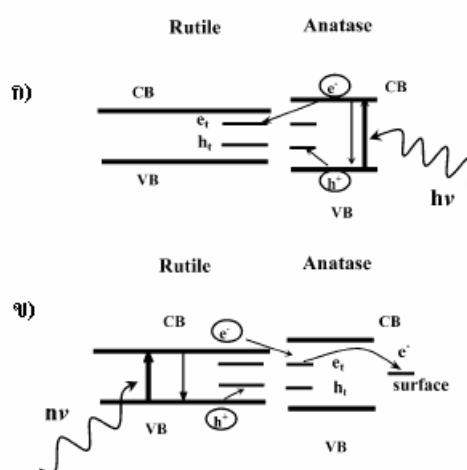
Hou และคณะ (2007) อธิบายกลไกการการได้ป SnO₂ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกใน TiO₂ ซึ่งแถบช่องว่างพลังงานของ SnO₂ เท่ากับ 3.8 eV และ TiO₂ (อะนาเทส) เท่ากับ 3.2 eV (Sayilkan et al., 2007) กว้างกว่า TiO₂ ดังนั้นตำแหน่งแถบการนำของ SnO₂ มีค่าต่ำกว่า TiO₂ แสดงดังในรูปที่ 1.9 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสงยูวีที่มากพอ อิเล็กตรอนจะหลุดจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำของ TiO₂ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบการนำสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำของ SnO₂ ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าได้และจะถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของ SnO₂ ทำให้ลดระยะเวลาในการกลับมารวมตัวของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกใน TiO₂ มีผลให้หลุมประจุบวกที่เกิดบนผิวของ TiO₂ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 1.9 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ ในคอมพอสิตฟิล์ม SnO₂/TiO₂ (Hou et al., 2007)

2) การทำให้เกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสม ระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างอะนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 75 : 25 ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส Tetra-isopropyl-orthotitanate ต่อด้วยวิธีการทำให้ชิ้นงานแน่นขึ้น (Densification) ภายใต้อุณหภูมิ 1500 - 4000 kPa (Zhao et al., 2007) จากเดิมเรารู้ว่าเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด แต่จากการศึกษาและทดลองจากงานวิจัยหลายๆ ชิ้น พบว่าเฟสผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้สูงเช่นกันกลไกการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสม อาจเกิดจากเมื่ออิเล็กตรอนของเฟสอะนาเทสถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้มีระดับพลังงานสูงจนข้ามช่องว่างไปสู่แถบการนำไฟฟ้า แต่มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้อีก แต่เมื่อมีเฟสรูไทล์อยู่ด้วย รูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) (Hurum et al., 2003) สามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว ซึ่งแสดงกลไกดังในรูปที่ 1.10 ก หรืออาจพิจารณาอีกตามรูปที่ 1.10 ข โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.02 eV ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทส (3.20 eV) แต่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลับมารวมกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสอะนาเทสผสมอยู่ด้วย อะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้ และในที่สุดอิเล็กตรอนปรากฏตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้



รูปที่ 1.10 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทสและรูไทล์

(ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองของ Hurum และคณะ (2003) เกี่ยวกับเฟสรูไทล์

1.3.3 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ในด้านต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่นทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย อากาศเสีย และด้านอื่นๆ อีกหลายด้านกำลังได้รับการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายดังนี้

1) ด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้น ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่จุดเริ่มในปี 1970 จนถึงปัจจุบัน จำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1000 ชนิด (พวงรัตน์, 2004) ได้ถูกนำมาทดสอบและพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ BTEX (เบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิล และไซลีน) ซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนัก

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์เพื่อสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรืออากาศโดย Kim และคณะ (2004) พบว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคขนาดนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรลิซิส ซึ่งใช้แอลกอฮอล์และน้ำเป็นตัวทำละลายในการสลายตัวของ Methylene blue ในอัตราของ Methylene blue 1200 มิลลิกรัม ต่อผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม แล้วให้แสงจากหลอดยูวี วัดการดูดกลืนแสงที่ 665 nm ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นขนาดของอนุภาคของอะนาเทสและรูไทล์เพิ่มขึ้นด้วยโดยที่ 400 °C มีพื้นที่ผิว 113 m²/g และการย่อยสลาย Methylene blue ที่ดีที่สุด

2) ด้านการแยกน้ำและการบำบัดน้ำเสีย

การนำเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปี หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตคะตะไลซิส เริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแวนดลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หลุดไปและหลุมประจุบวก (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O₂⁻) ซึ่งสามารถทำให้เกิด

ไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ หลังจากปฏิกิริยาผ่านไปหลายขั้นตอน ในอีกทางหนึ่งอิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ด้วยได้

3) ด้านการฆ่าเชื้อโรค

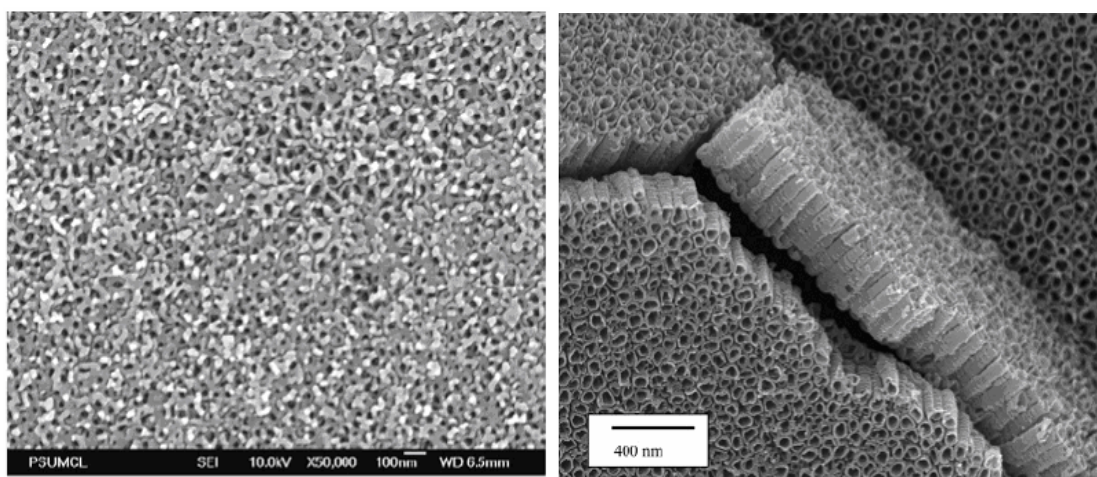
ผลจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสามารถนำไปฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ เช่น การศึกษาปฏิกิริยาต่อต้านแบคทีเรีย *Escherichia coli* K-12 ของ Fe³⁺-doped nanostructured TiO₂ thin films ที่เคลือบบนกระจก Soda-lime-silica ซึ่งเตรียมจากวิธี โซล - เจล ความเข้มข้นสูงสุดของ Iron ion (ประมาณ 0.5 mol%) หลังฉายรังสี 120 นาที สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 95 % เนื่องจากทำให้ Cell wall เกิดความเสียหาย (Zheng et al., 2007) นักวิจัยบางท่านได้ทำการศึกษา Antifungal activity ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในรูปของผงไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนฟิล์มพลาสติกที่ต่อต้าน *Penicillium expansum* ของผลไม้ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดการเจริญเติบโตของ Fungal pathogen ซึ่งพบว่าความสามารถของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Penicillium expansum* ขึ้นอยู่กับปริมาณผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มลงไป ทั้งผงและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถชะลอการเน่าของผลไม้ ในทำนองเดียวกันฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถลด Brown lesion และ *Penicillium rot* ในมะนาว (Maneerat and Hayata, 2006) เมื่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราซึ่งเป็นสาเหตุของการเน่าเสียของผักและผลไม้ จึงได้มีการทดลองศึกษาโดยนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 degussa) *Escherichia coli* K-12 โดยใช้ Malondialdehyde (MDA) เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* K-12 ผลปรากฏว่าเมื่อทำการฉายแสงไปประมาณ 30 นาที สามารถที่ฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* K-12 ได้ถึงประมาณ 77-93 % (Maness et al., 1999)

หลังจากนั้นไม่กี่ปีก็ได้มีการพัฒนาโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 degussa) โต้ปด้วย Ag มาทำการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ และเมื่อใช้เวลานานขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โรคก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Kim et al., 2005) โฟโตคะตะไลซิส ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศและพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเอง เช่น ใช้ในโรงพยาบาลหรือขั้นตอนการเตรียมอาหาร (Evans and Sheel, 2007) นอกจากนี้ยังมี การศึกษา ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ วิธีโซล - เจล พบว่า กลไกการฆ่าเชื้อโรคที่สำคัญมาจากปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH⁻ radical) (Benabbou et al., 2007) ยังมีนักวิจัยได้ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพื่อฆ่าเชื้อโรคต่างๆเช่น *Giardia intestinalis* และ *Acanthamoeba castellanii* cysts ในน้ำ (Sokmen et al., 2008) Colliform bacterial

เชื้อราและยีสต์ (Koids and Nonami, 2007) *Escherichia coli* (Rana et al., 2006) *Legionella pneumophila* (Dadjour et al., 2006) *Agriaelural pathogenic fungi: fusarium species* (Pal et al., 2007) *Fusarium species* (Sichel et al., 2007) ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกมีการนำกระบวนการนี้ไปศึกษาในการกำจัดเซลล์มะเร็งซึ่งเป็นโรคที่มีอัตราการตายของคนมาเป็นอันดับต้นๆ โดย Blake และคณะ (1999)

5) ด้านโซลาร์เซลล์

ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในโซลาร์เซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกริยาได้ดีขึ้น ราคาของโซลาร์เซลล์ค่อนข้างแพง เพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นมีการวิจัยและพัฒนาการทำงานของโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่นการนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำเป็น Quantum dot โซลาร์เซลล์ (Chatterjee, 2008) การนำซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบน Si โซลาร์เซลล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆให้ดีขึ้น นอกจากนี้การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วยวิธี Rf sputtering ดังรูปที่ 1.11 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ได้เช่นกัน โดยเพิ่ม Electron lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Gopal et al., 2006) ทำให้เกิดปฏิกริยาได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1.11 ภาพถ่าย FESEM ของ TiO_2 Nanotube arrays (Gopal et al., 2006)

6) ด้านทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning)

มีการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการโฟโตคะตะไลติกเปรียบเทียบความสามารถในการ Self-cleaning ของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้นโดยเตรียมฟิล์มด้วยวิธีโซล-เจลเปรียบเทียบกับฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD (Mellott et al., 2005) ที่มีในท้องตลาด 2 ชนิด คือ A และ B จากการศึกษาขนาดอนุภาคด้วย XRD โดยใช้ Scherer equation อนุภาคมีขนาด 7 nm และ 13 nm ส่วนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์เท่ากับ 10 nm และจากการวัดความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มด้วย AFM พบว่าฟิล์ม A มีค่าความขรุขระ 0.5 nm และฟิล์ม B มีค่าความขรุขระ 3 nm ส่วนฟิล์มสังเคราะห์ความขรุขระมีค่า 0.8 nm และเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ของตัวอย่างทั้งหมดเป็นแบบอะนาเทส ซึ่งอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้นตามความขรุขระพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ทั้งนี้ขนาดอนุภาคอาจมีผลส่วนทางกัน พบว่าการย่อยสลายไตรคลอโรเอททิลีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นอะนาเทส อัตราการย่อยสลายลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ขนาดอนุภาค จะใหญ่กว่าการทดลองในครั้งนี้

การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสบนแผ่นเทปลอนพรุณ (PTS) ทำให้มีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงด้วยวิธี IAD และศึกษาประสิทธิภาพการ Self-cleaning (Yamashita et al., 2003) ซึ่งเมื่อเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ พื้นผิววัสดุดังกล่าวจะมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง มีการประยุกต์นำไปใช้เคลือบบนสายไฟฟ้าเพื่อป้องกันการจับตัวของหิมะ และการเคลือบบนเทปลอนจะเป็นการเคลือบโดยกระบวนการแห้ง เนื่องจากหากเคลือบด้วยวิธีทางเคมีซึ่งเป็นกระบวนการเปียกจะทำได้ยากมาก ฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปอะนาเทสและการศึกษาการย่อยสลายสารละลายจำพวกอินทรีย์ เช่น 2-โพรพานอล ฟีนอล และไตรคลอโรเอททิลีน ผลสุดท้ายได้ CO_2 , H_2O และ HCl และจากการศึกษาหยดน้ำบนพื้นผิวมุมสัมผัสบน PTS มีค่าสูงมาก แสดงว่า PTS มีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง ซึ่งการได้ไปไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปจะทำให้มุมสัมผัสลดลง แต่ยังคงมีค่าสูงเนื่องจากความเป็นไฮโดรโฟบิก แต่เมื่อเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น มุมสัมผัสจะมีค่าลดลง (3×10^{-2} wt% as TiO_2) แต่หากได้ไปไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย (6.0×10^{-4} wt%) มุมสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นทำให้พื้นผิวมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงขึ้น เมื่อพื้นผิวจับสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน มุมสัมผัสของน้ำจะลดลง แต่เมื่อได้รับพลังงานแสงหยดน้ำดังกล่าวจะสกรปรกติดไว้ และมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น ผิวของชิ้นงานจะมีความเป็นไฮโดรโฟบิกสูงขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายด้วยแสง

การศึกษาโฟโตคะตะลิสต์ของกระจก Pilkington Activ™ โดย Mill, Andrew และคณะ นำตัวอย่างเคลือบด้วยวิธี APCVD เคลือบด้วย $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ซึ่งจากการทดสอบมุมสัมผัสจะ

ลดลงเมื่อเวลาการให้รังสียูวีเพิ่มขึ้น แต่การเตรียมฟิล์มโดยวิธีโซล-เจต ในช่วงแรกมัมสัมผัสจะลดลงไม่มากเมื่อให้แสง แต่อัตราการลดลงของมัมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการให้แสงและฟิล์มจะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก ในทางตรงข้ามกันฟิล์มที่ได้จากโซล-เจต จะมีความสัมพันธ์ระหว่างมัมสัมผัสกับเวลาการให้รังสีเป็นแบบไฮเปอร์โบลิก

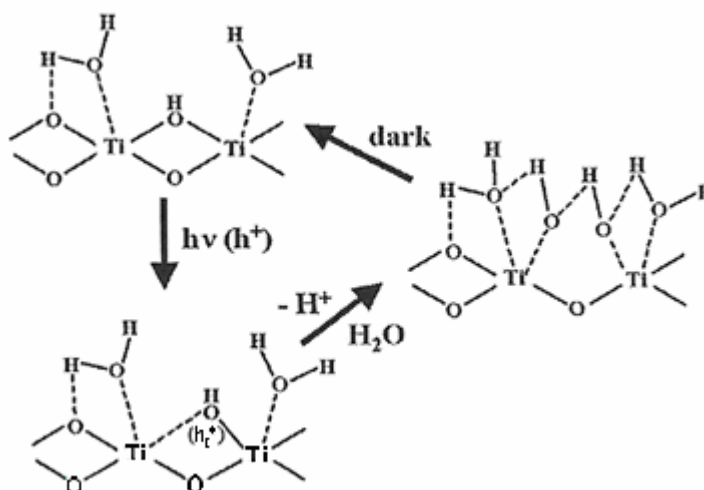
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกและความเป็นไฮโดรฟิลิก เมื่อถูกแสงของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจก (Watanabe et al., 1999) ได้ศึกษาการป้องกันการเกิดฝ้าบนกระจก หรือ Self-cleaning ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การเคลือบบนพอลิเมอร์ โลหะและเซรามิก โดยเฉพาะสมบัติไฮโดรฟิลิกของผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเคลือบบนพื้นผิววัสดุจะกลายเป็นพื้นผิว Self-cleaning โดยโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นแบบอะนาเทส มัมสัมผัสลดลงเมื่อมีการให้รังสียูวี พบว่าเมื่อให้แสงเป็นเวลา 3 ชั่วโมงพื้นผิวจะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก และมัมสัมผัสของผิวเท่ากับศูนย์ และเมื่อมัมสัมผัสต่ำกว่า 5 องศา พื้นผิวจะสามารถป้องกันการเกิดฝ้าได้ซึ่งทำให้กระจกใสขึ้น โดยทั่วไปมัมสัมผัสจะเท่ากับศูนย์เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสมบูรณ์หลังได้รับรังสียูวีเพียงพอ

นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกและความเป็นไฮโดรฟิลิกของผิวเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้ปฏิกิริยาไป (Guan, 2005) ทดลองโดยใช้กระจกเคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าความเป็นไฮโดรฟิลิกจะสัมพันธ์กับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูงขึ้นเมื่อได้ปฏิกิริยาเข้าไปและส่งผลให้ความเป็นโฟโตคะตะลิสต์สูงขึ้นด้วย เนื่องจากซิลิกาที่เข้าไปเข้าไปทำให้ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงขึ้น ไฮดรอกซิลจะเป็นตัวที่ช่วยในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ความเป็นไฮโดรฟิลิกและความเป็นโฟโตคะตะลิสต์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้รังสียูวี ทำให้ประสิทธิภาพในการทำมาสะอาดตัวเองสูงขึ้นด้วย สมบัติไฮโดรฟิลิกจะทำให้หยดน้ำบนราบบนพื้นผิวและหากหยดน้ำยังคงเป็นหยดน้ำทรงกลมบนพื้นผิวแสดงว่าพื้นผิวดังกล่าวมีความเป็นไฮโดรโฟบิก

1.3.4 สมบัติไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ความเป็นไฮโดรฟิลิก (ชอบน้ำ) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกค้นพบโดยบังเอิญในปี 1995 พบว่าฟิล์มผสมด้วยซิลิกามีสมบัติไฮโดรฟิลิกสูงโดยมัมสัมผัสของน้ำประมาณ 0 องศา หลังจากให้รังสียูวี พบว่ารังสียูวีช่วยเพิ่มให้เกิดไฮโดรฟิลิกสูงซึ่งเป็นสมบัติทางธรรมชาติของผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ กลไกของกระบวนการดังกล่าว เป็นผลจากพื้นฐานของการสร้างพื้นผิวหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นมาใหม่ภายใต้รังสียูวี แสดงดังรูปที่ 1.12

สมบัติไฮโดรโฟบิกหรือสมบัติไม่ชอบน้ำและสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือสมบัติชอบน้ำ การอธิบายสมบัติทั้งสองนี้อธิบายได้โดยสมการของ Young ที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวของของแข็ง ของเหลวและไอ สมบัติทั้งสองบ่งบอกด้วยมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับอากาศ และของแข็ง (รูปที่ 1.13) มุมสัมผัส คือ มุม θ วัสดุที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิกถูกนำมาใช้งานหลายๆด้าน เช่น การทำความสะอาดพื้นผิวได้ง่ายขึ้นในปี 2001 สมบัติไฮโดรฟิลิกและ กระบวนการ Photocatalytic self-cleaning glazing กำลังได้รับความนิยมในแถบตลาดยุโรปมีผลิตภัณฑ์ที่มีเคลือบด้วยชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับรังสียูวี ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและ โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และสามารถสลายสารอินทรีย์ หรือดูดซับสารพิษไว้ที่ผิวเพื่อกำจัดออกต่อไป



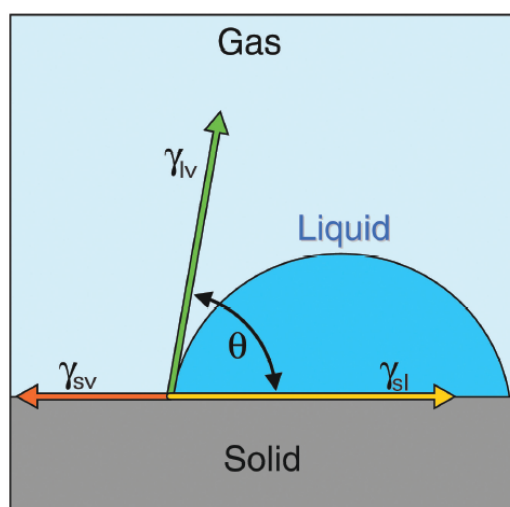
รูปที่ 1.12 การจัดโครงสร้างการจับยึดบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะมีความเป็นไฮโดรฟิลิก (Fujishima and Zhang, 2005)

อิเล็กทรอนิกส์จากการกระตุ้นของแสงจับ โมเลกุลของออกซิเจน ขณะที่หลุมประจุบวก กระจายออกไปยังผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งจะไปจับกับแลตทิซอะตอมออกซิเจน จากนั้นหลุมประจุบวกจับด้วยพันธะอ่อนๆ ระหว่างอะตอม Ti กับแลตทิซออกซิเจนส่วนตัวอื่นๆจะจับกับโมเลกุลของน้ำรวมตัวเป็นหมู่ไฮดรอกซิลใหม่ ซึ่งในภาวะไม่มีแสงหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกดูดซับจากพื้นผิวทำให้เกิดเป็น H_2O_2 หรือ $H_2O + O_2$

กระบวนการเพิ่มความเป็นไฮโดรฟิลิกมีความแตกต่างจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ การนำความเป็นไฮโดรฟิลิกไปใช้ เช่น การป้องกันการเกิดฝ้าบนกระจกหรือแก้วซึ่งฝ้า

ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำในอากาศกลายเป็นหยดน้ำขนาดเล็กจำนวนมากทำให้เกิดการกระเจิงของแสง หากพื้นผิวกระจกมีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง หยดน้ำก็จะไม่เกิดขึ้นแต่หยดน้ำจะรวมตัวกันกลายเป็นฟิล์มบาง ทำให้ไม่เกิดการกระเจิงแสง

ความเป็นไฮโดรฟิลิกช่วยให้เกิดกระบวนการ Self - cleaning บนไทเทเนียมไดออกไซด์และถูกนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมีความหลากหลายมากขึ้น เช่น การนำไปทำโครงสร้างด้านนอกอาคาร การนำไปใช้ทางถนน



รูปที่ 1.13 มุมสัมผัสของของแข็งตามสมการ Young: $\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta$ เมื่อ γ คือ แรงดึงผิวระหว่างทั้งสามเฟส (Gould, 2003)

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์อะตอมที่ประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีตัวได้ปด้วยสารอื่น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงและทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงรักษาเฟสในรูปอะนาเทส ซึ่งเป็นเฟสที่ต้องการเพื่อนำไปเป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์ โดยมุ่งให้ตัวโฟโตคะตะลิสต์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปใช้งานด้านทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning) คือสามารถทำความสะอาดได้ง่าย ในการวิจัยศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา ชนิดและปริมาณของสาร ได้ปชนิดซิลิกาและดีบุกออกไซด์ และนำตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ โดยการสลายตัวของ Methylene blue (MB) ที่ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ โดยให้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เช่น เวลา และความหนาของชั้นฟิล์มของวัสดุโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนกระจกเพื่อให้สามารถทำความสะอาดได้ง่ายขึ้น

1.4 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีสาร โด๊ป เพื่อให้เป็น โฟโตคะตะลิสต์ ได้ดีที่ อุณหภูมิสูง
2. ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของสารเคลือบที่พัฒนาขึ้น
3. ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic reaction) ของสารเคลือบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสมบัติการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของสารเคลือบผิว
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของสารเคลือบ
3. ได้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติในการทำมาความสะอาดด้วยตัวเองที่ดีขึ้นสำหรับใช้ในงานด้านต่างๆ ที่อุณหภูมิสูงๆ

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือ มุ่งศึกษาผลของสาร โด๊ป ในไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ไปมีผลต่อสมบัติการเป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์ของสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยมีตัวแปรคือ อุณหภูมิในการเผา ปริมาณของสาร โด๊ป และนำสารที่สังเคราะห์ได้เคลือบบนกระจกโดยใช้วิธี โซล-เจล และทดสอบการสลายตัวของสารอินดิเคเตอร์ ตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือ เวลาในการทำปฏิกิริยาภายใต้การกระตุ้นด้วยแสง และความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบ แล้วสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสารเคลือบและทดสอบสมบัติการทำมาความสะอาดผิวง่าย

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 สังเคราะห์เตรียมสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และที่มีสารได้ป โดยสังเคราะห์ในระบบสองสาร และระบบสามสารด้วยวิธีการโซล-เจล สังเคราะห์ให้ได้ในรูปของผง อบให้แห้งแล้วนำไปดูสถานะทางความร้อนด้วย DTA หลังจากนั้นนำผงที่ได้เผาที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C และ 700 °C วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดย XRD, SEM และ XRF ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาของสารที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยนำไปเคลือบบนกระจกโซดาไลม์ด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง ทดสอบปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง ทดสอบการย่อยสลายสีของ Methylene blue ภายใต้รังสียูวี (Backlight 50 วัตต์) ความเข้มแสง 3.89 mW/cm² ตรวจสอบการย่อยสลายสีโดยวัดความเข้มซึ่งเปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค UV-VIS สำหรับขั้นตอนที่ 3 นำกระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบ ทดสอบสมบัติการชอบน้ำโดยวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างน้ำกับผิวฟิล์มภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงย่านยูวี และทดสอบประสิทธิภาพในเรื่องการทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning)

ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความหนาของชั้นฟิล์ม และปริมาณตัวได้ป ที่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มบาง ผลต่อสมบัติความชอบน้ำของฟิล์ม และประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเอง

2.2 กระบวนการสังเคราะห์ผง TiO₂, TiO₂/SiO₂ และ TiO₂/SiO₂/SnO₂

ก) การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร เป็นสารตั้งต้นละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีจนครบ 30 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอริก 2 M ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) จนครบ 30 นาที ได้ปั่นน้ำกลั่น ปริมาตร 1.62 มิลลิลิตรลงไป กวนที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งเป็นเจล สัดส่วนของ TTIP:C₂H₅OH:H₂O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล อ้างอิงจากงานวิจัยของ Qingju Liu และคณะ (2002) นำเจลอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเตาเผาอุณหภูมิค่า LINDBERG/BLUE ที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C,

500 °C, 600 °C และ 700 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนการสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 2.1

ข) การสังเคราะห์ผง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นได้ไป Tetraethyl orthosilicate (TEOS) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที หยดกรดไฮโดรคลอริก 2 M ลงไปจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนเป็นเวลา 30 นาที ได้ป่น้ำกลั่นลงไป กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาทีจนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งเป็นเจล สัดส่วนของ TTIP: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: H_2O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล นำเจลอบที่ อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C และ 700 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ ในกรณีนี้ทำการแปรผันปริมาณของ TEOS (5 mol%, 10 mol%, 15 mol%, 20 mol%) และอุณหภูมิในการเผา ขั้นตอนการสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 2.2

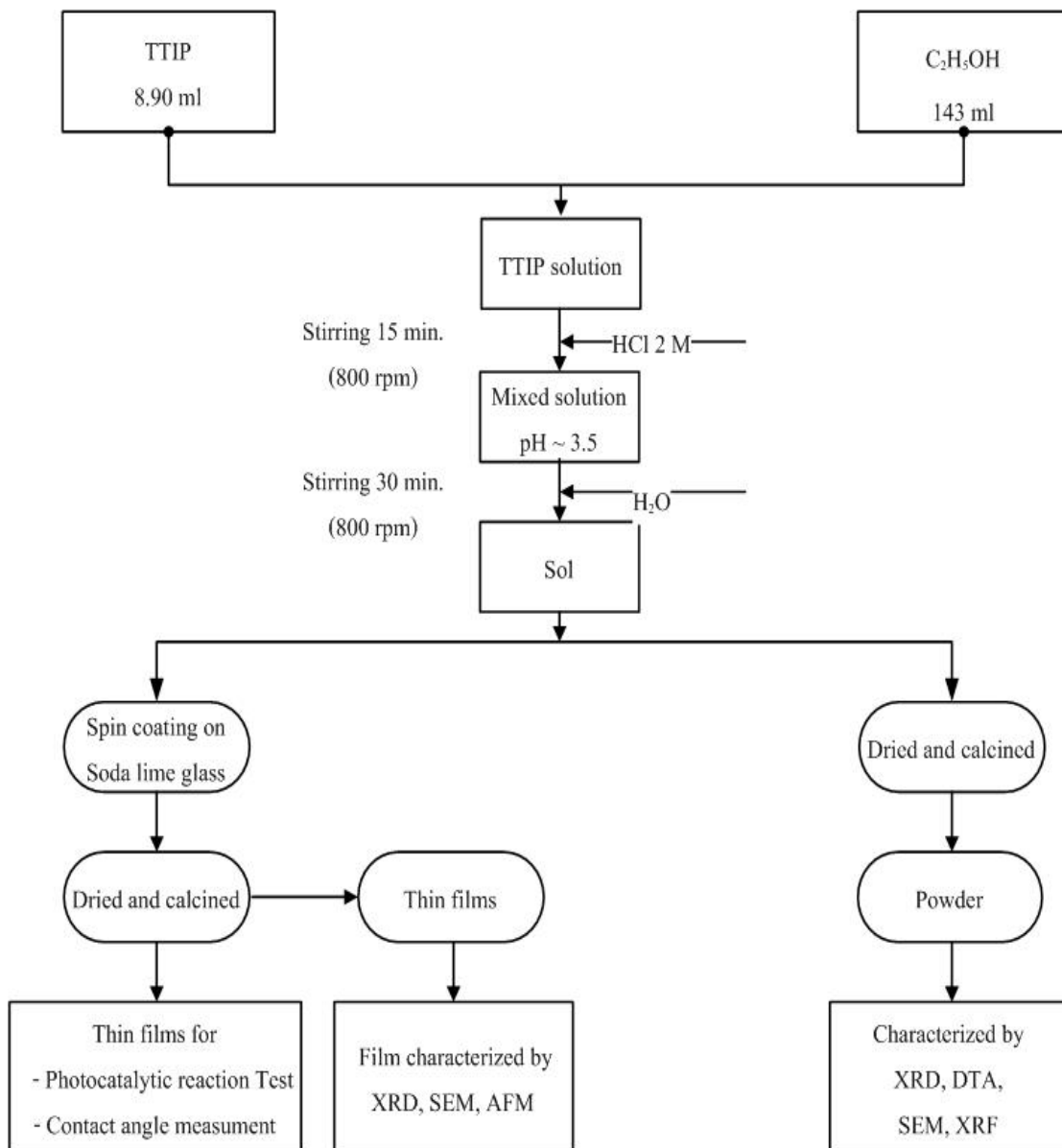
ค) การสังเคราะห์ผง $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ปริมาณ 8.9 มิลลิลิตร ละลายในเอทานอลปริมาตร 143 มิลลิลิตร หลังจากนั้นได้ไป $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที หยดกรดไฮโดรคลอริก 2 M ลงไปปรับ จนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนเป็นเวลา 30 นาที ได้ป่น้ำกลั่นลงไป กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อ นาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาทีจนครบ 1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเป็นเจล สัดส่วนของ TTIP: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: H_2O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล นำเจลอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C และ 700 °C อัตราการเพิ่มของ อุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผง ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ ในกรณีนี้ทำการแปรผันปริมาณของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (1 mol%, 3 mol%, 5 mol%, 10 mol%) และอุณหภูมิในการเผา ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.3

ง) การสังเคราะห์สารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ใช้ Titanium (IV) isopropoxide (TTIP) ละลายในเอทานอลหลังจากนั้นได้ไป Tin (IV) chloride pentahydrate ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (98% บริษัท Fluka Sigma-Aldrich) และ Tetraethyl orthosilicate กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาทีด้วย เครื่องกวนแม่เหล็ก หยดกรดไฮโดรคลอริก 2 M ลงไปปรับจนกระทั่ง pH เท่ากับ 3.5 กวนเป็นเวลา 30 นาที ได้ป่น้ำกลั่นลงไป กวนด้วยความเร็ว 800 รอบต่อนาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาทีจนครบ

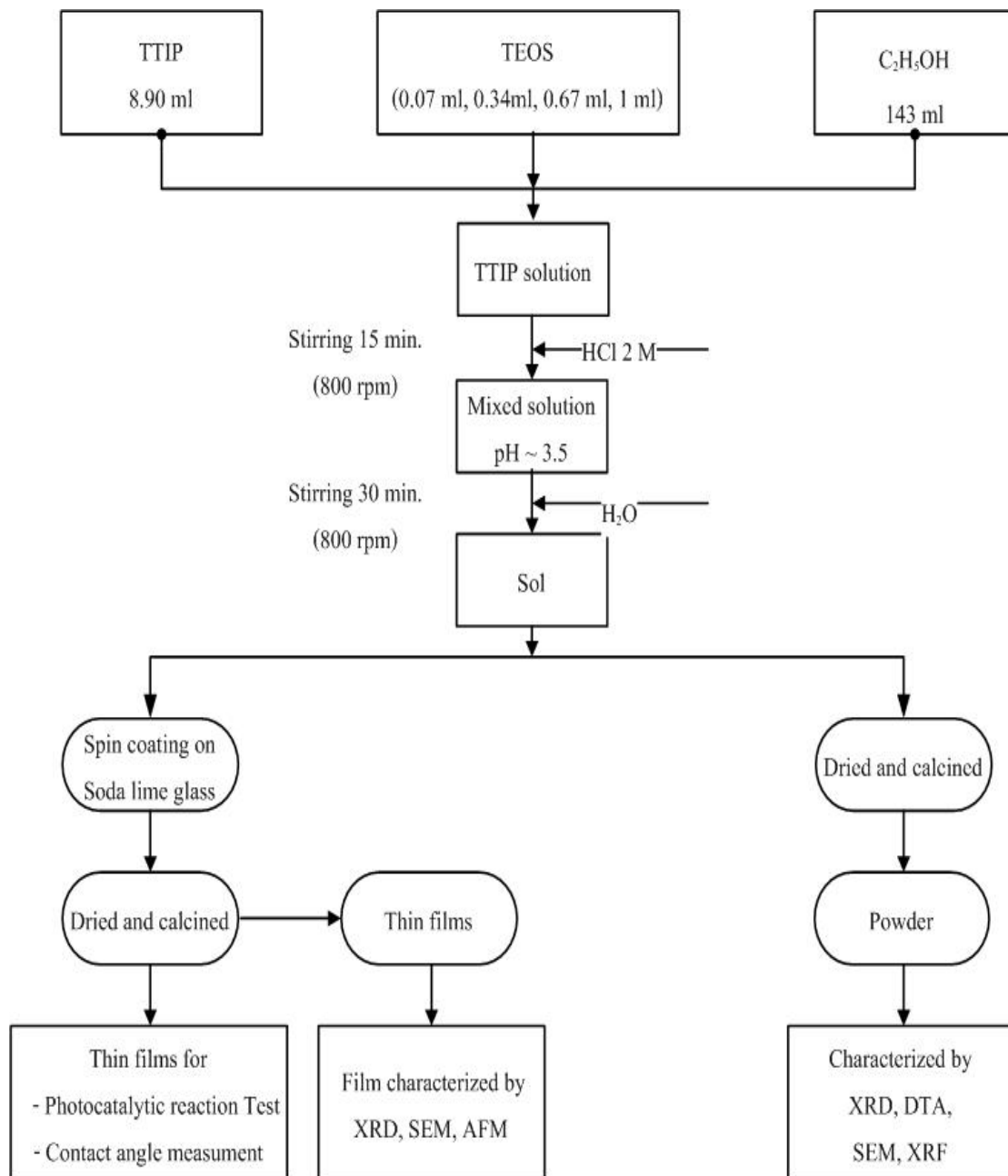
1 ชั่วโมง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเป็นเจล สัดส่วนของ TTIP:C₂H₅OH:H₂O เท่ากับ 1:82:3 อัตราส่วนโดยโมล ขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.4 นำเจลอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เเผาที่อุณหภูมิเดียวกันกับวิธีการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ผงผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมซิลิกอนไดออกไซด์และทินออกไซด์ ในกรณีนี้ทำการแปรผันปริมาณของ TEOS และ SnCl₄·5H₂O ในอัตราส่วนของ TiO₂:SiO₂:SnO₂ เเผาที่อุณหภูมิ 600 °C โดยลำดับการเผา คือ จากอุณหภูมิห้องขึ้นไปถึง 500 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปถึง 600 °C ควบคุมความร้อน ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการเป็นเวลา 20 นาที จะได้ชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบต่อไป

2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

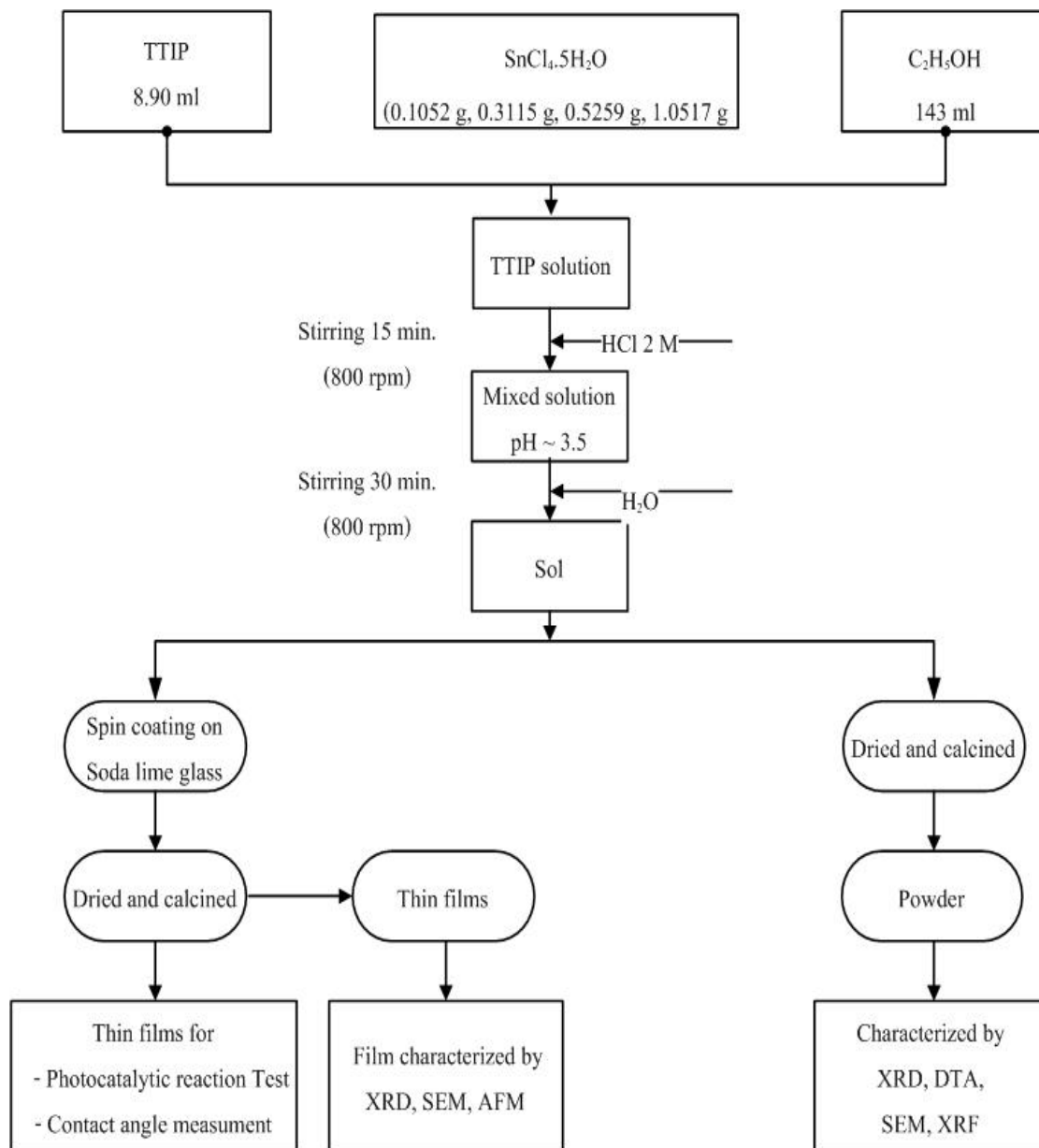
สารเคลือบที่อยู่ในสถานะโซลหลังจากสังเคราะห์เสร็จ ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในการเคลือบใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง โดยใช้กระจกโซดาไลม์เป็นวัสดุฐาน มีขนาด 10 × 10 × 0.3 เซนติเมตร ก่อนทำการเคลือบทำความสะอาดกระจกโดยล้างด้วยอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดสารที่เคลือบติดอยู่ที่ผิวของกระจกให้หลุดออกไป หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที ทำการเคลือบด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (รูปที่ 2.5) ความเร็วในการหมุนเหวี่ยง 1700 รอบต่อนาที ระยะเวลา 30 วินาที ทำการเคลือบจำนวน 1, 2 และ 3 ชั้นเคลือบ ตั้งชิ้นงานทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานเผาภายใต้ภาวะบรรยากาศ ช่วงอุณหภูมิ 300 - 600 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 °C/นาที่ ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมินั้น 2 ชั่วโมง



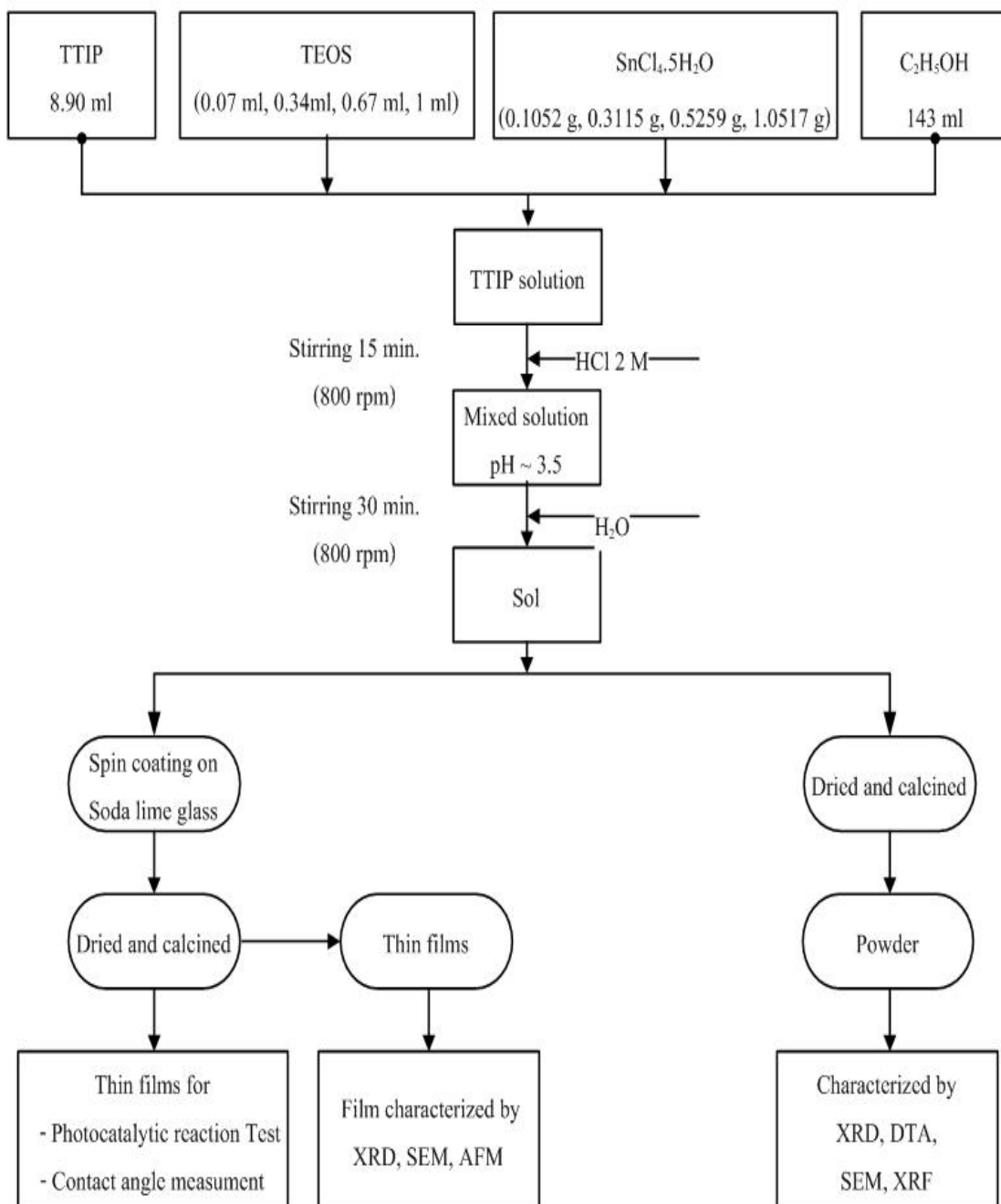
รูปที่ 2.1 การเตรียมผงและสารเคลือบ TiO₂ ด้วยวิธีโซล-เจล



รูปที่ 2.2 การเตรียมสารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ ด้วยวิธีโซล-เจล



รูปที่ 2.3 การเตรียมผงและสารเคลือบ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ด้วยวิธี โซล-เจล



รูปที่ 2.4 การเตรียมผงและสารเคลือบ $TiO_2/SiO_2/SnO_2$ ด้วยวิธี โซล-เจล



รูปที่ 2.5 เครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ความเร็วสูงสุด 1700 รอบต่อนาที

2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงและฟิล์ม

1) X-ray powder diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ศึกษาโครงสร้างผลึกของเฟส และกำหนดหาขนาดของผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในผงและสารเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer ดังสมการที่ (2.1)

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ	t	คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร)
	β	คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
	θ	คือ มุมสะท้อน (องศา)

2) เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

ตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของผง และพื้นผิวฟิล์มความหนาของฟิล์มที่เคลือบ 1, 2 และ 3 ชั้น ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มด้วย EDX และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 และสารได้ป้ที่กระจายอยู่บนฟิล์มด้วยวิธี X-ray mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM; JEOL JSM-5800LV)

3) Differential thermal analysis (DTA)

ตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดผลึกใหม่ของผงที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นอุณหภูมิของการเกิดเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละเฟส เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray diffraction และเป็นข้อมูลเบื้องต้น ด้วยเครื่อง Difference thermal analysis (DTA-50) Shimadzu Corporation, Kyoto

4) Atomic force microscopy (AFM)

ความราบเรียบของพื้นผิวกระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบโฟโตคะตะลิสต์ ที่ความหนา 1, 2 และ 3 ชั้นเคลือบ โดยพื้นที่กวาด $1 \times 1 \mu\text{m}$ และคำนวณหาขนาดอนุภาคของฟิล์ม และความหนาของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ SEIKO รุ่น SPA 400

5) Wavelength dispersive x-ray fluorescence spectrometry (WDXRF)

เทคนิค XRF ตรวจสอบปริมาณของสารได้ป ที่ได้ปลงไปโดยรายงานออกมาในรูปแบบเชิงกึ่งปริมาณ โดยใช้ WDXRF รุ่น PW2400 Philips เนเธอร์แลนด์

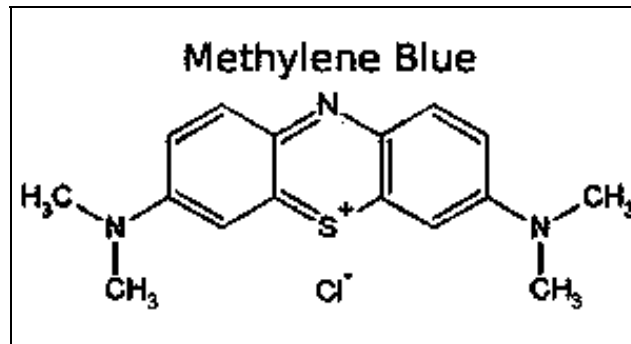
6) Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS)

โดยทำการสแกนที่ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และวัดปริมาณความเข้มข้นของสี Methylene blue เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงยูวี (310 - 400 นาโนเมตร) โดยเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ Methylene blue สามารถดูดกลืนได้

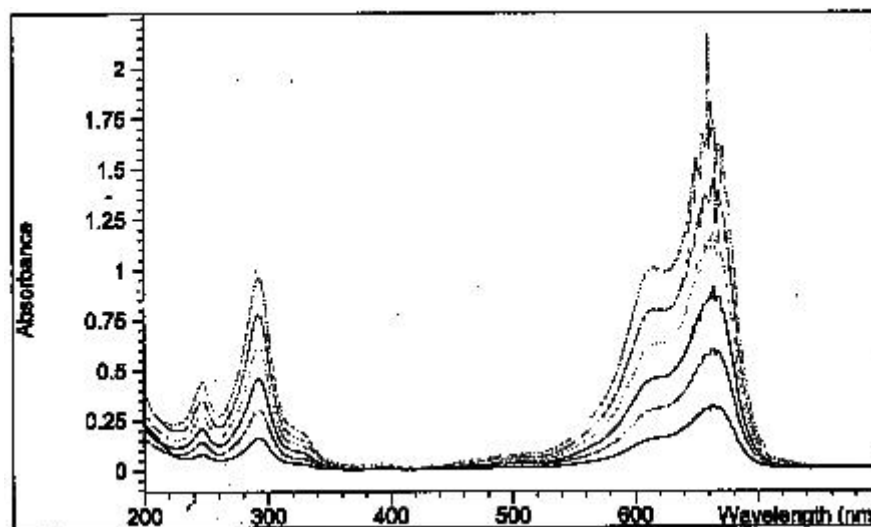
2.5 การทดสอบปฏิกิริยาของฟิล์มในการย่อยสลายสีของ Methylene blue

ก) เตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการนำไปวิเคราะห์ผล โดยเตรียมสารละลาย Methylene blue ที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 2.6 ความเข้มข้นอยู่ในช่วง (0.5×10^{-5}) - (3×10^{-5}) โมลาร์ วัดการดูดกลืนแสงโดยเทคนิค UV-VIS spectroscopy ความยาวคลื่น 200 - 800 นาโนเมตร และเลือกความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรในการวัด Absorbance ของ Methylene blue แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ Methylene blue (www.nilesbio.com : 27/03/51)



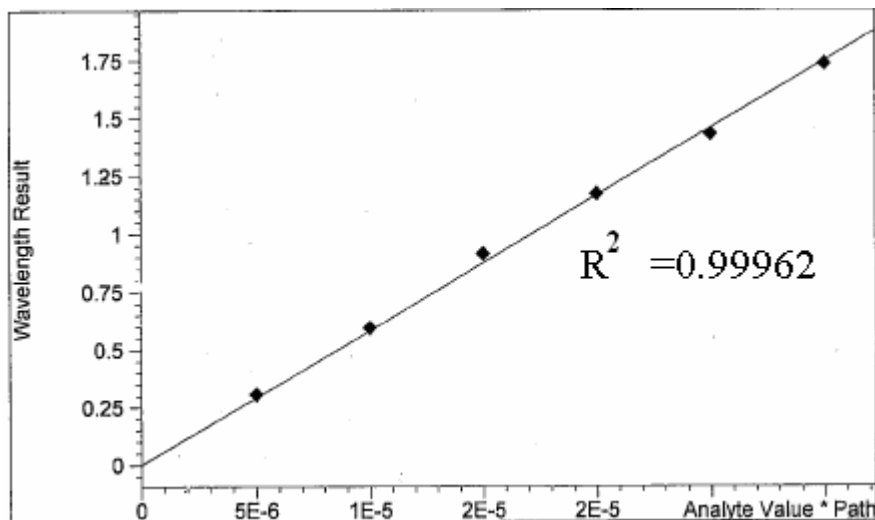
รูปที่ 2.7 Spectrum การดูดกลืนแสงของ Methylene blue ที่ความเข้มข้น $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์

กราฟมาตรฐานของสารละลาย Methylene blue ในช่วง $(0.5 \times 10^{-5}) - (3 \times 10^{-5})$ โมลาร์ แสดงดังในรูปที่ 2.8 ซึ่งเขียนกราฟระหว่าง ความเข้มข้นกับค่า Absorbance มีค่าความถูกต้องของกราฟ $R^2 = 0.99962$ เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแสงยูวี ที่เวลาต่างๆกัน

ทดสอบการสลายสีของ Methylene blue ความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^{-5} โมลาร์ โดย

กำหนดให้

C	แทนด้วยความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์
C_0	แทนด้วยความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue (0.5×10^{-5}) - (3×10^{-5}) โมลาร์ กับค่า Absorbance ที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ข) ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของ Methylene blue

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบปฏิกริยาการย่อยสลายสี Methylene blue อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกโซดาไลม์ ก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบ นำชิ้นงานทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดฝุ่นละอองที่เกาะอยู่ตามผิวหน้าของชิ้นงานออก หลังจากนั้นอบให้แห้งและนำชิ้นงานวางลงในกล่องใส่ตัวอย่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งทำด้วยกระจก ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร หางหน้าชิ้นงานเอาด้านเคลือบด้วยฟิล์มขึ้นเพื่อให้ได้รับรังสียูวี ใส่สารละลาย Methylene blue ความเข้มข้น 1×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 70 มิลลิลิตรลงไปโดยให้สารละลายท่วมชิ้นงาน ให้รังสียูวีขนาด 50 วัตต์ที่มีความเข้มแสง 3.89 mW/cm^2 โดยความยาวคลื่นย่านยูวี (310 - 400 นาโนเมตร) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลาย Methylene blue ทุกๆ 2 ชั่วโมง วัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-VIS) แล้วบันทึกผล เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของ Methylene blue เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การทดลองภาวะละ 3 ตัวอย่าง

การคำนวณหา %Degradation ของ Methylene blue โดยใช้สูตรดังสมการ 2.2

$$\% \text{Degradation} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

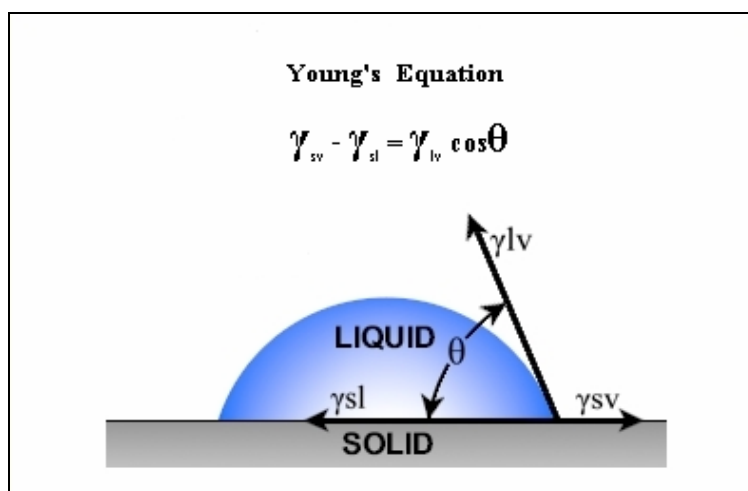
เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์

C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

2.6 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง

การวัดมุมสัมผัสจะแสดงถึงสภาพเปียกน้ำของผิว (Hydrophilic surface) หรือผิวไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) ของผิวเคลือบ โดยมุมสัมผัสมีค่าต่ำแสดงถึงความชอบน้ำของผิวมีมาก ในขณะที่มุมสัมผัสมีค่าสูงแสดงถึงผิวที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้นและลักษณะหยดน้ำมีลักษณะเป็นหยดน้ำกลมมากขึ้น ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนกระจกมีค่ามากกว่า 100 องศา ก็จะมีสภาพคล้ายๆ หยดน้ำที่อยู่บนใบบัว หรือเรียกว่า Lotus effect ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ขั้นตอนการวัดมุมสัมผัสมีดังนี้

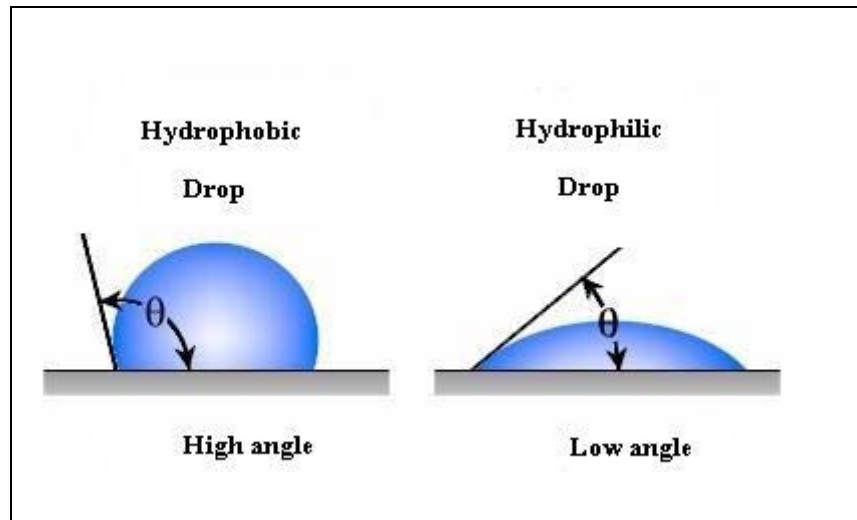
ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2×4 เซนติเมตร ทำความสะอาดล้างด้วยน้ำกลั่นอบให้แห้ง 100 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปวางไว้ในที่มีดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาทดสอบ โดยการหยดน้ำกลั่นลงบนผิวฟิล์มกระทำภายใต้แสงที่มองเห็น (Visible) และรังสียูวี (จากหลอด Black light ขนาด 36 วัตต์) ซึ่งกระทำภายในกล่องดำทึบ เป็นเวลา 30 นาที วัดมุมสัมผัสหรือมุม θ ดังรูปที่ 2.9 ทุกๆ 5 นาที บันทึกผล โดยใช้เครื่อง CAM-PLUS Tantac



รูปที่ 2.9 มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวกับของแข็ง

(www.ramehart.com/goniometers/contactangle.htm : 12/03/51)

โดย	θ	คือ มุมสัมผัส (องศา)
	γ^{sl}	คือ พลังงานอิสระหน้าสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว
	γ^{sv}	คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของของแข็ง
	γ^{lv}	คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของของเหลว



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบขนาดของมุมสัมผัสของสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและสมบัติไฮโดรโฟบิกของพื้นผิวฟิล์ม

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

จากการทดลองสังเคราะห์สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของผงและฟิล์มโดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเผา ความหนาของชั้นฟิล์ม และปริมาณของสารได้ป SiO_2 และ SnO_2 เพื่อปรับปรุงให้สมบัติโฟโตคะตะลิสต์ที่ดีขึ้นแล้วยังส่งผลต่อสมบัติการชอบน้ำของฟิล์มโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบอยู่บนกระจกโซดาไลม์ ทำให้กระจกสามารถทำความสะอาดได้ง่ายขึ้นกว่ากระจกโดยทั่วไป

3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

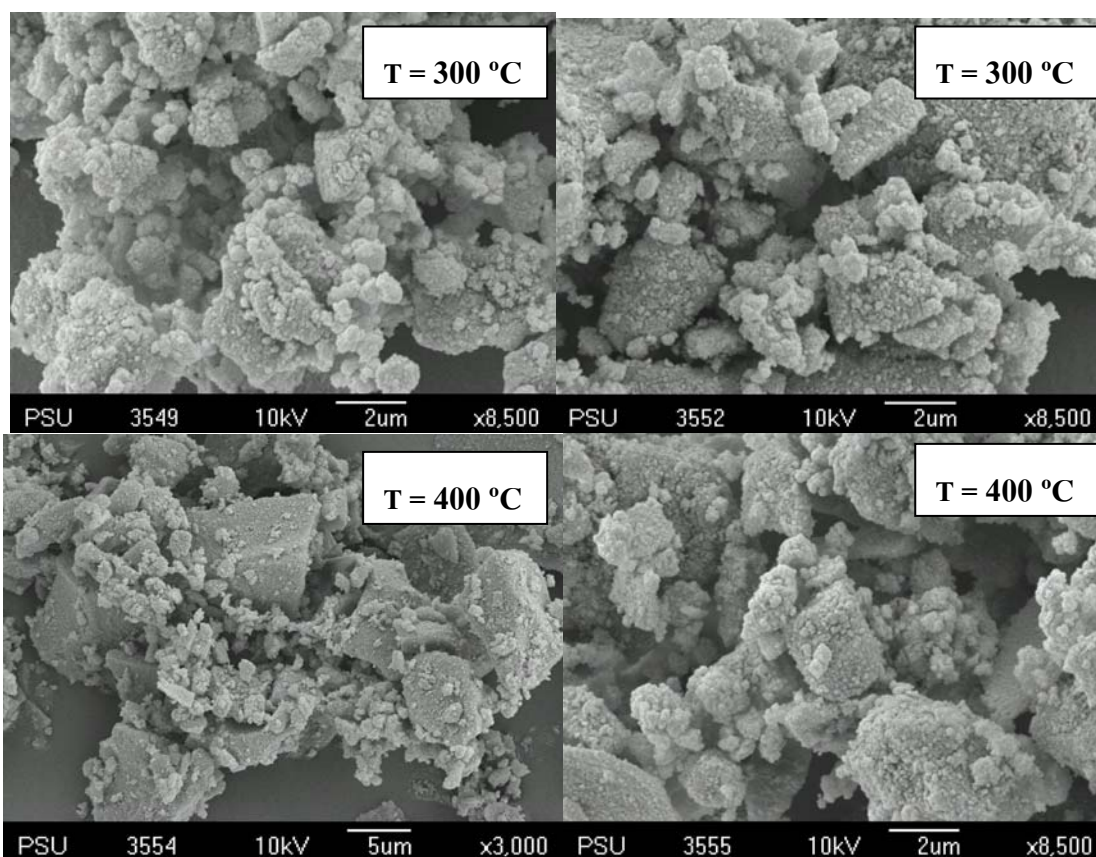
3.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์ผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการแปรผันอุณหภูมิที่ใช้เผาตั้งแต่ 300 - 700 °C ลักษณะของผงมีสีขาว ใส ดังรูปในที่ 3.1 พบว่าผงมีลักษณะค่อนข้างกลมจับตัวกันเป็นก้อนดังรูปที่ 3.2 เมื่อนำผงไปวิเคราะห์โครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ผลด้วย XRD และ DTA พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีเฟสอะนาเทสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300 - 600 °C แสดงดังรูปที่ 3.4 เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นถึง 700 °C โครงสร้างเฟสรูไทล์เริ่มเกิดขึ้นผสมกับเฟสอะนาเทสโดยปรากฏพีคของรูไทล์ ที่ 2θ เท่ากับ 27 ° และผลจากการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA (รูปที่ 3.3) พิกัดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 120 °C เนื่องจากการระเหยของน้ำและการสลายของสารอินทรีย์ และพิกัดความร้อนเกิดขึ้นที่ 302 °C ซึ่งเป็นการเกิดโครงสร้างของเฟสอะนาเทสจากโครงสร้างอะมอร์ฟัส เมื่ออุณหภูมิ 412 °C เกิดพิกัดความร้อนนั้น มีการเติบโตของเกรนนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD คือเกิดเฟสอะนาเทสที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C

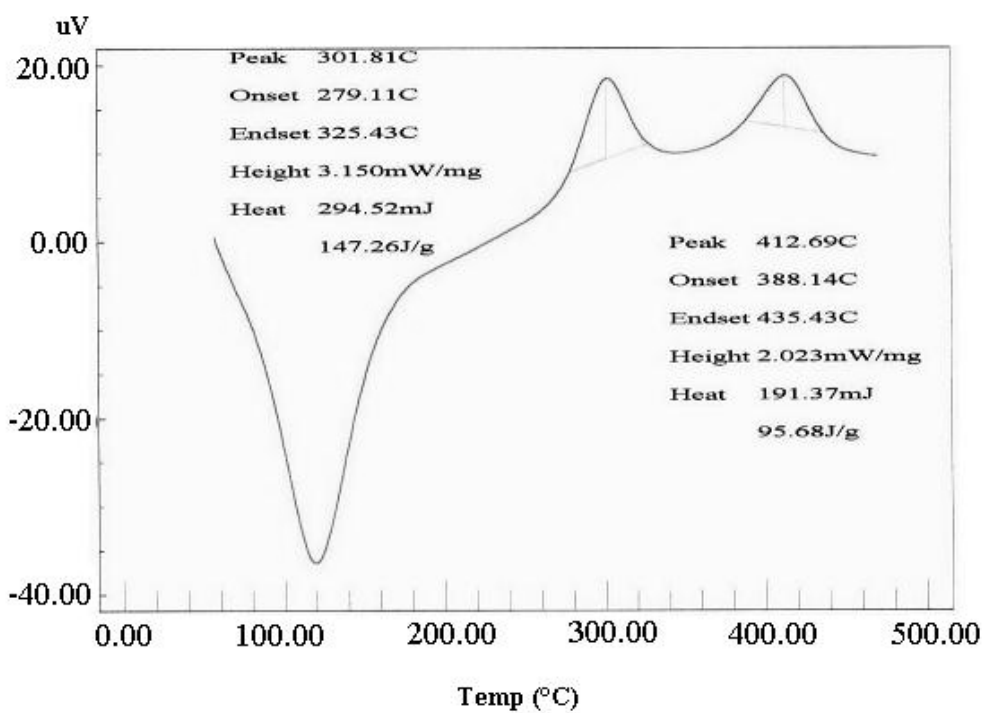
จากตารางที่ 3.1 แสดงขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดผลึก 8.27-41.38 นาโนเมตร สังเกตเห็นว่าขนาดผลึกจะใหญ่ขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นเพราะมีการเติบโตของเกรน จาก 300 - 700 °C ขนาดผลึกของเฟสรูไทล์เท่ากับ 41.56 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดโตกว่าขนาดผลึกของเฟสอะนาเทส ทำให้พื้นที่ผิวของเฟสรูไทล์น้อยกว่า



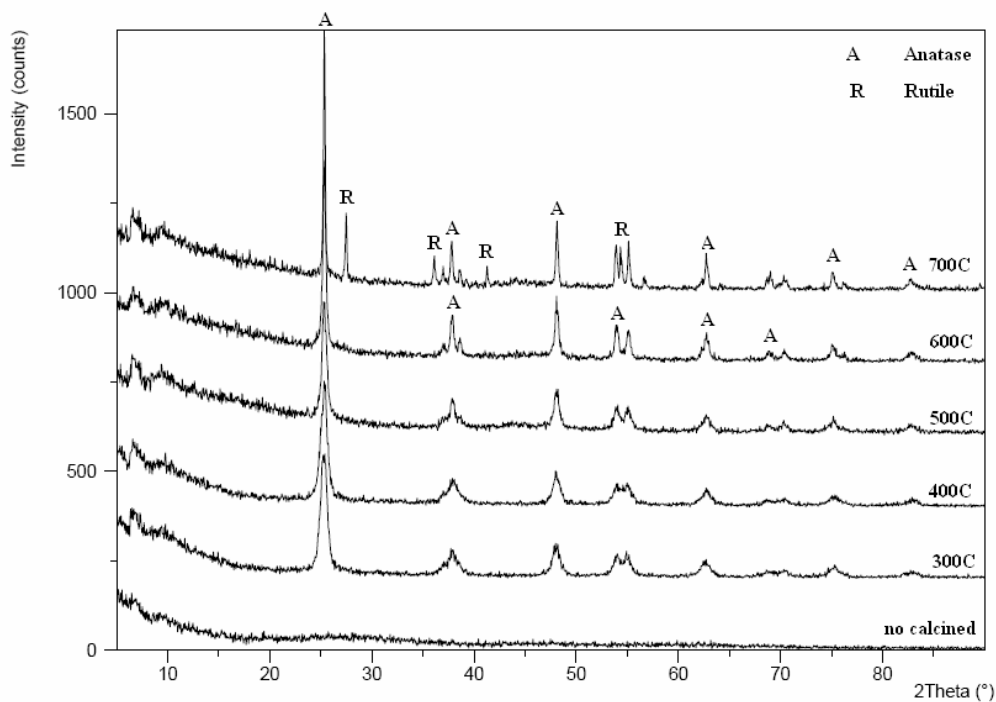
รูปที่ 3.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเผาที่ 500 °C



รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย SEM ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิเผา 300 °C และ 400 °C



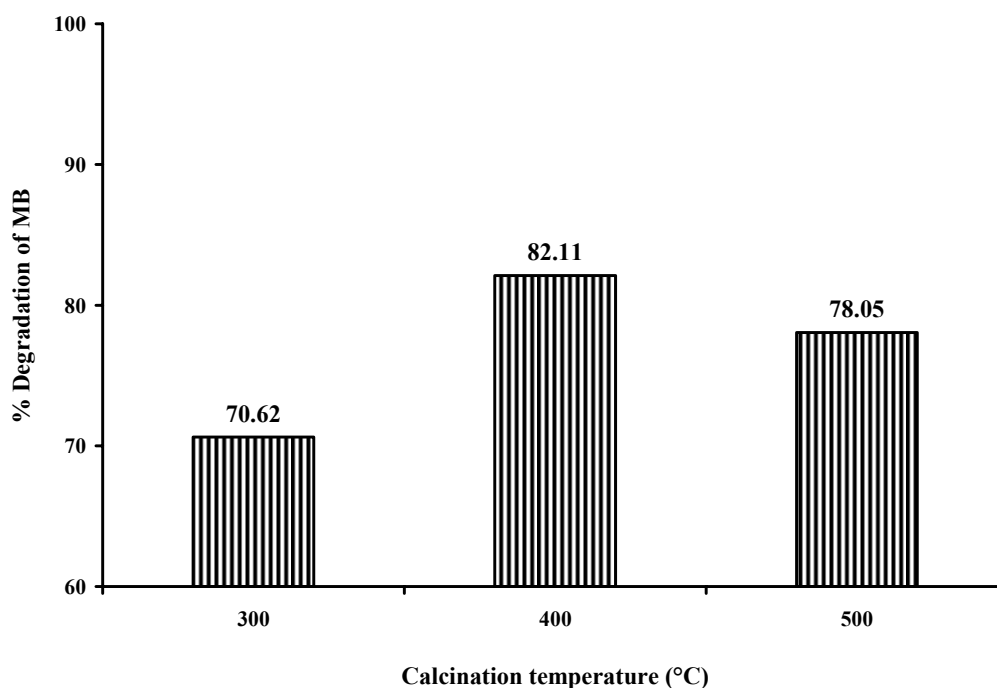
รูปที่ 3.3 กราฟ DTA ของผงเจด TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออุณหภูมิเผา $105 - 700^\circ\text{C}$

3.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากรูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผา กับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสี Methylene blue ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลกราฟจากการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิ 400 °C ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสี Methylene blue สูงสุด และที่อุณหภูมิ 300 °C ย่อยสลายสี Methylene blue ต่ำสุด เนื่องจากประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของตัวโฟโตคะตะไลติกและเฟสที่เกิดขึ้น (Bickley et al., 1991; Zhang et al., 2000) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอะนาทาส จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโครงสร้างเฟสอื่นๆ (Tanaka et al., 1991; Andersson et al., 2002) ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส คือ อุณหภูมิในการเผา โดยทั่วไปโครงสร้างอะนาทาสจะเกิดที่อุณหภูมิ 300 - 600 °C และเริ่มปรากฏโครงสร้างรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 °C จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (รูปที่ 3.4) พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ปรากฏเฟสของอะนาทาสและเฟสจะชัดเจนหรือมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นผลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C จะสูงกว่าที่ 300 °C (รูปที่ 3.5)



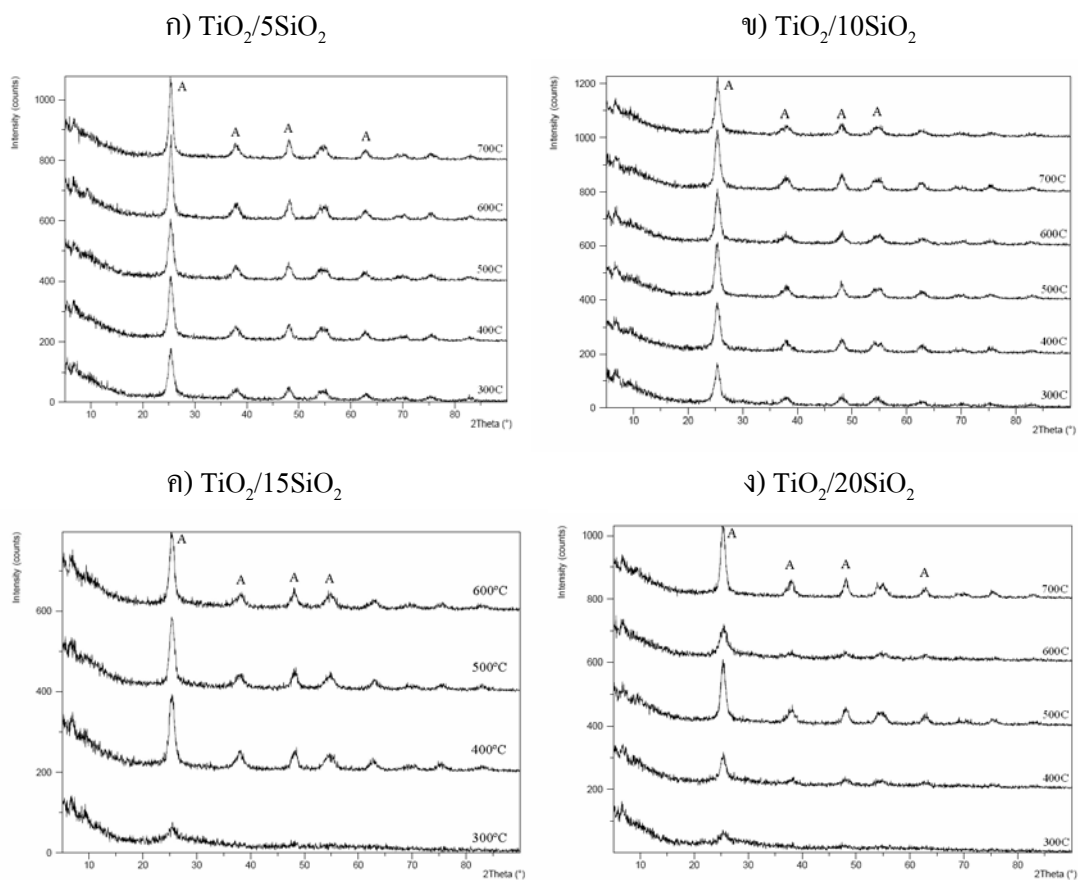
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับอัตราการย่อยสลายสีของ Methylene blue เมื่อได้รับแสงยูวี 6 ชั่วโมง

3.2 อิทธิพลของสารโด๊ป (Dopants)

3.2.1 อิทธิพลของสารโด๊ป SiO_2 ต่อการเปลี่ยนเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

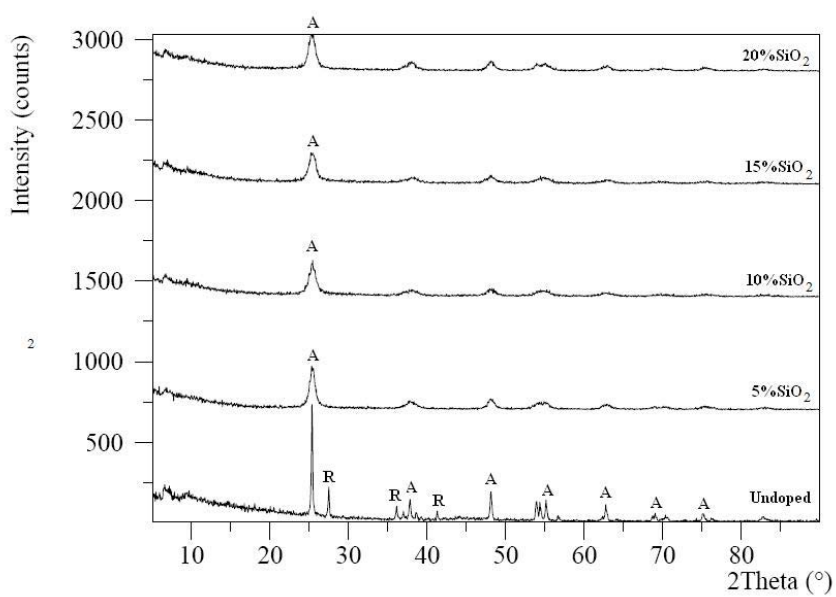
เมื่อโด๊ป SiO_2 ลงในสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 300 - 700 °C วิเคราะห์โครงสร้างเฟสของผงที่เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 3.6) ของผง TiO_2 เมื่อโด๊ป SiO_2 ลงไปทำให้เฟสอานาเทสเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 700 °C ยังคงเฟสอานาเทสไว้โดยไม่ปรากฏเฟสรูไทล์ขึ้นมา เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ TiO_2 ที่ไม่ได้โด๊ปด้วย SiO_2 (รูปที่ 3.4) ซึ่งประกอบด้วยเฟสอานาเทสและเฟสรูไทล์ผสมกันในอัตราส่วนร้อยละ 66 : 34 แต่ในขณะเดียวกันเมื่อปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกจะลดลง ดังเกิดได้จากความสูง (Intensity) จาก XRD โดยพิจารณาจากพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ มีความสูงของพีคสูงที่สุดและค่อยๆ ลดลงเมื่อปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของ SiO_2 จะไปขัดขวางการเปลี่ยนโครงสร้างของ TiO_2 จากอานาเทสไปเป็นเฟสรูไทล์ (Maeda et al., 2005) ยับยั้งการเติบโตของเกรนและส่งผลให้ขนาดของผลึกมีขนาดเล็กกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย จากผลตารางที่ 3.2 เรายังพบว่าสูตรที่มีการโด๊ป 15 mol% SiO_2 และ 20 mol% SiO_2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 °C จะไม่พบพีคใดๆเลย (รูปที่ 3.6 ก-ง) แสดงว่าโครงสร้างยังคงเป็นอสัณฐาน ดังนั้นปริมาณของ SiO_2 ที่มากเกินไปจนทำให้ขัดขวางการเกิดเฟสอานาเทสที่อุณหภูมิต่ำ

ปริมาณของสารโด๊ป SiO_2 มีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ XRD spectrum ในรูปที่ 3.6 เปรียบเทียบปริมาณ SiO_2 ต่อการเกิดเฟสอานาเทสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ $2\theta = 25.50^\circ$ ซึ่งเป็นพีคหลักของเฟสอานาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 °C และเมื่อปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้น ความสูงของพีค XRD ในรูปที่ 3.7 จะต่ำและกว้างมากขึ้นแสดงว่าเกิดผลึกของเฟสอานาเทสลดลง



รูปที่ 3.6 XRD spectrum ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ป็นสาร SiO₂ ก) /TiO₂/5SiO₂

ข) TiO₂/10SiO₂ ค) TiO₂/15SiO₂ ง) TiO₂/20SiO₂



รูปที่ 3.7 XRD พีคของผง TiO₂/SiO₂ เมื่ออุณหภูมิเผา 700 °C ที่ 5 mol%SiO₂ - 20 mol%SiO₂

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สามารถนำมาคำนวณหาร้อยละของอะนาเทสและรูไทล์ (ตารางที่ 3.1) ได้ดังสมการ 3.1, 3.2 และ 3.3 (Sheng et al., 2006)

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (3.1)$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (3.2)$$

$$W_b = k_b A_b / (k_a A_a + A_r + k_b A_b) \quad (3.3)$$

เมื่อ W_a , W_r และ W_b คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟสอะนาเทส รูไทล์ และบรูไคต์ ตามลำดับ A_a , A_r และ A_b คือ ความเข้มของพีคอะนาเทส (101) พีครูไทล์ (110) และพีคบรูไคต์ (121) ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์ k_a และ k_b มีค่าเท่ากับ 0.886 และ 2.721 ตามลำดับ จากการคำนวณหาปริมาณเฟสอะนาเทส และรูไทล์ ที่อุณหภูมิ 700 °C มีปริมาณ 66 % และ 34 % ตามลำดับ ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกที่เตรียมได้อยู่ในระดับนาโนเมตร ขนาด 8.48 - 27.66 นาโนเมตร และพบว่า การได้ไป SiO_2 ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ขนาดผลึกลดลง นอกจากนี้ทำให้เฟสรูไทล์เกิดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C

ตารางที่ 3.1 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง TiO_2 เหนือที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ขนาดผลึก (nm)		ปริมาณเฟส (%)	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
300	8.27	-	100	0
400	33.10	-	100	0
500	23.64	-	100	0
600	33.10	-	100	0
700	41.38	41.56	66	34

ตารางที่ 3.2 ขนาดผลึกและปริมาณเฟสของผง $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เหนืออุณหภูมิต่างๆ

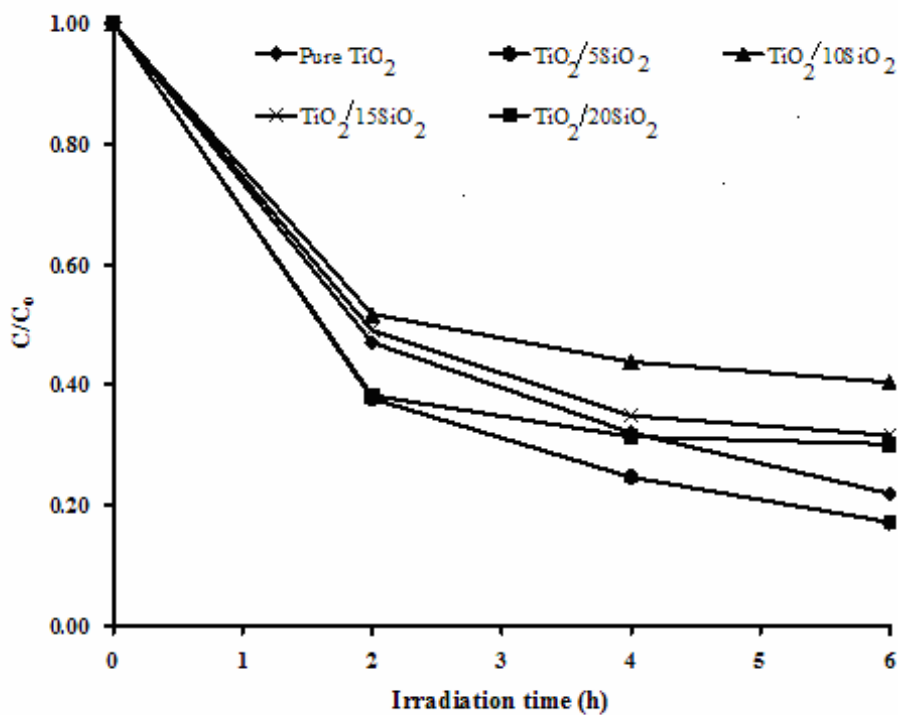
อุณหภูมิ (°C)	ขนาดผลึก (nm)		ปริมาณเฟส (%)	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
$\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$				
300	8.48	-	100	-
400	10.34	-	100	-
500	13.47	-	100	-
600	11.84	-	100	-
700	11.84	-	100	-
$\text{TiO}_2/10\text{SiO}_2$				
300	20.69	-	100	-
400	9.19	-	100	-
500	8.27	-	100	-
600	9.19	-	100	-
700	9.19	-	100	-
$\text{TiO}_2/15\text{SiO}_2$				
300	-	-	Amorphous	-
400	-	-	Amorphous	-
500	9.18	-	100	-
600	10.34	-	100	-
700	10.34	-	100	-
$\text{TiO}_2/20\text{SiO}_2$				
300	-	-	Amorphous	-
400	8.48	-	100	-
500	9.19	-	100	-
600	27.66	-	100	-
700	9.19	-	100	-

3.2.2 อิทธิพลของสารโด๊ป SiO_2 ต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

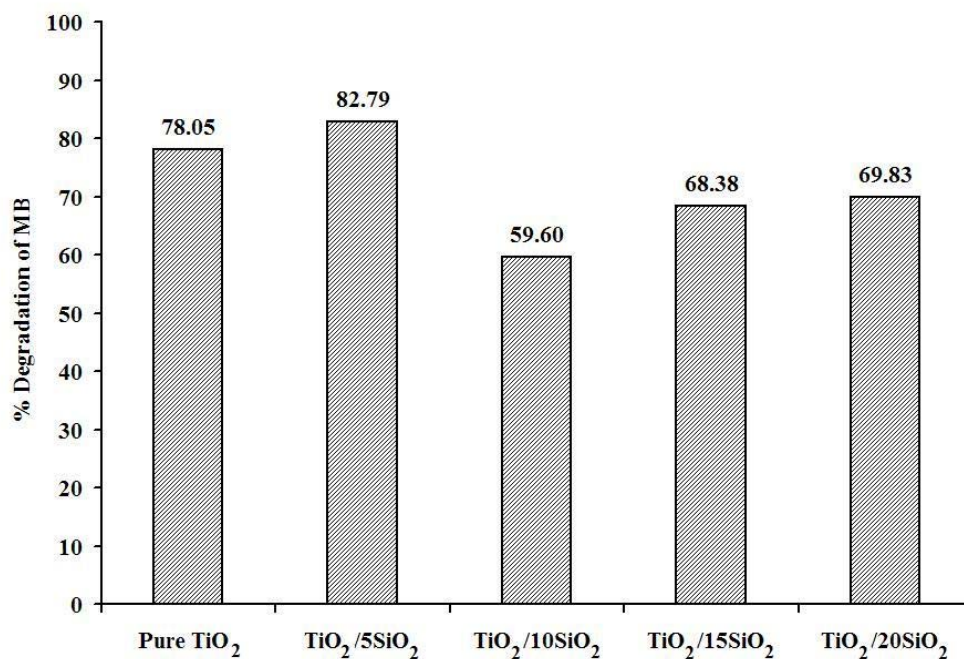
ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และมีสารโด๊ป โดยทำเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 300 – 500 °C จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD (รูปที่ 3.7) พบว่าช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดโครงสร้างอะนาเทสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด สำหรับฟิล์มที่มีสารโด๊ปชนิด SiO_2 ความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์หรือความเป็นเฟสอะนาเทสจะน้อยหรือเกิดขึ้นได้น้อยนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างอสังฐานของ SiO_2 จะไปมีอิทธิพลยับยั้งการเกิดการเกิดโครงสร้างอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 400 °C และ 500 °C ความเป็นผลึกก็สูงขึ้นตาม จากรูปที่ 3.8 แสดงการลดลงของความเข้มข้นของ Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีกระตุ้นที่เวลาดั้งแต่ 0- 6 ชั่วโมง โดยมีฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ เป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์ ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการรับแสงเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของ Methylene blue จะถูกสลาย เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกหรือปฏิกิริยาที่มีแสงกระตุ้นการทำงานของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$

อุณหภูมิเผา 500 °C ให้ผลทางปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่มีการโด๊ป SiO_2 5 mol% โดยอัตราการย่อยสลาย Methylene blue สูงกว่าฟิล์มที่ไม่โด๊ป SiO_2 เล็กน้อย เมื่อโด๊ป SiO_2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ผลปฏิกิริยาการย่อยสลายของ Methylene blue ลดลง ทั้งนี้เพราะการโด๊ป SiO_2 เข้าไปให้อยู่ในรูปของ Binary oxide ทำให้พื้นผิวมีสภาพเป็นกรดและเกิดหมู่ Hydroxyl บนพื้นผิวและเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลของ Methylene blue ได้มากขึ้น (Guan et al., 2003) และการโด๊ป SiO_2 ทำให้ขนาดผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กลง ทำให้พื้นที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นการปริมาณ SiO_2 เพียง 5 mol% สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกได้ SiO_2 มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า มีแถบช่องว่างพลังงาน 11.7 eV ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ นอกจากนี้การโด๊ป SiO_2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างอสังฐานมากขึ้น ซึ่งทำให้ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของเฟสอะนาเทสในไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นการโด๊ป SiO_2 มากเกินไปทำให้ผลทางปฏิกิริยาที่ 10 - 20 mol% SiO_2 ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ได้โด๊ป

พิจารณารูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย Methylene blue ที่เวลาได้รับรังสียูวีผ่านไป 6 ชั่วโมง ฟิล์มที่โด๊ปด้วย SiO_2 เพียง 5 mol% ย่อยสลายได้ 82.79 % ซึ่งสูงกว่าฟิล์มที่ไม่โด๊ป SiO_2 และสูงกว่าฟิล์มที่โด๊ป SiO_2 ในปริมาณมากขึ้นเพราะการเพิ่มปริมาณ SiO_2 จะทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างที่เป็นอะมอร์ฟัส และประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกต่ำลง



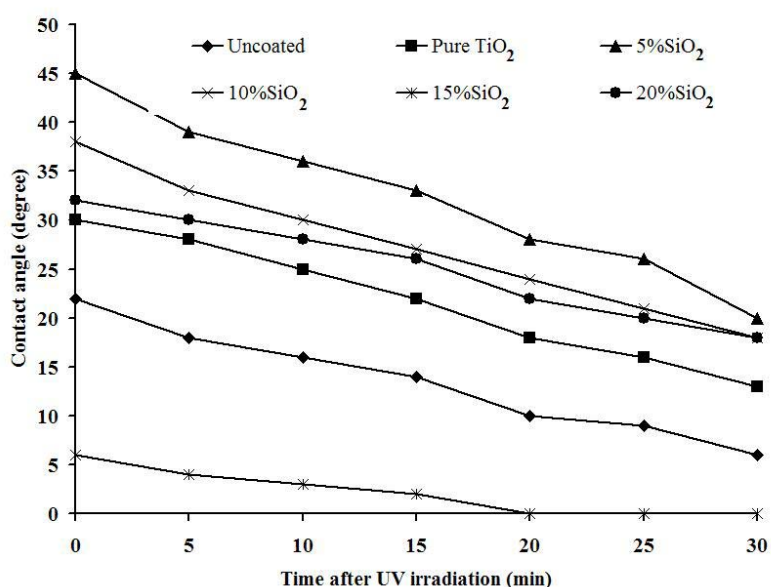
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์อัตราส่วน C/C_0 ของ Methylene blue โดยฟิล์ม TiO_2/SiO_2 ภายเวลาในการรับแสง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ปริมาณตัวได้ปี SiO_2 กับเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีของ Methylene blue ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}C$ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบและเวลาที่ได้รับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

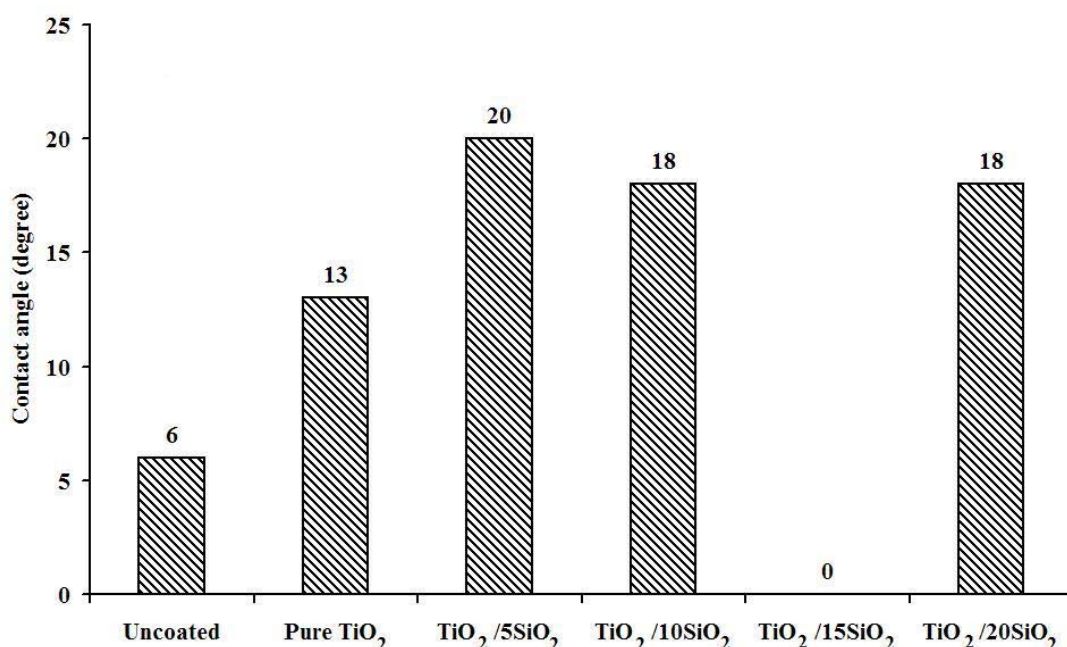
3.2.3 อิทธิพลของสารได้ป SiO_2 ต่อสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilicity)

มุมสัมผัสเป็นการวัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของของเหลวไอและพื้นผิวของแข็ง ซึ่งการวัดจะใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จะแสดงถึงความเป็นไฮโดรฟิลิกหรือความเป็นไฮโดรโฟบิก โดยพื้นผิวที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกค่ามุมสัมผัสจะมีค่าต่ำ ส่วนพื้นผิวที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกค่ามุมสัมผัสจะสูง มุมสัมผัสของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (อุณหภูมิ 500 °C และฟิล์มเคลือบ 3 ชั้น) แสดงดังรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 พบว่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเวลาในการรับรังสียูวีเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อฟิล์มที่มีสมบัติโฟโตคะตะไลติก ได้รับแสงจะเกิดอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก ทำให้ไอเล็กตรอนของ Ti ลดลงจาก Ti(IV) สู่ภาวะ Ti(III) และหลุมประจุบวกจะออกซิไดส์ กับ O_2 ทำให้อะตอมของออกซิเจนหายไปเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เมื่อหยดน้ำลงไปโมเลกุลของน้ำเข้าไปจับ ทำให้พื้นผิวดูดซับและเกิดหมู่ OH ทำให้พื้นผิวมีสมบัติไฮโดรฟิลิก โดยมุมสัมผัสของกระจกที่ไม่เคลือบฟิล์ม เท่ากับ 6 ° ฟิล์ม TiO_2 เท่ากับ 13 ° และ 15 mol% SiO_2 มุมสัมผัสเป็น 0 ° มุมสัมผัสของกระจกที่ไม่เคลือบด้วยฟิล์มบางมีมุมต่ำ เนื่องจากในกระจกโซดาไลมี SiO_2 เป็นส่วนผสมทำให้พื้นผิวของกระจกมีสมบัติไฮโดรฟิลิก เมื่อเพิ่มปริมาณ SiO_2 5 - 20 mol% มุมสัมผัสจะลดลงจาก 20 ° ถึง 0 ° ผลของ SiO_2 ต่อสมบัติไฮโดรฟิลิกของผิวฟิล์ม โดยมีกลไกของการเพิ่มความชื้นให้แก่ผิวฟิล์ม โดย Yu และ Zhao (2001) ศึกษาพบว่าสมบัติไฮโดรฟิลิกสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเพิ่มความชื้นให้กับพื้นผิว



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับเวลาที่รับรังสียูวี ของกระจกและกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ป SiO_2 ในปริมาณต่างๆที่อุณหภูมิ 500 °C และมี 3 ชั้นเคลือบ

ดังนั้นจากการศึกษาสมบัติไฮโดรฟิลิก โดยวัดมุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมที่โด๊ปด้วย SiO_2 15 mol% แสดงสมบัติซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก มีมุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา และจากรูปที่ 3.10 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SiO_2 ความเป็นไฮโดรฟิลิกจะเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความเป็นไฮโดรฟิลิกของฟิล์มที่โด๊ป SiO_2 ลงไปในปริมาณน้อย คือ 5-10 mol% ให้มุมสัมผัสน้อยกว่ากระจกที่ไม่เคลือบและฟิล์มที่ไม่มีการโด๊ป อาจเกิดจากปริมาณของ SiO_2 น้อยเกินไปจึงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติด้านไฮโดรฟิลิก แต่เมื่อเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้สมบัติไฮโดรฟิลิกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้สมบัติไฮโดรฟิลิกยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆด้วย เช่น ความเรียบของพื้นผิว ขนาดของผลึก เป็นต้น

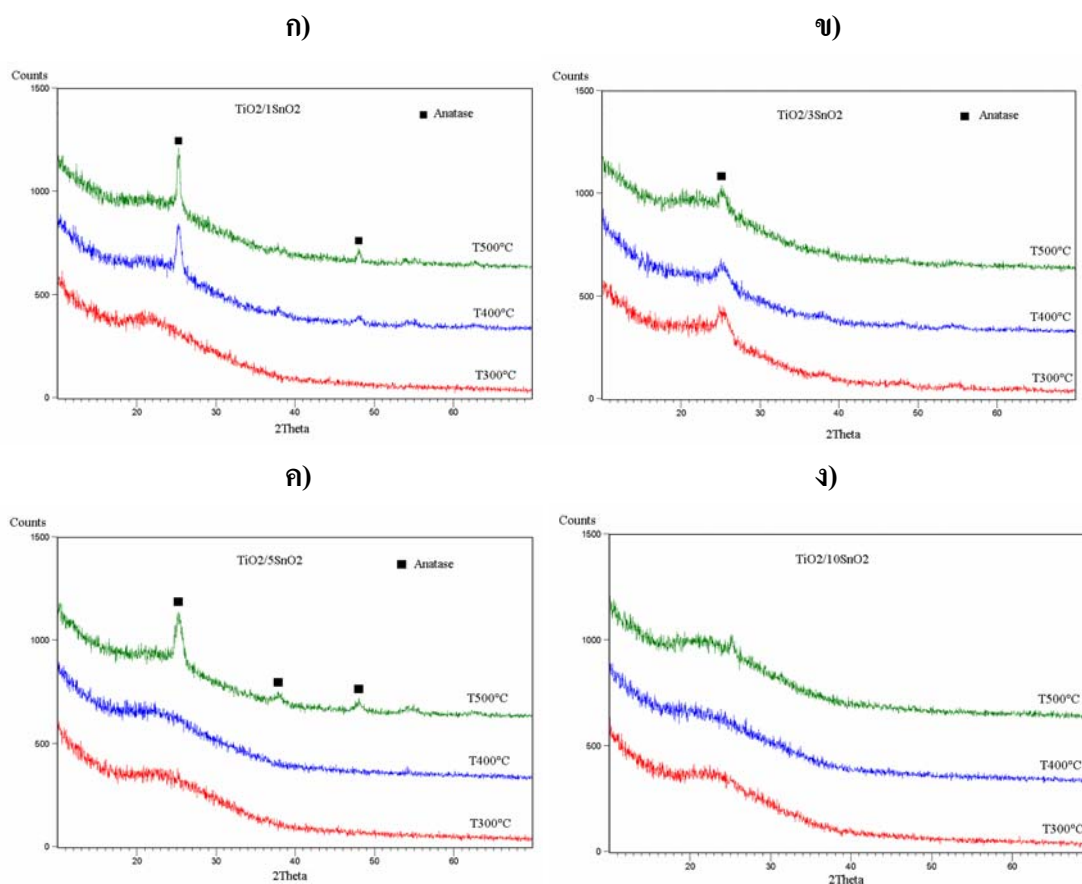


รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของผิวกระจกที่ไม่เคลือบ เคลือบด้วย TiO_2 และ TiO_2 ที่โด๊ปด้วย SiO_2 ที่ปริมาณต่างๆภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสียูวี เป็นเวลา 30 นาที

3.2.4 อิทธิพลของสารโด๊ป SnO_2 ต่อการเปลี่ยนเฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่อโด๊ป SnO_2 ในสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาฟิล์มจาก $300\text{ }^\circ\text{C}$ เป็น $400\text{ }^\circ\text{C}$ เฟสอานาเทสจะเกิดขึ้นและที่ $500\text{ }^\circ\text{C}$ เฟสอานาเทสจะเกิดได้สมบูรณ์ที่สุด ในขณะที่ปริมาณของ SnO_2 มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เช่นกัน โดยจะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ในฟิล์มโครงสร้างเฟสอานา

เพศของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดขึ้นน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากพีค XRD ที่มุม $2\theta = 25.40^\circ$ เปรียบเทียบความสูงของพีคต่อยอดคลงในรูปที่ 3.12 ก ถึงรูปที่ 3.12 ง เมื่อเพิ่มปริมาณ SnO_2 ถึง 10 mol% ฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัสทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม



รูปที่ 3.12 ผล XRD ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไป SnO_2 1-10 mol% และอุณหภูมิ 300 °C 400 °C และ 500 °C ก) $\text{TiO}_2/1\text{SnO}_2$ ข) $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ ค) $\text{TiO}_2/5\text{SnO}_2$ ง) $\text{TiO}_2/10\text{SnO}_2$

ตารางที่ 3.3 ขนาดผลึกของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เตรียมด้วยวิธีโซล - เจล ที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample	ขนาดผลึก (nm)		
	300 °C	400 °C	500 °C
$\text{TiO}_2/1\text{SnO}_2$	Amorphous	15.67	62.61
$\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$	17.72	12.53	8.95
$\text{TiO}_2/5\text{SnO}_2$	Amorphous	Amorphous	10.45
$\text{TiO}_2/10\text{SnO}_2$	Amorphous	Amorphous	20.90

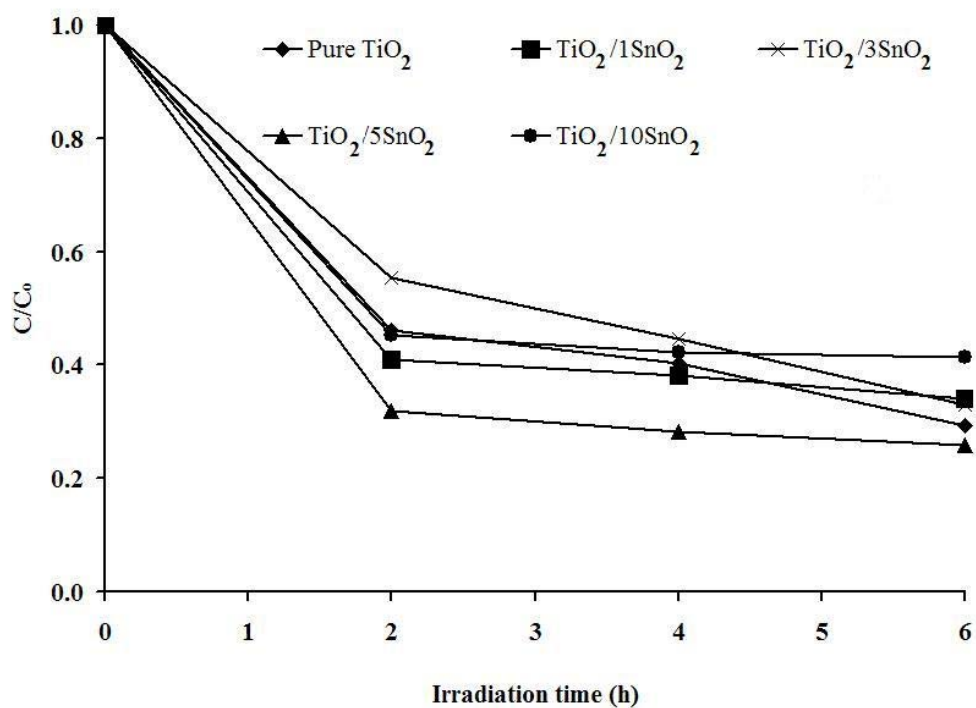
3.2.5 อิทธิพลของสารโด๊ป SnO₂ ต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และมีสารโด๊ป SnO₂ โดยทำการเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 300 – 500 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผา ที่ 300 °C จะเกิดเฟสอะนาเทสและส่วนใหญ่ยังคงโครงสร้างออสถันฐานอยู่ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 °C และ 500 °C ความเป็นผลึกของเฟสอะนาเทสจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาการย่อยสลายสีของ Methylene blue ภายใต้รังสียูวี เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ Methylene blue เปลี่ยนไปดังรูปที่ 3.13 ณ อุณหภูมิ 500 °C ความเข้มข้นของ Methylene blue ลดลงเกือบเป็น 0 โมลาร์และ 3 mol%SnO₂ จะย่อยสลายสีของ Methylene blue ได้ดีที่สุดในรูปที่ 3.13) คือสามารถย่อยสลายภายในเวลา 6 ชั่วโมงได้สูงสุด 98.13 % ที่ความหนาฟิล์ม 3 ชั้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์เฟสของฟิล์มที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิเผา 500 °C พบเฟสอะนาเทสเกิดได้สูงสุดและมีขนาดผลึกเล็กสุด (ตารางที่ 3.3) ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเมื่อได้รับรังสียูวีและเกิด OH• มากขึ้นโดยสามารถดูดซับสีของ Methylene blue ไว้ที่ผิวดังรูปที่ 3.14 และสามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกต่อไป และอีกเหตุผลหนึ่งคือ การโด๊ป SnO₂ ลงไปจะช่วยทำให้อิเล็กตรอนของอะนาเทสที่ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแล้ว ถูกกักไว้ที่ผิวของ SnO₂ และทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยกลับลงมารวมตัวกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ซาลง (โดยปกติ SnO₂ จะมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.8 eV และอะนาเทส 3.2 eV (Vinodgopal et al., 1995))

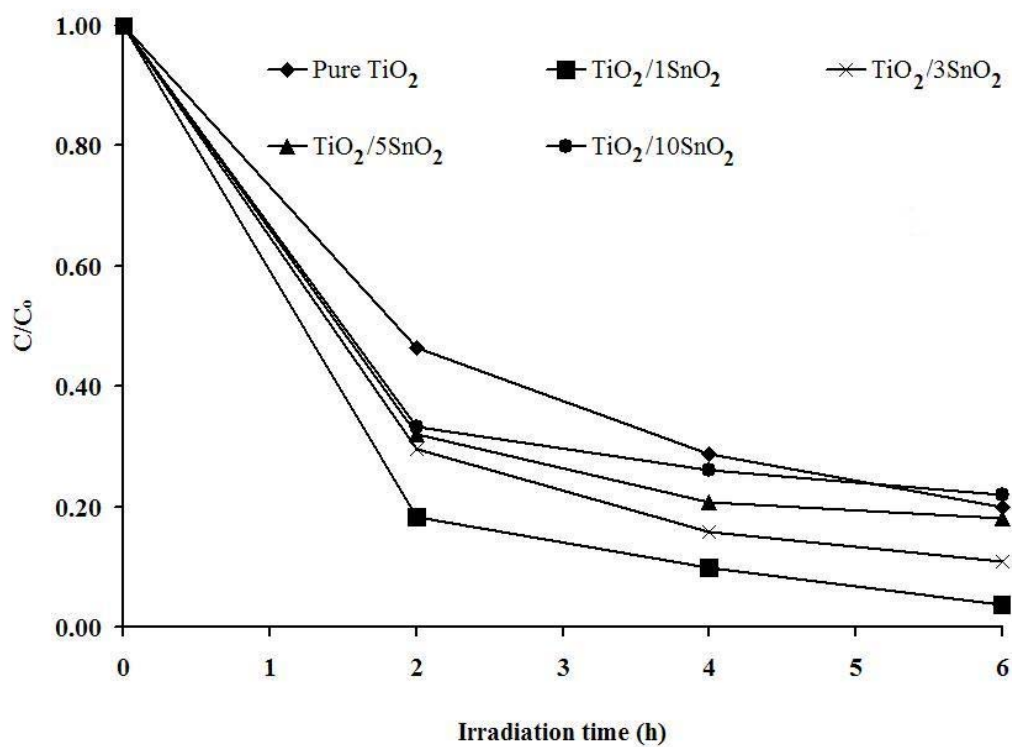
ฟิล์มที่มีปริมาณของ SnO₂ ที่โด๊ปลงไปเพียง 1 - 3 mol% จะแสดงการย่อยสลายสาร Methylene blue ได้สูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 5 - 10 mol% การย่อยสลายสาร Methylene blue จะลดลงเนื่องจากปริมาณของ SnO₂ มากเกินไปจะไปขัดขวางการทำงานของ TiO₂ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้โด๊ปด้วย SnO₂ และเมื่อดูผลของ XRD เฟสอะนาเทสซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกมากที่สุด พิกของเฟสอะนาเทสกลับลดความเข้มข้นลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO₂ ลงไป นี่ก็เป็นอีกเหตุผลที่ทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลง

จากตารางที่ 3.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย Methylene blue โดยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โด๊ปด้วย SnO₂ พบอีกว่าความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกสูงขึ้นและสูงขึ้นตามอุณหภูมิเผา

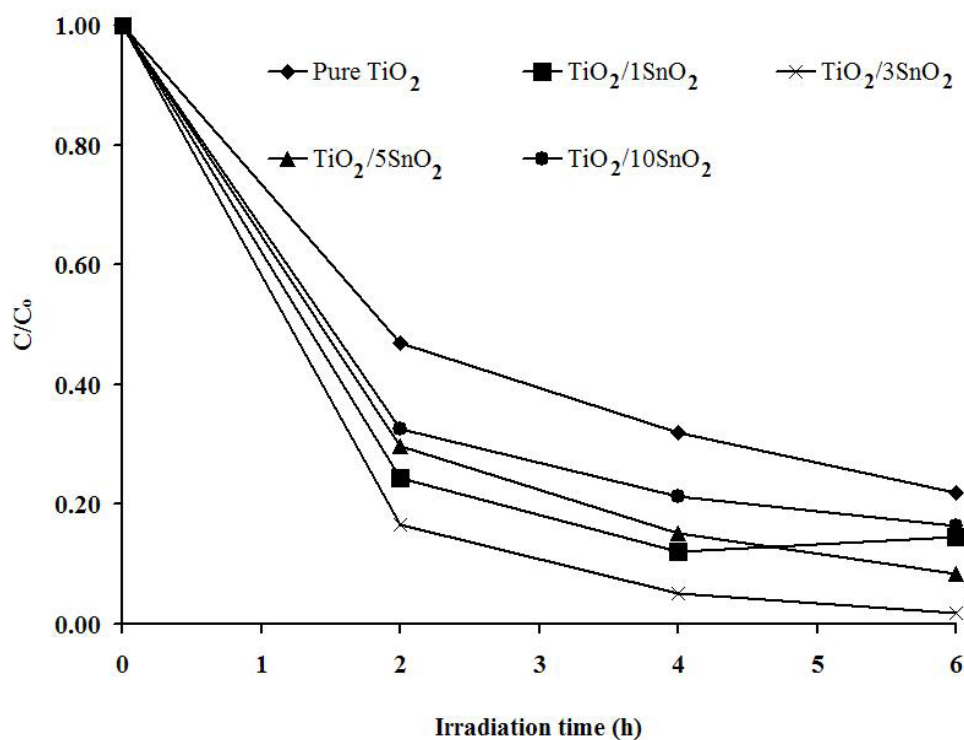
ñ) 300°C $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$



ñ) 400°C $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$



ค) 500°C _TiO₂/SnO₂

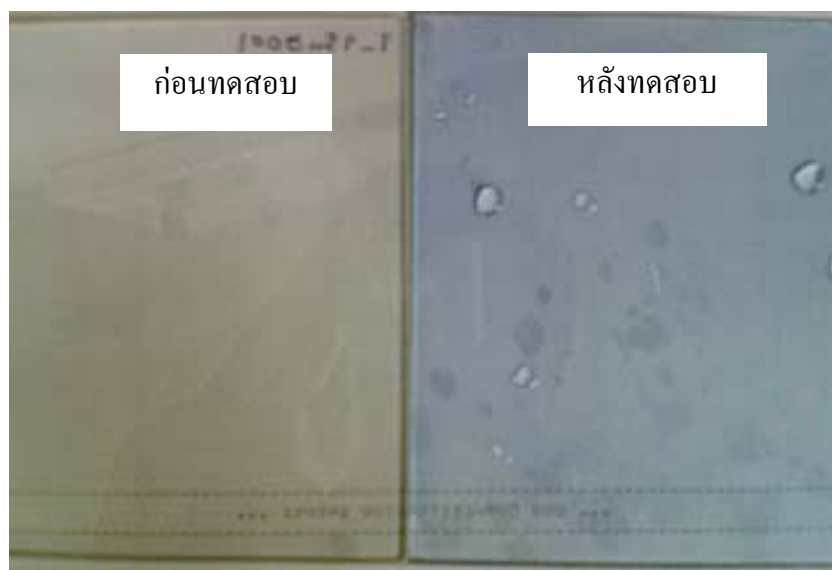


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความเข้มข้น C/C_0 ของ Methylene blue โดยฟิล์ม TiO₂/SnO₂ ภายใต้เวลาในการรับรังสียูวีของฟิล์ม ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ ที่อุณหภูมิสังเคราะห์ ก) 300 °C ข) 400 °C และ ค) 500 °C

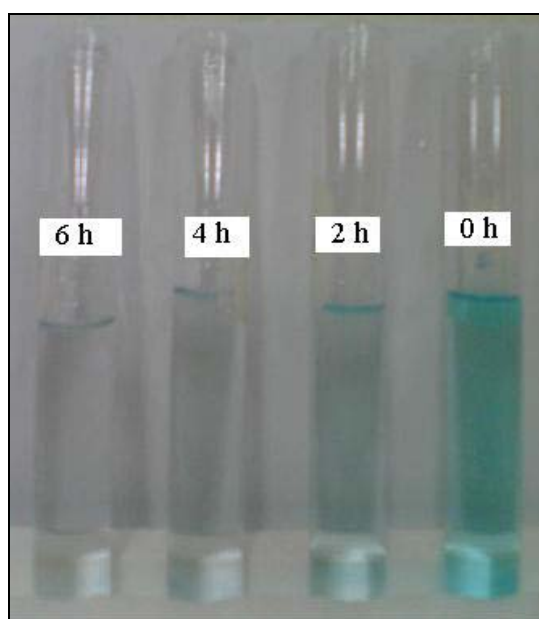
ตารางที่ 3.4 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสี Methylene blue (MB) โดยฟิล์ม TiO₂/SnO₂ ที่เวลาได้รับรังสียูวี 6 ชั่วโมง อุณหภูมิสังเคราะห์ 300, 400 และ 500 °C

Sample	% Degradation of MB								
	300 °C			400 °C			500 °C		
	1 L	2L	3L	1L	2L	3L	1L	2L	3L
TiO ₂ /1SnO ₂	59.68	57.67	65.95	64.19	83.45	96.38	62.39	78.81	85.53
TiO ₂ /3SnO ₂	54.18	84.87	67.06	64.34	83.85	89.02	54.62	77.29	98.13
TiO ₂ /5SnO ₂	47.45	56.44	74.21	63.91	72.70	81.83	61.17	79.26	91.53
TiO ₂ /10SnO ₂	49.18	41.85	58.55	62.84	72.41	77.94	50.83	76.41	83.66

**หมายเหตุ L = number of coating cycles



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานกระจกก่อนและหลังทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก โดยทดสอบการย่อยสลายสี Methylene blue ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์



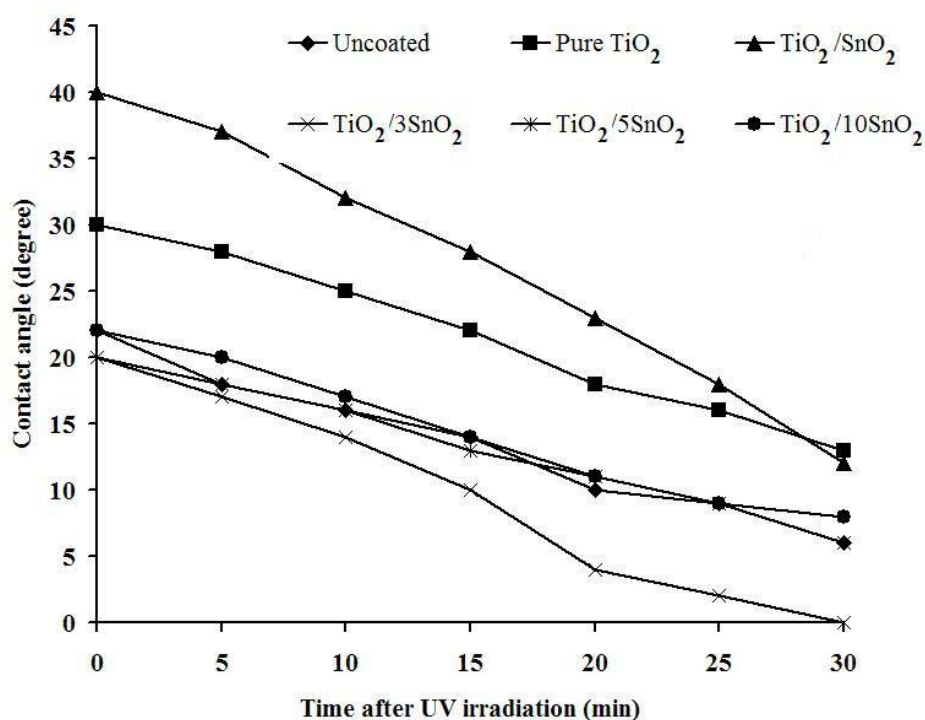
รูปที่ 3.15 ความเข้มข้นของ Methylene blue ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับรังสียูวีที่เวลา 0, 4, 2 และ 6 ชั่วโมง โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย 3 mol%SnO₂ เป็นโฟโตคะตะลิสต์

3.2.6 อิทธิพลของสารโด๊ป SnO₂ ต่อสมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์ม

การศึกษาสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือสมบัติชอบน้ำ สามารถวัดได้จากมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวฟิล์ม เพื่อบ่งบอกว่าพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ TiO₂/SnO₂ สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ง่ายหรือไม่ สำหรับพื้นผิวที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก หรือ ซุปเปอร์ไฮโดรฟิลิก (Super-

hydrophilicity) มุมสัมผัสก็จะน้อย น้ำก็จะแผ่ราบไปกับพื้นผิว ทำให้พื้นผิวสามารถทำความสะอาดได้ง่าย (Self-cleaning surface) (Liu et al., 2002)

จากรูปที่ 3.16 มุมสัมผัสที่วัดได้เมื่อได้รับรังสี พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมุมสัมผัสลดลง โดยฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ มีค่าเป็น 0° เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ซึ่งมุมสัมผัสของน้ำมีค่าต่ำกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีโด๊ปสาร SnO_2 สำหรับการโด๊ปปริมาณ SnO_2 น้อยๆ คือ 3-5 mol% สามารถปรับปรุงสมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์ม TiO_2 ได้ ซึ่งมีผลไปเพิ่มหมู่ Hydroxyl ให้กับฟิล์ม (Liu et al., 2002) เมื่อโด๊ป SnO_2 ในปริมาณ 10 mol% สรุปว่าการโด๊ปสาร SnO_2 3 mol% สามารถเพิ่มสมบัติไฮโดรฟิลิกของกระจกโซดาไลม์ได้

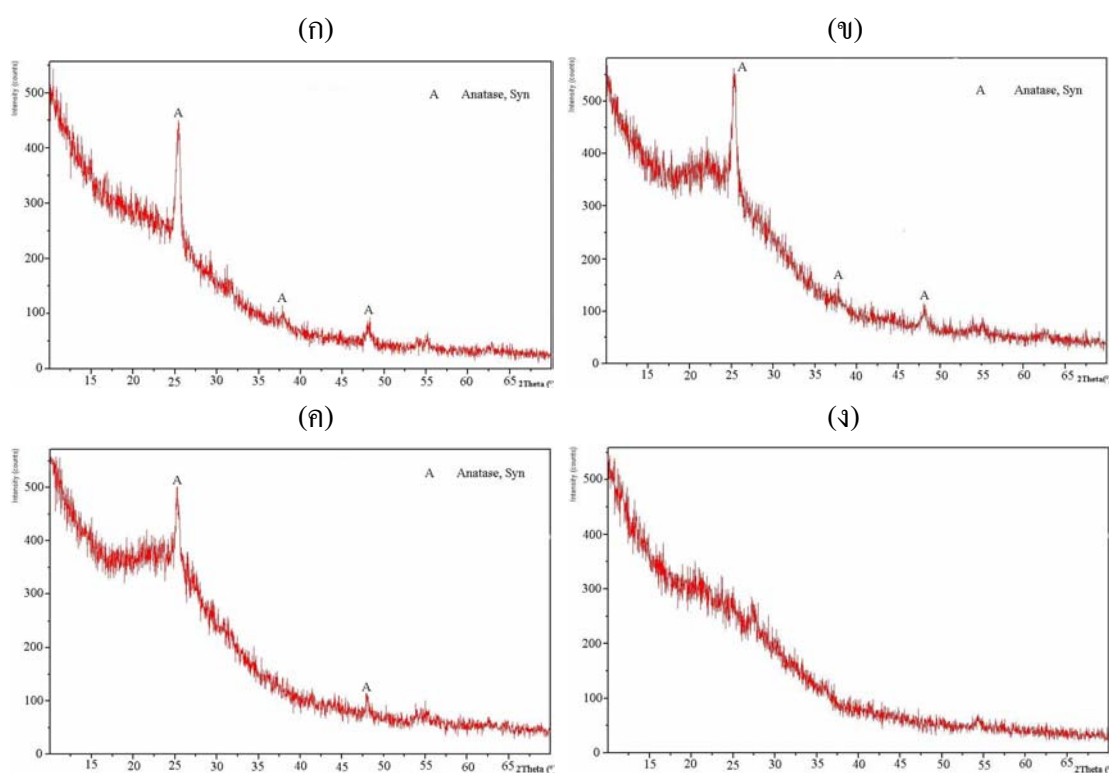


รูปที่ 3.16 มุมสัมผัสเมื่อได้รับรังสีของกระจกและกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย SnO_2 ในปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิสังเคราะห์ 500°C และเคลือบ 3 ชั้น

3.2.7 อิทธิพลของสารโด๊ป $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

จากผล XRD ดังรูปที่ 3.17 ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารโด๊ปชนิด SiO_2 และ SnO_2 โดยอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{TiO}_2:\text{SiO}_2$ เท่ากับ 5:1, 6.7:1, 10:1 และ 20:1 และแปรผันปริมาณ

ของ SnO_2 เเผาที่อุณหภูมิ 600°C และเมื่อปริมาณของ SiO_2 คงที่เรพบว่าเมื่อปริมาณของ SnO_2 เพิ่มขึ้นปริมาณการเกิดเฟสอะนาเทสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงสังเกตจากความสูงของพีคอะนาเทส ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 25.5^\circ, 38.1^\circ, 48.1^\circ$ และ 55.1° ซึ่งฟิล์มเกิดเฟสออสถฐานมากขึ้นนั่นเอง จนถึงสูตรที่ได้ไป SnO_2 ปริมาณ 10 mol% ไม่ปรากฏพีคใดๆเกิดขึ้นเลยดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ง) แสดงว่าเป็นออสถฐานหรือ โครงสร้างอะมอร์ฟัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นทำนองเดียวกันกับที่ได้ไป SiO_2 เป็นปริมาณ 3, 5 และ 10 mol%

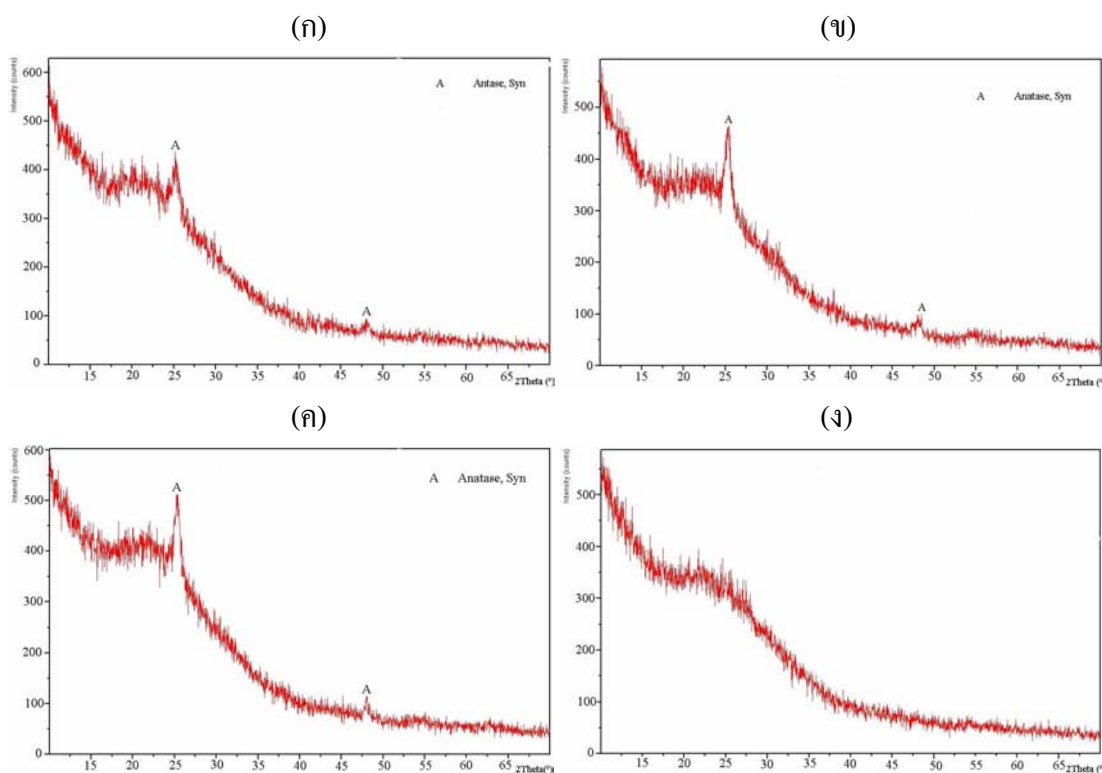


รูปที่ 3.17 XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อได้ไปสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600°C (ก) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ (ข) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ (ค) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$

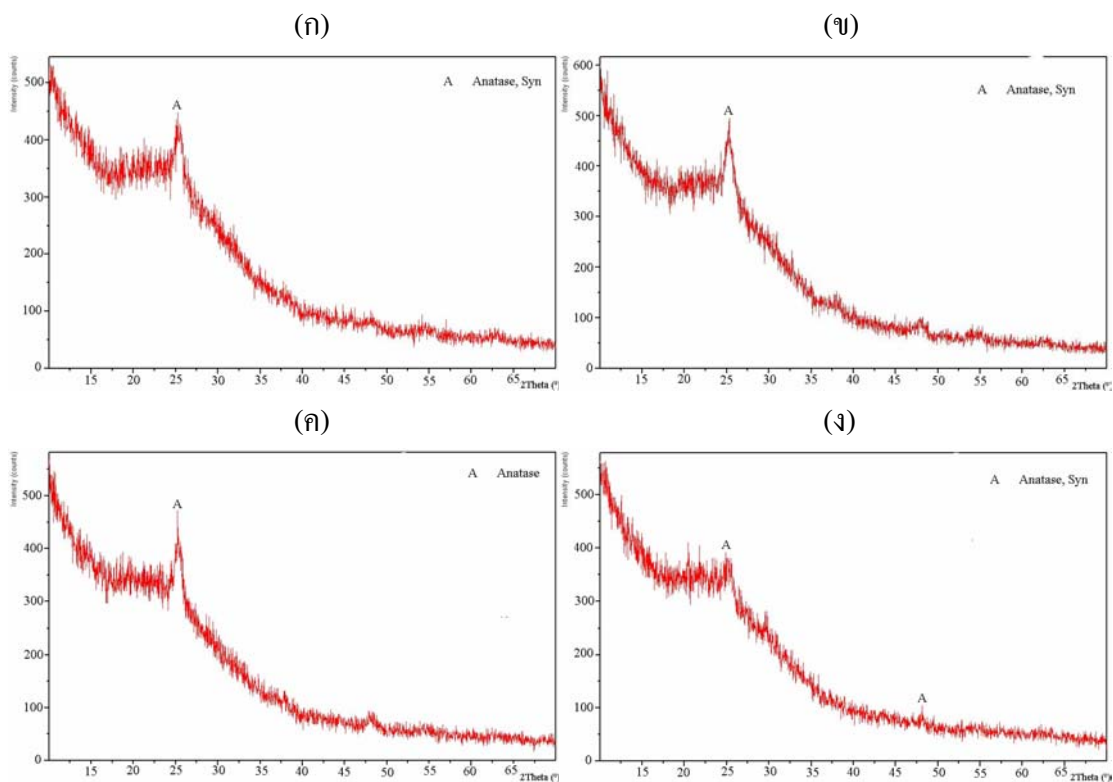
เมื่อได้ไป SiO_2 และ SnO_2 เข้าไปใน TiO_2 เป็นปริมาณ 1-15 mol% และ 1-10 mol% ตามลำดับเมื่อเทียบกับปริมาณ TiO_2 คงที่ พบว่า SiO_2 มีผลต่อการเกิดเฟสอะนาเทสของระบบ กล่าวคือ SiO_2 จะขัดขวางไม่ให้เกิดเฟสอะนาเทส ทำให้พีคของอะนาเทสกว้างและต่ำลง ซึ่งแสดงถึงความเป็นออสถฐานมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ SnO_2 และ TiO_2 คงที่ (รูปที่ 3.18 ก, 3.19 ก, 3.20 ก และ 3.21 ก) ปรากฏการณ์ทำนองเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ SnO_2 ที่ได้ไปเพิ่มขึ้นเป็น 3, 5 และ 10 mol% (รูปที่ 3.18 - 3.20) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า SiO_2 และ SnO_2 ที่ได้ไปลงไปใน TiO_2 ในปริมาณ

มาก (SiO_2 15 mol% และ SnO_2 10 mol%) มีผลต่อการเกิดเฟสอะนาเทสของ TiO_2 โดยจะทำให้เกิดเฟสอะนาเทสยากขึ้น (เกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นแทน) และเป็นเฟสอสังฐาน ดังนั้นการได้ปด้วยสารได้ปทั้งสองชนิดที่ปริมาณน้อยๆ น่าจะส่งผลดีต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์ม

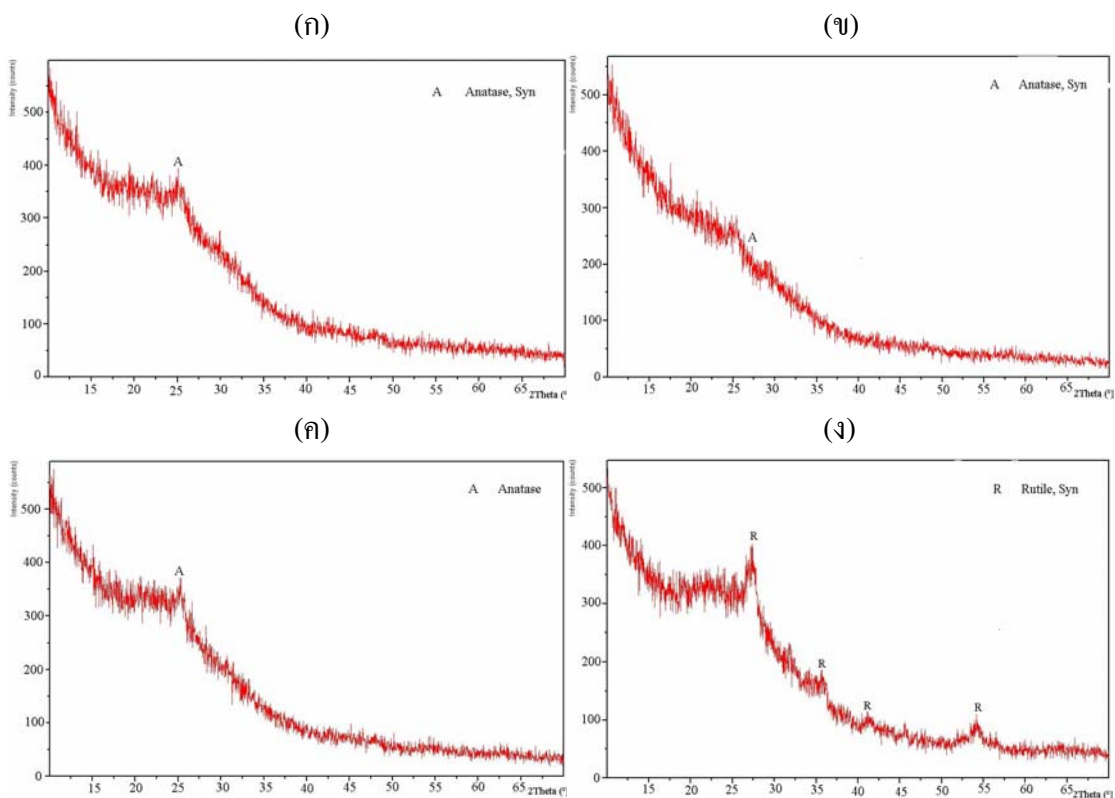
การได้ป SiO_2 ในปริมาณ 15 mol% เเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (รูปที่ 3.21) วิเคราะห์โครงสร้างที่เกิดขึ้นปรากฏไม่พบพีคของเฟสใดเลย ยังคงสภาพโครงสร้างที่เป็นอสังฐานอยู่ นั่นแสดงว่าปริมาณของ SiO_2 ที่ได้ปมากจนเกินไปจนทำให้ขัดขวางการเกิดเฟสอะนาเทสที่ไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นองค์ประกอบนี้จึงไม่เหมาะสมเมื่อพิจารณาขนาดของผลึกที่สังเคราะห์ได้ สรุปไว้ในตารางที่ 3.5 พบว่า SnO_2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในระบบ ไม่ค่อยมีผลต่อขนาดผลึกของฟิล์มมากนัก ในขณะที่ปริมาณ SiO_2 มีผลต่อขนาดผลึกของฟิล์ม กล่าวคือ เมื่อปริมาณ SiO_2 ในฟิล์มเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดของผลึกเล็กลง (พิจารณาที่ปริมาณ SnO_2 และ TiO_2 คงที่) แสดงว่า SiO_2 เป็นสารที่ควบคุมผลึกของฟิล์มด้วย



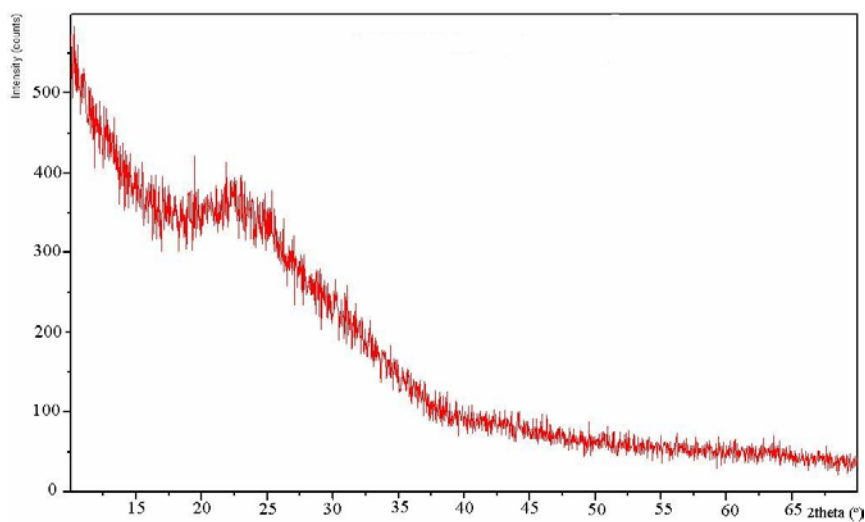
รูปที่ 3.18 XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 3 ชั้น เมื่อได้ปสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (ก) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ (ข) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ (ค) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$



รูปที่ 3.19 XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อได้ปสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600°C (ก) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ (ข) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ (ค) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$



รูปที่ 3.20 XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อได้ปัสสาร SiO_2 และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600°C (ก) $\text{TiO}_2/10\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ (ข) $\text{TiO}_2/10\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ (ค) $\text{TiO}_2/10\text{SiO}_2/5\text{SnO}_2$ (ง) $\text{TiO}_2/10\text{SiO}_2/10\text{SnO}_2$



รูปที่ 3.21 XRD pattern ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ หนา 3 ชั้น เมื่อได้ปัสสาร $15\text{ mol}\%\text{SiO}_2$ และ SnO_2 และเผาที่อุณหภูมิ 600°C

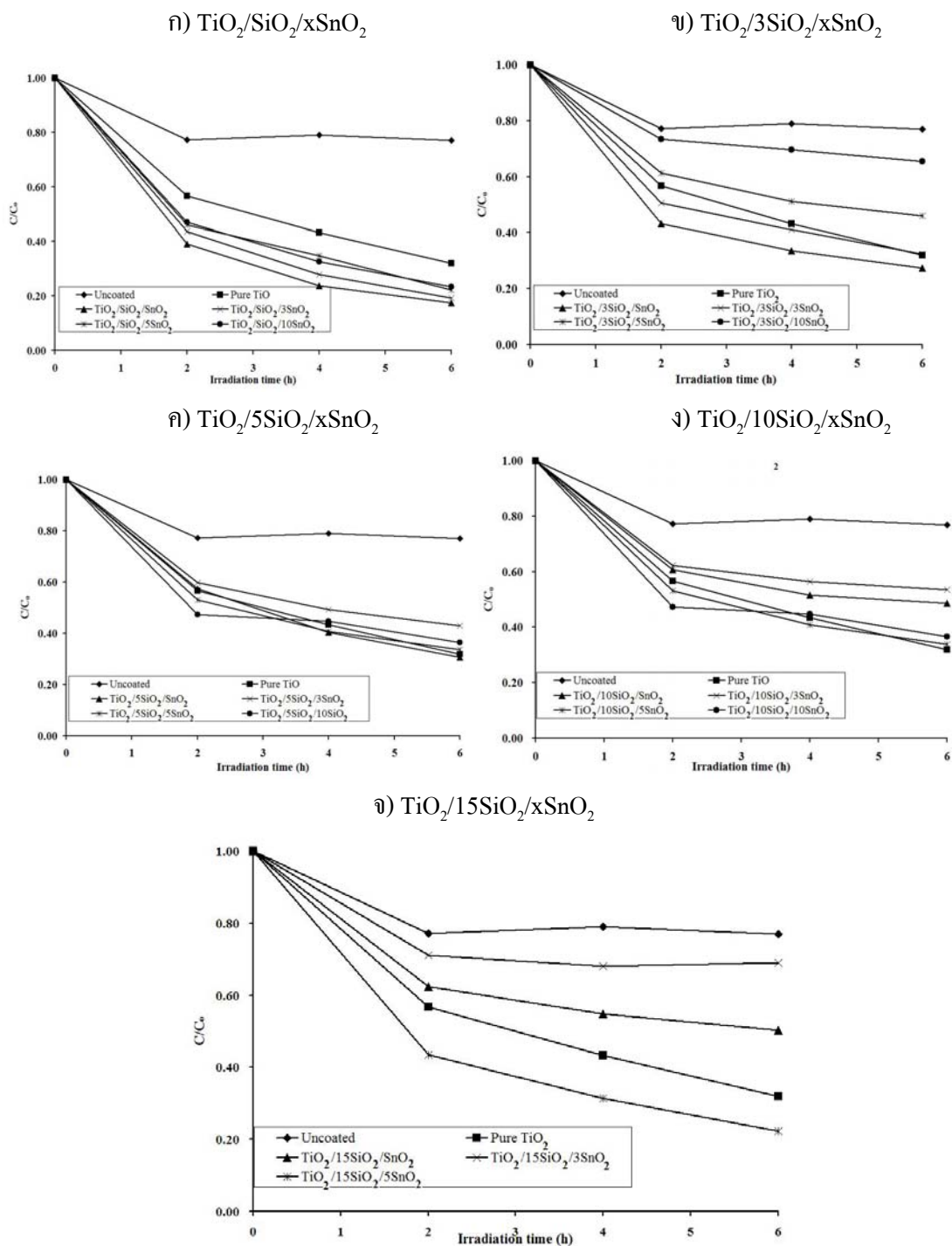
ตารางที่ 3.5 ขนาดผลึกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โตไปด้วย SiO₂ และ SnO₂ เตรียมด้วยวิธีโซล - เจล และเผาอุณหภูมิ 600 °C ของฟิล์มเคลือบ 3 ชั้น

Sample	ขนาดผลึก (nm)		ปริมาณเฟส (%)	
	อะนาเทส	รูไทล์	อะนาเทส	รูไทล์
Pure TiO ₂	17.91	-	100	0
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	17.92	-	100	0
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	25.09	-	100	0
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	17.92	-	100	0
TiO ₂ /SiO ₂ /10SnO ₂	-	-	Amorphous	0
TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂	12.54	-	100	0
TiO ₂ /3SiO ₂ /3SnO ₂	15.68	-	100	0
TiO ₂ /3SiO ₂ /5SnO ₂	15.68	-	100	0
TiO ₂ /3SiO ₂ /10SnO ₂	-	-	Amorphous	0
TiO ₂ /5SiO ₂ /SnO ₂	10.46	-	100	0
TiO ₂ /5SiO ₂ /3SnO ₂	12.54	-	100	0
TiO ₂ /5SiO ₂ /5SnO ₂	12.55	-	100	0
TiO ₂ /5SiO ₂ /10SnO ₂	15.67	-	100	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂	7.83	-	100	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	8.20	-	100	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	12.70	-	100	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /10SnO ₂	-	12.59	0	100
TiO ₂ /15SiO ₂ /SnO ₂	-	-	Amorphous	0
TiO ₂ /15SiO ₂ /3SnO ₂	-	-	Amorphous	0
TiO ₂ /15SiO ₂ /5SnO ₂	-	-	Amorphous	0

3.2.8 อิทธิพลของสารได้ป SiO_2 และ SnO_2 ต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองทดสอบปฏิกิริยาการสลายสีของ Methylene blue โดยใช้ฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ เป็นโฟโตคะตะลิสต์โดยเลือกที่ 3 ชั้นเคลือบ แผะที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ ตารางที่ 3.6 พบว่าของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารได้ป SiO_2 และ SnO_2 ที่สูตรต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับสารละลาย Methylene blue โดยสูตรที่มีการได้ปปริมาณของ SiO_2 และ SnO_2 น้อย เช่น $1\text{ mol}\%\text{SiO}_2$ และ $1\text{ mol}\%\text{SnO}_2$ สามารถทำปฏิกิริยาการสลายสีของ Methylene blue ได้ดีและสูงกว่าสูตรอื่นๆ ที่มีปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้น การย่อยสลายสีของ Methylene blue ประมาณ 82.51% (รูปที่ 3.23) จากผลการวิเคราะห์ XRD ในรูปที่ 3.17 สามารถอธิบายได้ว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ป $\text{SiO}_2\ 1\text{ mol}\%$ และ $\text{SnO}_2\ 1\text{ mol}\%$ จะเกิดเฟสอะนาเทสได้สมบูรณ์กว่าสูตรอื่นๆ โดยสังเกตได้จากความสูงของพีค ที่ตำแหน่งมุม $2\theta = 25.5\text{ }^\circ$, 38.1 ° , 48.1 ° และ 55.1 ° โดยเฟสอะนาเทสที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นเฟสที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด เมื่อปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้นการย่อยสลายสี Methylene blue ต่ำลงและที่ได้ป $15\text{ mol}\%\text{SiO}_2$ จะต่ำที่สุดเพราะสูตรนี้โครงสร้างของฟิล์มยังคงอยู่ในรูปออสันฐาน

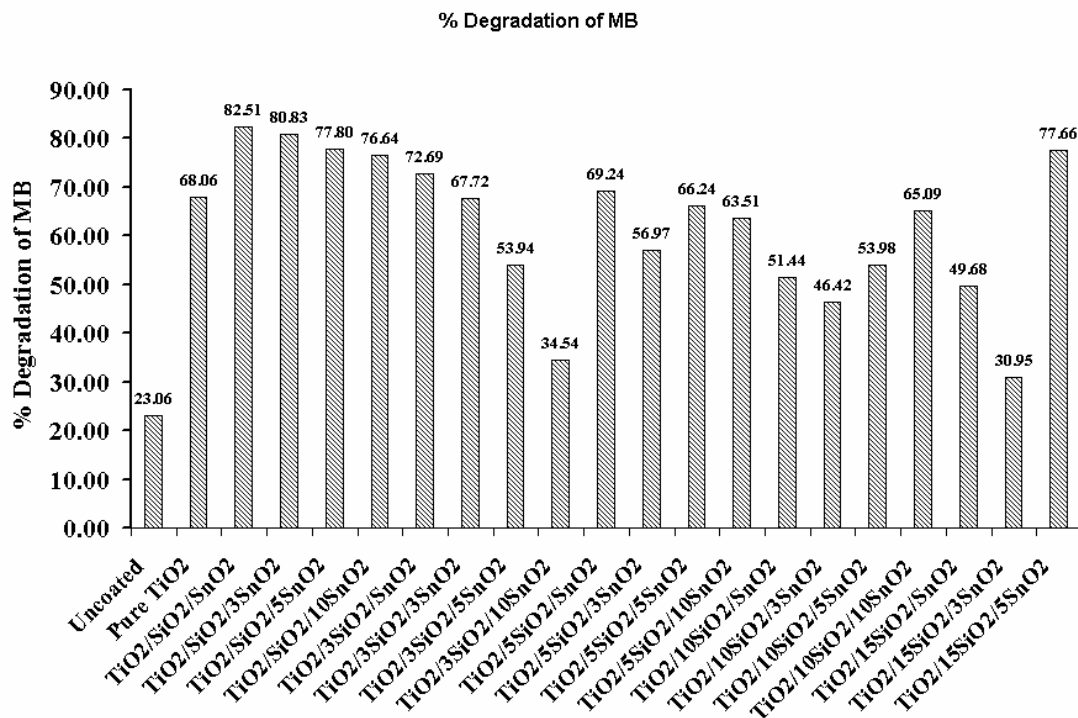
เมื่อสังเกตผลของปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงในการย่อยสลายสี Methylene blue ในรูปที่ 3.22 เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่ให้ปริมาณ SiO_2 คงที่ $1 - 5\text{ mol}\%$ และแปรผันปริมาณของ SnO_2 ตั้งแต่ $1 - 10\text{ mol}\%$ พบว่าสูตรที่มีปริมาณ $\text{SnO}_2\ 1\text{ mol}\%$ แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด และเมื่อปริมาณ SnO_2 เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายสี Methylene blue ต่ำลง ในขณะที่สูตรของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีการได้ป $\text{SiO}_2\ 10 - 15\text{ mol}\%$ พบว่าเมื่อได้ป SnO_2 เข้าไปด้วยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ $1-10\text{ mol}\%$ ไม่เห็นแนวโน้มชัดเจน และมีค่าไม่สูงนัก เนื่องจากเกิดเฟสอะนาเทสขึ้นบ้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณของ SnO_2 ที่ได้ปลงไปมากเกินไป เช่น $10\text{ mol}\%$ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกต่ำ เนื่องจากปริมาณ SnO_2 มากเกินไปจะไปคลุมพื้นผิวของ TiO_2 ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ (Chai et al., 2006)



รูปที่ 3.22 การลดลงของความเข้มข้นของ Methylene blue ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เมื่อเทียบกับเวลา ในการรับรังสีของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้ปด้วยสาร SiO₂ และ SnO₂ สำหรับฟิล์มที่เคลือบ 3 ชั้นและเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก) TiO₂/SiO₂/xSnO₂ ข) TiO₂/3SiO₂/xSnO₂ ค) TiO₂/5SiO₂/xSnO₂ ง)TiO₂/10SiO₂/xSnO₂ จ)SiO₂/15SiO₂/xSnO₂ (x คือปริมาณของ SnO₂ ที่ได้ป เท่ากับ 1, 3, 5 และ 10mol %)

ตารางที่ 3.6 ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของสารละลาย Methylene blue ที่ความยาวคลื่น 644 nm หลังการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

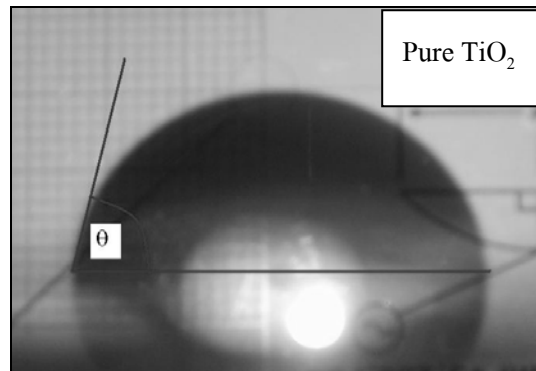
Sample	% Degradation of MB
Uncoated	23.06
Pure TiO ₂	68.06
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	82.51
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	80.83
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	77.80
TiO ₂ /SiO ₂ /10SnO ₂	76.64
TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂	72.69
TiO ₂ /3SiO ₂ /3SnO ₂	67.72
TiO ₂ /3SiO ₂ /5SnO ₂	53.94
TiO ₂ /3SiO ₂ /10SnO ₂	34.54
TiO ₂ /5SiO ₂ /SnO ₂	69.24
TiO ₂ /5SiO ₂ /3SnO ₂	56.97
TiO ₂ /5SiO ₂ /5SnO ₂	66.24
TiO ₂ /5SiO ₂ /10SnO ₂	63.51
TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂	51.44
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	46.42
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	53.98
TiO ₂ /10SiO ₂ /10SnO ₂	65.09
TiO ₂ /15SiO ₂ /SnO ₂	49.68
TiO ₂ /15SiO ₂ /3SnO ₂	30.95
TiO ₂ /15SiO ₂ /5SnO ₂	77.66



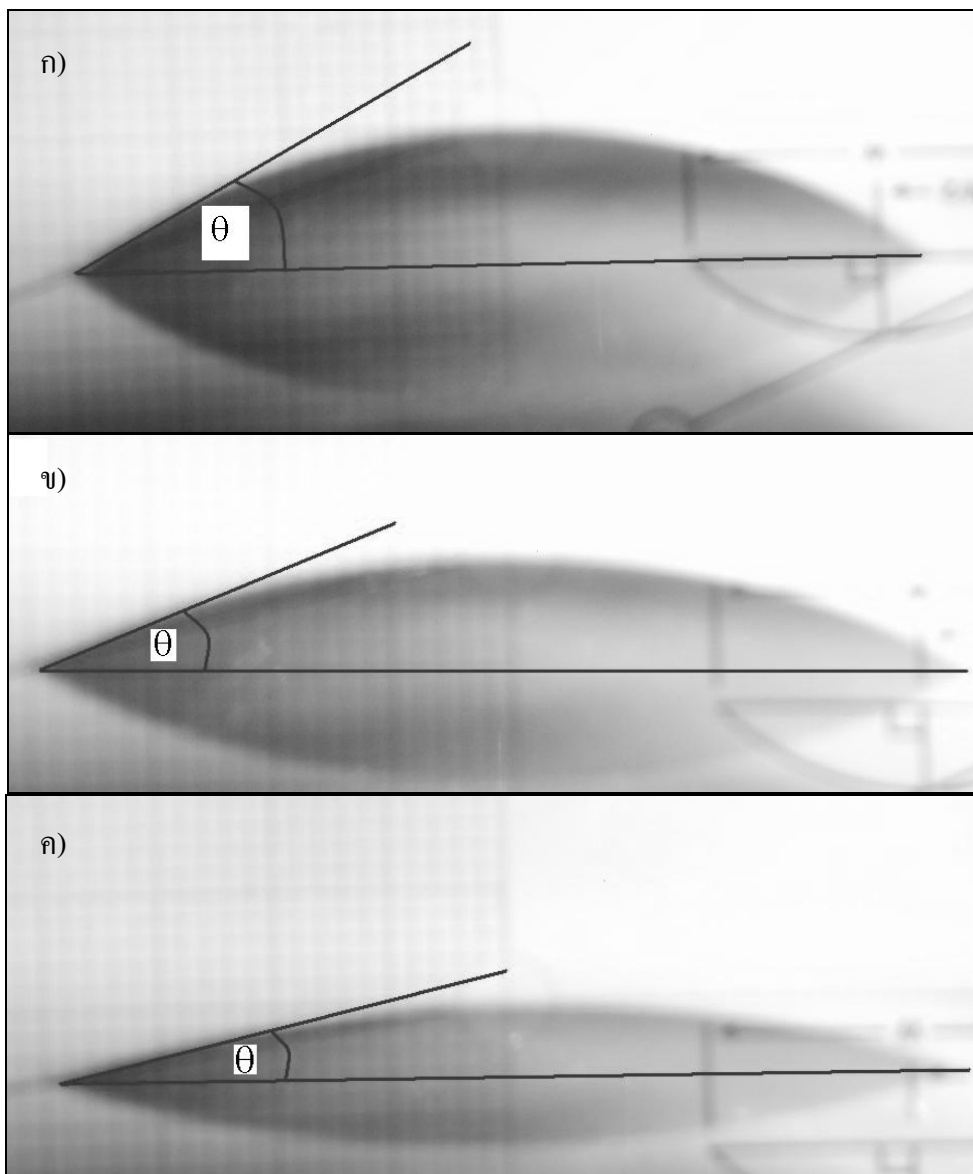
รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์มที่มีองค์ประกอบต่างๆ ที่อุณหภูมิสังเคราะห์ 600 °C และได้รับรังสียูวีเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

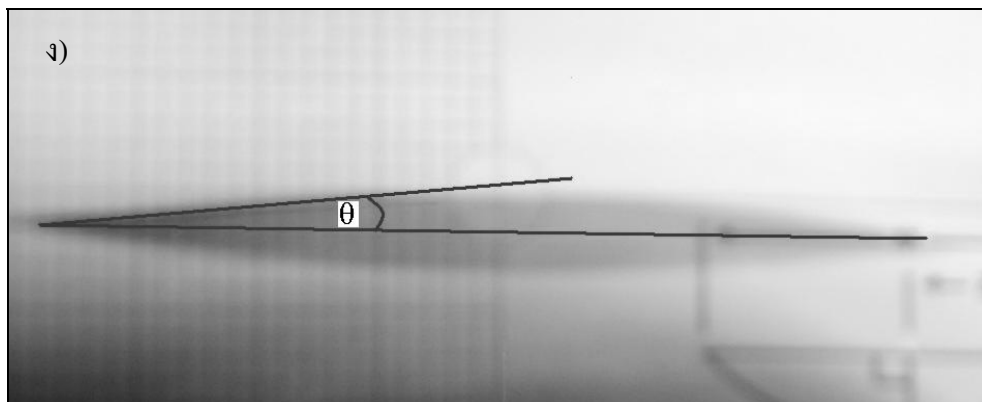
3.2.9 สมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic property) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย SiO₂ และ SnO₂

พิจารณารูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ก เปรียบเทียบมุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการโด๊ป กับฟิล์ม TiO₂/3SiO₂/SnO₂ เมื่อไม่ได้รับรังสียูวี มุมสัมผัสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการโด๊ป จะมีค่าสูงกว่าฟิล์ม TiO₂/3SiO₂/SnO₂ และเมื่อพิจารณามุมสัมผัสของฟิล์มTiO₂/3SiO₂/SnO₂ พบว่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อเวลาที่รับรังสียูวีเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.25 และรูป 3.26 ฟิล์มที่มีองค์ประกอบของ TiO₂/10SiO₂/3SnO₂ และ TiO₂/5SiO₂/5SnO₂ จะมีมุมสัมผัสลดลงเป็น 0° เมื่อได้รับรังสียูวี เป็นเวลา 30 นาที การโด๊ป SiO₂ จะไปเพิ่มสมบัติความเป็นกรดของพื้นผิวฟิล์มทำให้สมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกของผิวฟิล์มสูงขึ้น

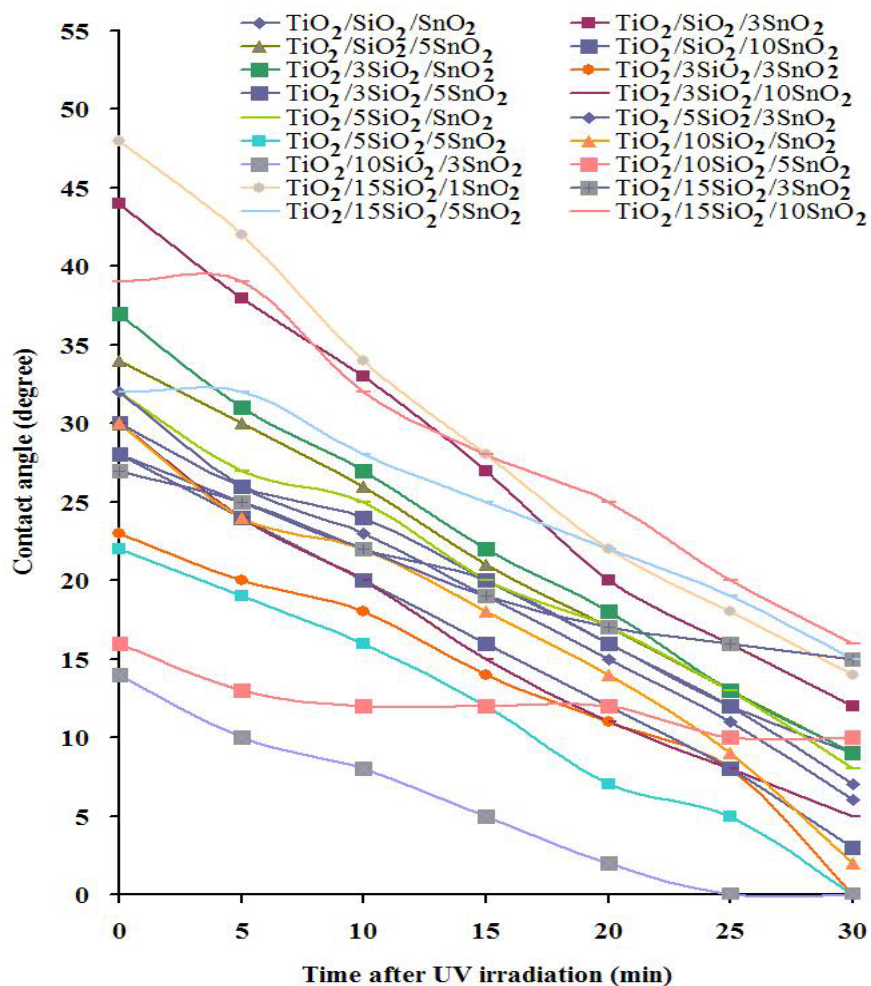


รูปที่ 2.24 มุมสัมผัสของสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ เหนือที่อุณหภูมิ 500 °C และฟิล์ม 3 ชั้น
เคลือบ





รูปที่ 2.25 รูปมุมสัมผัสของฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{3SiO}_2/\text{SnO}_2$ ก) รับรังสียูวี 0 นาที ข) รับรังสียูวี 10 นาที
ค) รับรังสียูวี 20 นาที ง) รับรังสี 30 นาที

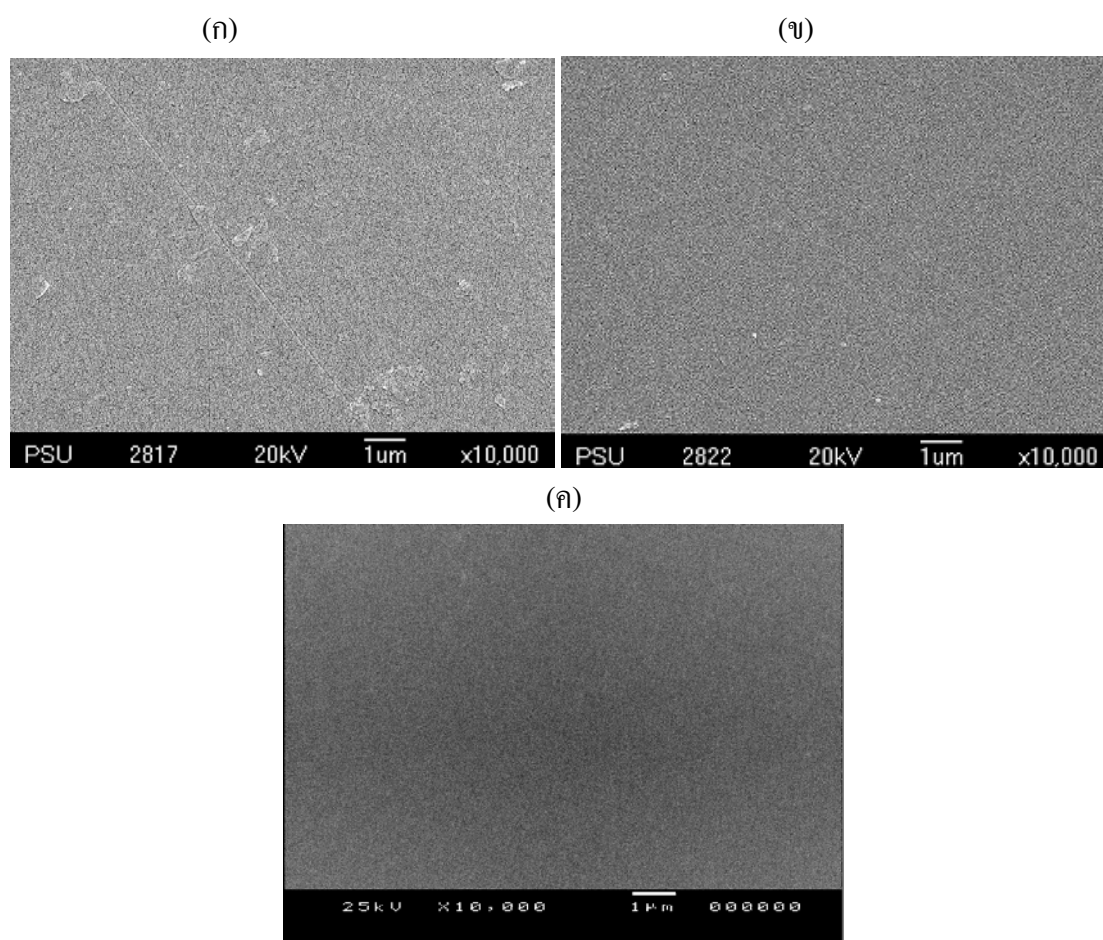


รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับเวลาที่ได้รับรังสียูวีของกระจกโซดาไลม์ เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปด้วย SiO_2 และ SnO_2 ความหนา 3 ชั้น และที่อุณหภูมิเผา 600°C

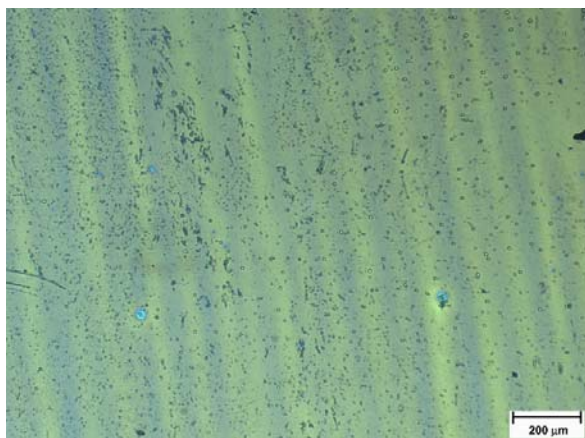
3.3 อิทธิพลของความหนาฟิล์ม

3.3.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเติม SiO_2 และ SnO_2

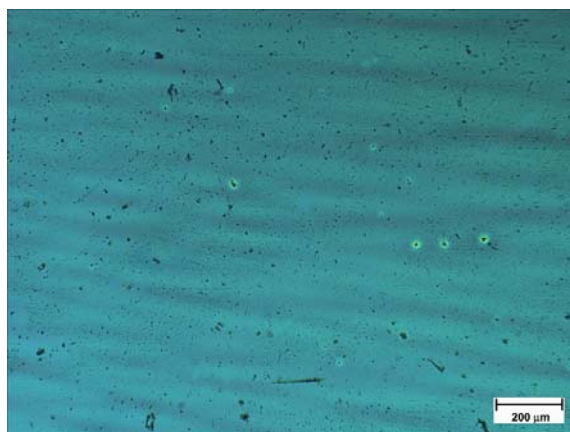
ลักษณะพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และที่มีสารเติมชนิด SiO_2 และ SnO_2 จากภาพถ่าย SEM (รูปที่ 3.27) พบว่าที่ความหนา 1 ชั้นพื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบที่ทุกอุณหภูมิในการเผาแต่มีฟองอากาศ เนื่องจากการเคลือบโดยวิธีการหมุนเหวี่ยงพื้นผิวชิ้นงานจะมีลักษณะขรุขระเนื่องจากขณะเคลือบสารละลายจะไหลแผ่ไปบนชิ้นงานระหว่างนั้นตัวทำละลายจะระเหยออกไปทำให้สารละลายเย็นตัวลง ช่วงเย็นตัวก๊าซจะควบแน่นในสารละลายทำให้เกิดฟองเล็กชิ้นจำนวนมาก เมื่อฟิล์มแห้งจะมีลักษณะเป็นรูพรุนขึ้นดังในรูปที่ 3.27 ถึงรูปที่ 3.28 แต่เมื่อชั้นฟิล์มหนาเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั้น มีรอยแตกของชั้นฟิล์มเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.27 เนื่องจากฟิล์มหนาเกินไปทำให้เกิดความเค้นภายในทำให้ผิวมีลักษณะขรุขระ ความขรุขระของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 3.7



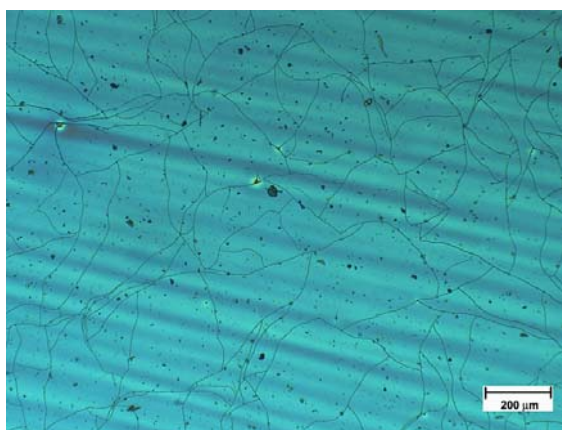
รูปที่ 3.27 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 ที่อุณหภูมิเผา (ก) 300 °C (ข) 400 °C และ (ค) 500 °C ที่ความหนา 1 ชั้นเคลือบ



รูปที่ 3.28 ภาพถ่ายพื้นผิวของชั้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C



รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายพื้นผิวของชั้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C



รูปที่ 3.30 ภาพถ่ายพื้นผิวของชั้นตัวอย่างกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการหมุนเหวี่ยง ที่ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ อุณหภูมิเผา 500 °C

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดของอนุภาคของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ด้วย SiO_2 และ SnO_2 จะใช้เครื่อง AFM ผลดังแสดงในรูปที่ 3.31 โดยภาพที่ได้จาก AFM แสดงให้เห็นถึงลักษณะเม็ดผลึกของฟิล์ม TiO_2 ซึ่งมีลักษณะกลม ขนาด 33 นาโนเมตร และฟิล์ม TiO_2 ที่ได้ไป SiO_2 และ SnO_2 ลงไปอย่างละ 5 mol% ทำให้ขนาดอนุภาคของฟิล์มที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง เท่ากับ 23 นาโนเมตร และ 21 นาโนเมตร ตามลำดับ

จะเห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มค่อนข้างเรียบ โดยมีค่า Roughness อยู่ในช่วง 1- 4 นาโนเมตร (ตารางที่ 3.7) นั้นแสดงว่าการเคลือบด้วยวิธี Spin coating เป็นวิธีที่ดีและเหมาะสม ผิวฟิล์มที่ได้เรียบ จากรูปจะเห็นว่ากรณีเคลือบหนา 3 ชั้น ฟิล์มของ TiO_2 ที่ไม่ได้ได้ไปสาร ลักษณะของพื้นผิวฟิล์มจะเรียบน้อยกว่าฟิล์มที่ได้ไปสาร SiO_2 และ SnO_2 ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของอนุภาคของฟิล์ม TiO_2 จะมีขนาดใหญ่กว่านั่นเอง ซึ่งจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะมีผลต่อสมบัติไฮโดรฟิลิกของฟิล์ม โดยจะมีค่ามุมสัมผัสลดลงเมื่อผิวฟิล์มเรียบมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.16 ในกรณีการได้ไป SnO_2

อย่างไรก็ตามความเป็นไฮโดรฟิลิกของผิวฟิล์มไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเรียบเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับเฟสอะนาเทสที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกด้วย

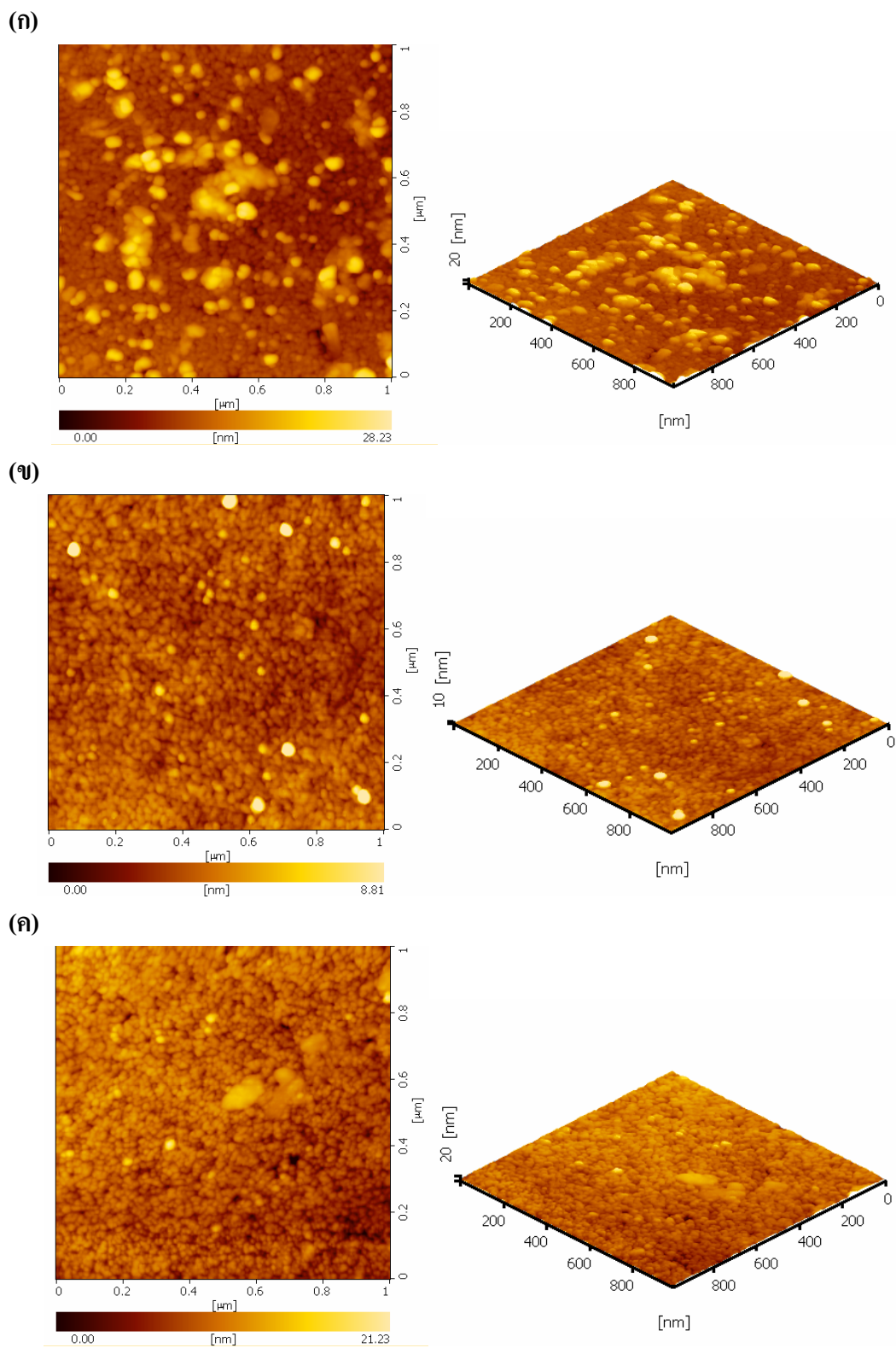
ตารางที่ 3.7 ความขรุขระของชั้นฟิล์มสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 500 °C วิเคราะห์ด้วย AFM

Sample	Surface roughness (R)		
	เคลือบ 1 ครั้ง(nm)	เคลือบ 2 ครั้ง(nm)	เคลือบ 3 ครั้ง(nm)
Pure TiO_2	3.766	3.388	3.040
$\text{TiO}_2/5\text{SiO}_2$	0.728	0.970	1.016
$\text{TiO}_2/5\text{SnO}_2$	3.630	2.203	2.682

ตารางที่ 3.8 ความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 500 °C ด้วยเครื่อง AFM

จำนวนครั้งในการเคลือบ	ความหนาของชั้นฟิล์ม(nm)
1 ครั้ง	53.66
2 ครั้ง	124.80
3 ครั้ง	237.91

ดังนั้นในกรณีการได้ไป SiO_2 5mol% มุมสัมผัสที่ได้ดังรูปที่ 3.12 จึงมีค่าสูงกว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ได้ไปสาร เพราะในกรณีที่ได้ไป SiO_2 มีแนวโน้มทำให้ขีดขวางการเกิดเฟสอะนาเทสของฟิล์ม

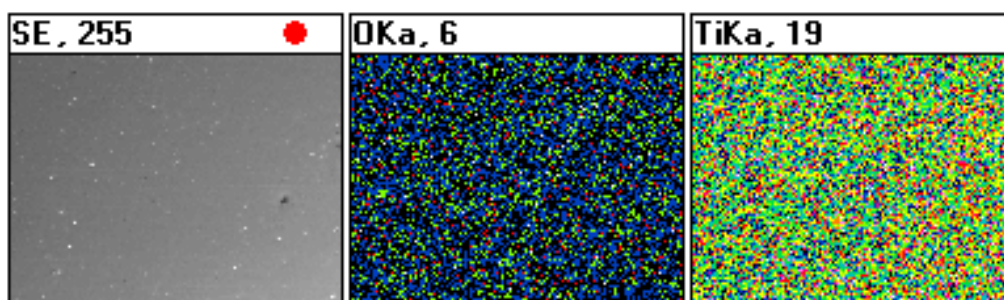


รูปที่ 3.31 ภาพถ่าย AFM ความขรุขระของผิวฟิล์ม (ก) TiO_2 (ข) $\text{TiO}_2 /5\text{SiO}_2$ (ค) $\text{TiO}_2/5\text{SnO}_2$ สังกะระห์ด้วยอุณหภูมิ 500 °C

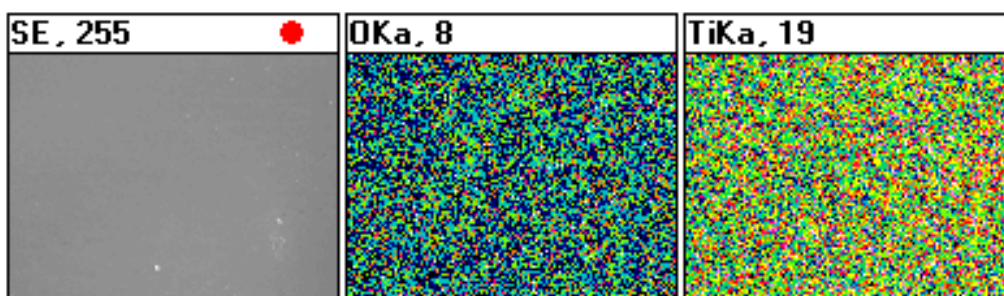
3.3.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในฟิล์ม

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในฟิล์ม โดยวิธี X-ray mapping จากรูปที่ 3.32 พบว่าสารเคลือบ TiO_2 และ TiO_2 ที่ได้ปด้วย SnO_2 กระจายดีทั้งชั้นงาน แต่ความหนา 1 และ 2 ชั้น ความเข้มข้นของ SnO_2 ที่ได้ปลงไปมีปริมาณที่น้อยมากทำให้ไม่สามารถแสดงผล X-ray mapping ได้ดังในรูปที่ 3.33 โดยจะตรวจพบฟลักของ TiO_2 และ SnO_2 ได้แสดงดัง pattern ของ EDX ในรูปที่ 3.34 ถึงรูปที่ 3.39 แต่สำหรับการกระจายตัวของ SiO_2 บนตัวอย่างไม่สามารถวิเคราะห์บ่งบอกได้ ทั้งเนื่องจากสารได้ปเป็นสารชนิดเดียวกับวัสดุฐานที่เป็นกระจก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณของ SiO_2 เป็นส่วนผสมหลักอยู่แล้ว ดังนั้นในการตรวจสอบจะพบ SiO_2 ที่เป็นส่วนของตัวกระจกที่แสดงออก ดังนั้นจากผลการกระจายตัว พบว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ปริมาณของ Ti, O และ Sn กระจายหนาแน่นมากขึ้นดังในรูปที่ 3.33

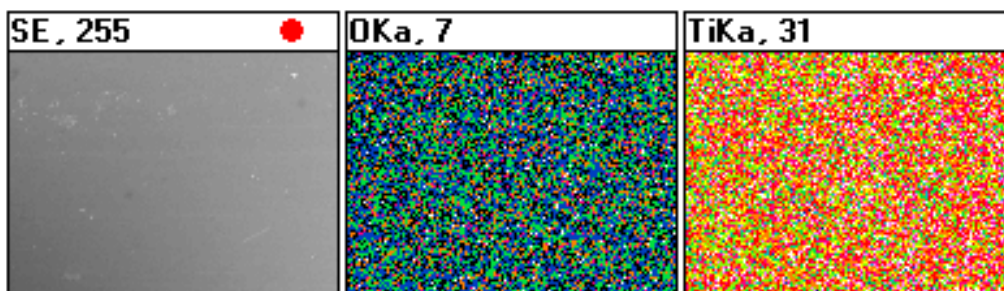
1L TiO_2



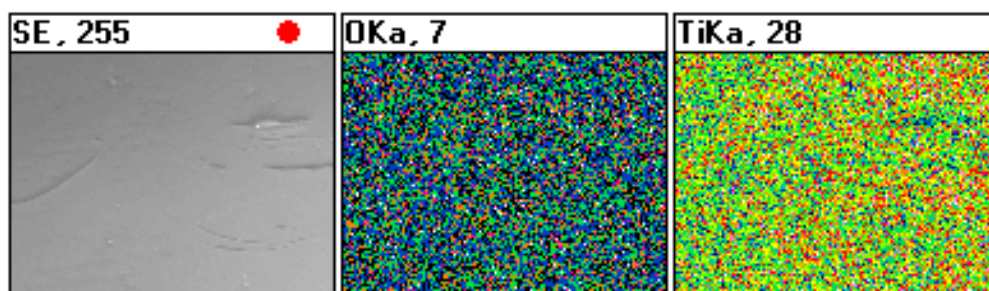
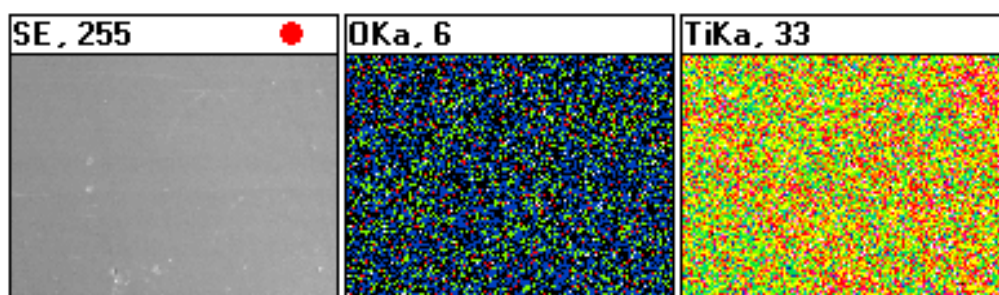
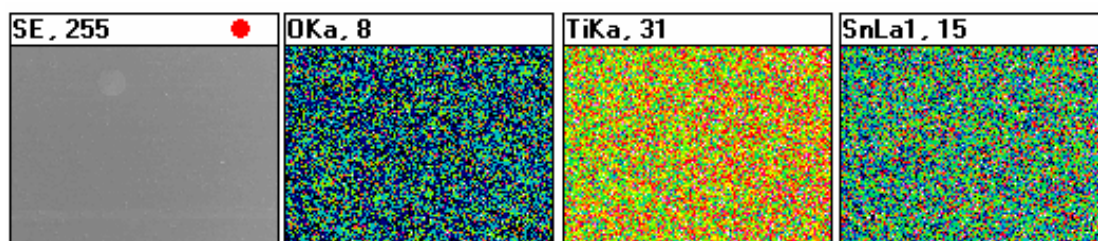
2L TiO_2



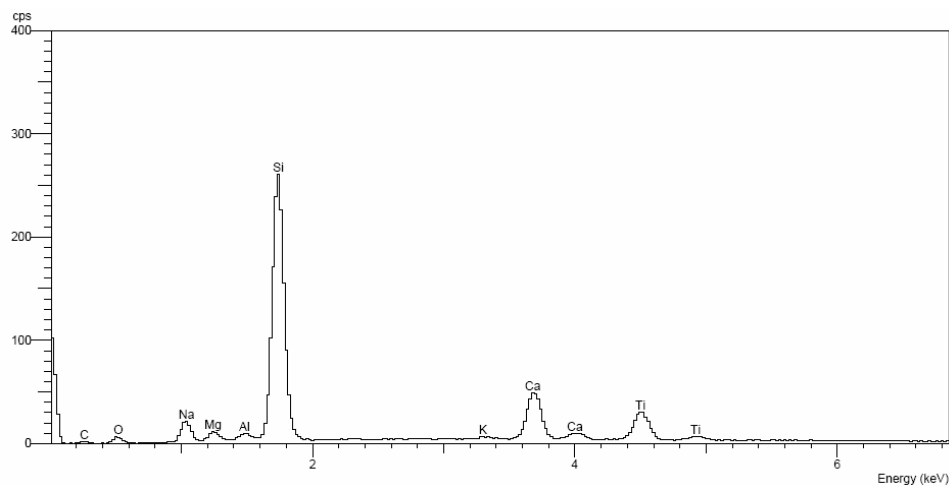
3L TiO_2



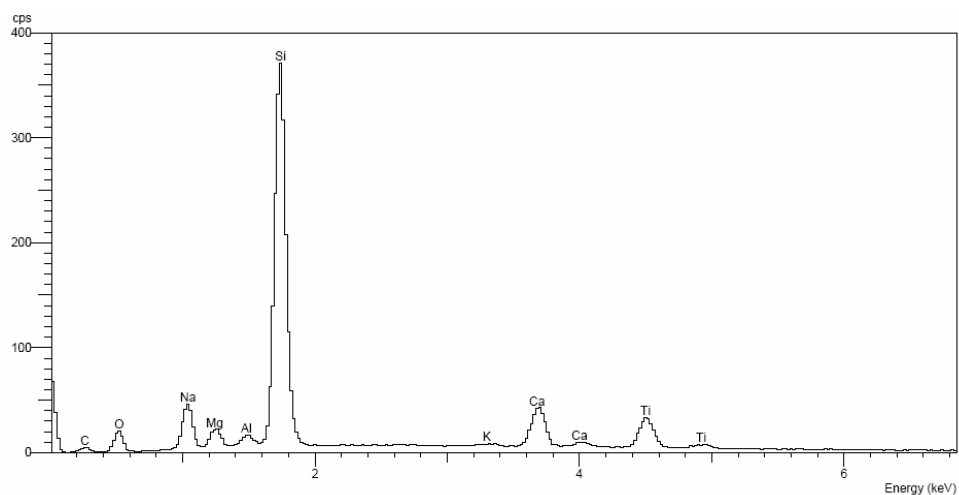
รูปที่ 3.32 การกระจายตัวของธาตุต่างๆบนผิวฟิล์ม TiO_2 ที่ความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น (L= จำนวนชั้นการเคลือบของชั้นฟิล์ม)

1L $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ 2L $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ 3L $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ 

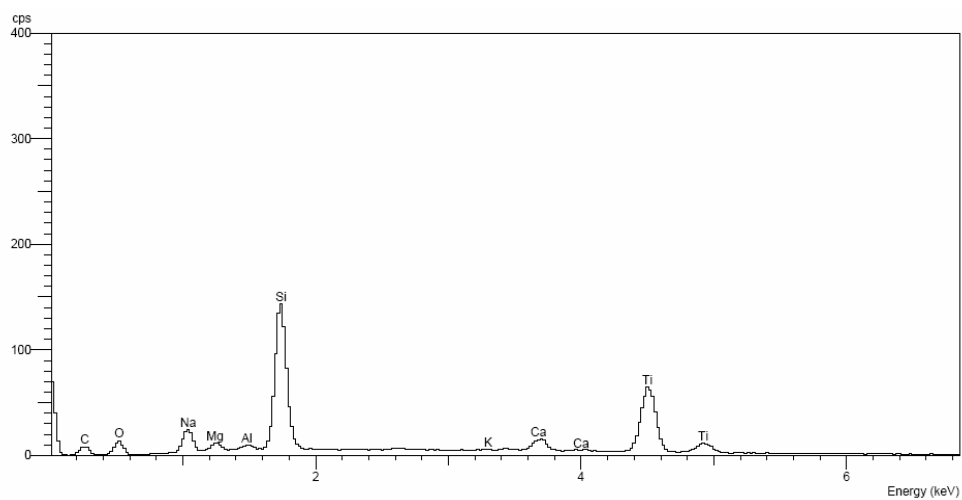
รูปที่ 3.33 การกระจายตัวของธาตุต่างๆบนผิวฟิล์ม $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ ที่ความหนา 1, 2 และ 3 (L= จำนวนชั้นการเคลือบของชั้นฟิล์ม)



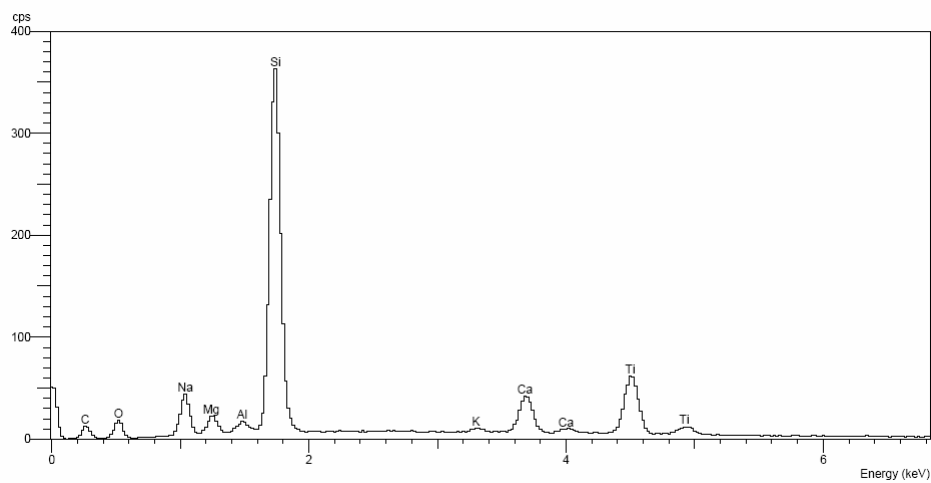
รูปที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 1 ชั้นเคลือบ



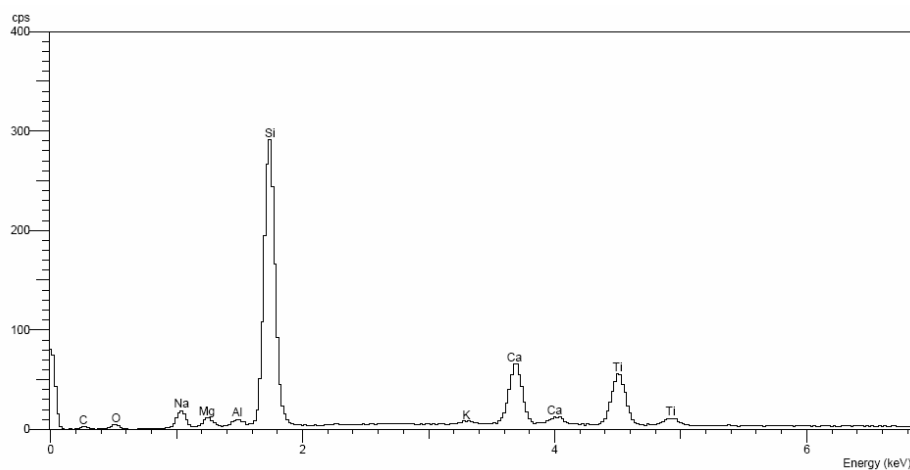
รูปที่ 3.35 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 2 ชั้นเคลือบ



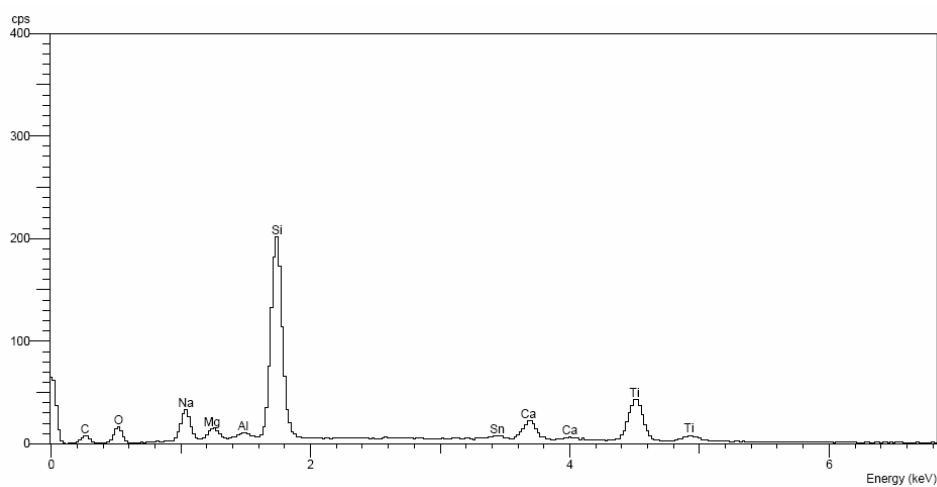
รูปที่ 3.36 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความหนา 3 ชั้นเคลือบ



รูปที่ 3.37 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ มีความหนา 1 ชั้นเคลือบ



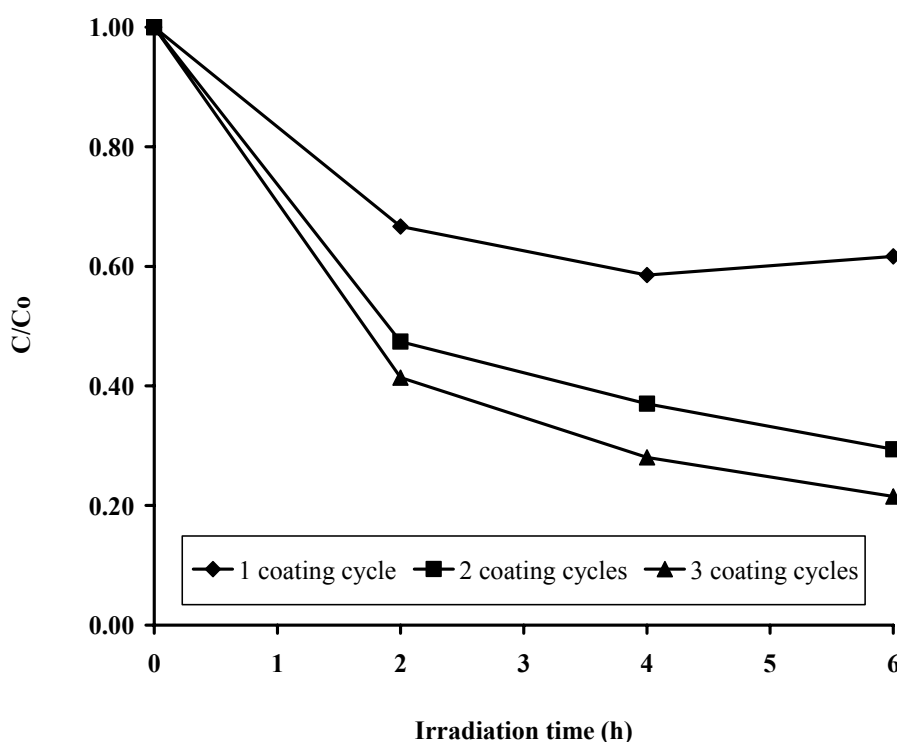
รูปที่ 3.38 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ มีความหนา 2 ชั้นเคลือบ



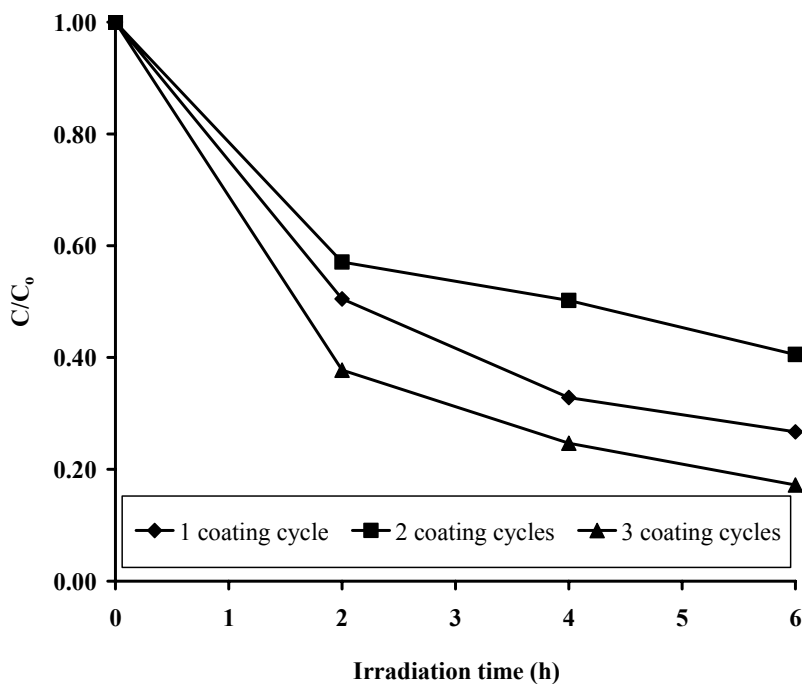
รูปที่ 3.39 ผลการวิเคราะห์ธาตุที่กระจายอยู่ในฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ มีความหนา 3 ชั้นเคลือบ

3.3.3 อิทธิพลของความหนาของชั้นฟิล์มต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

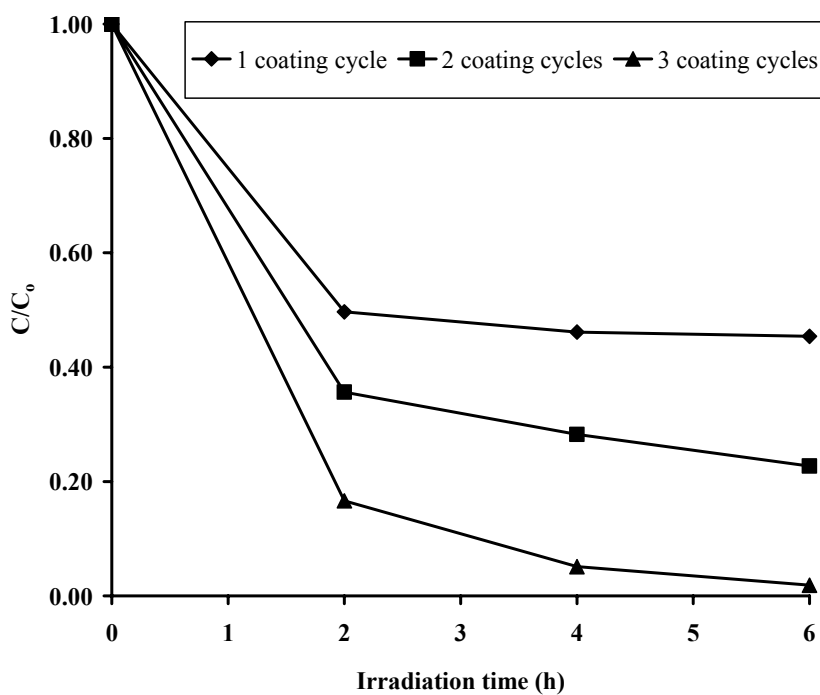
อิทธิพลของความหนาฟิล์มต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์ม TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ และ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ แสดงดังรูปที่ 3.40 ถึงรูปที่ 3.42 จากการทดสอบการสลายสี Methylene blue พบว่าอัตราการย่อยสลายของฟิล์มหนาเคลือบ 3 ชั้นอัตราการย่อยสลายสีได้ดีกว่า 1 และ 2 ชั้น (แสดงด้วยเส้นกราฟที่อยู่ต่ำสุด) เพราะฟิล์มหนาเคลือบ 3 ชั้นจะมีปริมาณของ TiO_2 มากกว่าทำให้ไอเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงมากตามไปด้วย ดังนั้นหลุมประจุบวกที่เกิดขึ้นบนแถบเวเลนซ์มีมาก และทำให้ปริมาณ $\text{OH}\cdot$ ที่เกิดขึ้นบนผิวเพิ่มขึ้นด้วย $\text{OH}\cdot$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงในการกำจัดสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ต่างๆ สุดท้ายก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกดี ซึ่งให้ผลเหมือนกันทั้งฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ป และฟิล์มที่ได้ปด้วย SiO_2 และ SnO_2



รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น



รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์ม TiO₂/5SiO₂ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น



รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายกับเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสี Methylene blue ของฟิล์ม TiO₂/3SnO₂ สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 500 °C ที่ความหนาของฟิล์ม 1, 2 และ 3 ชั้น

3.3.4 อิทธิพลของความหนาของชั้นฟิล์มต่อสมบัติไฮโดรฟิสิกของกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มของสารเคลือบ

ตารางที่ 3.9 ค่ามุมสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยหยดน้ำของชั้นฟิล์มที่ความหนา 1, 2 และ 3 ชั้น อุณหภูมิ 50 °C

Sample	Layers	Contact Angle (°)	
		Without UV	With UV 30 min
Non - Coating	0	9.0	6.0
Pure TiO ₂	1	6.0	-
	2	13.0	-
	3	5.0	13.0
TiO ₂ /15SiO ₂	1	13.7	-
	2	12.7	-
	3	26.7	0
TiO ₂ /3SnO ₂	1	8.0	-
	2	16.3	-
	3	7.0	4.0
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	1	-	-
	2	-	-
	3	13.3	0

มุมสัมผัสต่ำแสดงถึงการเป็นไฮโดรฟิสิกของผิวเคลือบ ทำให้สามารถทำความสะอาดผิวง่ายและทำให้กระจกใสไม่เป็นฝ้าเพราะน้ำไม่เกาะเป็นหยดน้ำบนผิวกระจก ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากแสดงถึงความเป็นไฮโดรโฟบิกของผิวเคลือบ (Hydrophobicity) ทำให้สิ่งสกปรกหรือคราบสกปรกที่ติดผิวถูกชะล้างได้ง่าย ผิวกระจกที่ไม่เคลือบโดยธรรมชาติมีความเป็นไฮโดรฟิสิกสูงเพราะผิวค่อนข้างเรียบมากและ SiO₂ ที่อยู่ในกระจกจะเพิ่มความเป็นไฮโดรฟิสิกอยู่แล้วเนื่องจากมีความเป็นโพลาริตี (Polarity) สูง จากการทดลองวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น มุมสัมผัสจะมีค่าลดลง แต่กลับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนา 3 ชั้น (ตารางที่

3.9) เนื่องจากที่ความหนาของฟิล์ม 3 ชั้น ลักษณะพื้นผิวที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงดัง ในรูปที่ 3.30 ปรากฏรอยแตกของชั้นฟิล์ม นั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวขรุขระ และทำให้มุมสัมผัส เพิ่มขึ้น ในกรณีที่วัดภายใต้แสงยูวี เมื่อชั้นของฟิล์มบางๆ รังสียูวีจะใช้พลังงานน้อย ในขณะที่ฟิล์ม หนาขึ้นต้องใช้พลังงานที่ได้รับจากแสง ยูวีเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทะลุทะลวงเข้าไปทำปฏิกิริยากับสาร เคลือบได้ ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้มุมสัมผัสมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ(2002) อีกเหตุผลหนึ่งคือ เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ลักษณะของพื้นผิวจะมีความ เรียบมากขึ้นทำให้มุมสัมผัสลดลง (Ostroushaya et al., 2003)

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การวิจัยนี้ได้พัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย SiO_2 และ SnO_2 ซึ่งพบว่ามีอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของสารเคลือบที่พัฒนาได้ ดังนี้

4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

- อุณหภูมิในการเผามีอิทธิพลต่อการเกิดเฟสต่างๆของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอะนาเทสเกิดที่อุณหภูมิในช่วง $300 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

- อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ใหญ่ขึ้น

- อุณหภูมิในการเผาฟิล์มที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ให้ผลประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงกว่าที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสูงสุด

4.1.2 อิทธิพลของสารโด๊ป SiO_2 หรือ SnO_2

- SiO_2 หรือ SnO_2 มีผลต่อการเกิดโครงสร้างผลึกของเฟสอะนาเทสในไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารโด๊ป และมีผลในการยับยั้งไม่ให้เกิดเฟสรูไทล์ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้

- ขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย SiO_2 หรือ SnO_2 มีขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการโด๊ป ดังนั้น SiO_2 หรือ SnO_2 สามารถยับยั้งการโตของขนาดผลึกในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

- ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โด๊ปด้วย $5\text{mol}\%\text{SiO}_2$ และ $3\text{mol}\%\text{SnO}_2$ ให้ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มสูงสุด โดย $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$ สามารถย่อยสลายสี Methylene blue ได้ถึง 98.13% เมื่อทดสอบที่ 6 ชั่วโมง ซึ่งดีกว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารโด๊ปที่สามารถย่อยสลายได้เพียง 82.11%

- สารได้อปซันด์ SiO_2 หรือ SnO_2 สามารถปรับปรุงสมบัติไฮโดรฟิลิกหรือทำให้พื้นผิวชอบน้ำมากขึ้น และทำให้พื้นผิวมีสมบัติ Super-hydrophilic โดยมีมุมสัมผัส 0° เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งช่วยให้พื้นผิวมีสมบัติทำความสะอาดได้ง่าย (Self-cleaning)

4.1.3 อิทธิพลของสารได้อป SiO_2 และ SnO_2

- फिल्मไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้อปด้วย SiO_2 และ SnO_2 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600°C ปริมาณของ SiO_2 ทำให้เฟสอะนาเทสเกิดได้น้อย ทำนองเดียวกันกับที่ได้อป SiO_2 หรือ SnO_2 เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า SiO_2 และ SnO_2 ที่ได้อปลงไป ใน TiO_2 มีผลต่อการเกิดเฟสอะนาเทส ดังนั้นการได้อปด้วยสารได้อปทั้งสองชนิดที่ปริมาณน้อยๆ คือสูตร $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ (1 mol% SiO_2 และ 1 mol% SnO_2) จะส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้อปด้วย SiO_2 และ SnO_2 ให้ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารได้อป แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าฟิล์มที่มีองค์ประกอบ $\text{TiO}_2/3\text{SnO}_2$

4.1.4 อิทธิพลของความหนาฟิล์ม

- ความหนาของชั้นฟิล์มต่อความเรียบ พบว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความเรียบของพื้นผิว เรียบมากขึ้น

- ความหนาของชั้นฟิล์มมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ชั้นงานที่มีความหนา 3 ชั้น สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด

- พื้นผิวมีความเป็นไฮโดรฟิลิกมากขึ้น เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจากผลการศึกษางานในครั้งนี้ เราสามารถพัฒนาสารเคลือบที่มีสามองค์ประกอบ คือ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล และการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ซึ่งทำให้ได้ฟิล์มที่มีผิวค่อนข้างเรียบมาก นอกจากนี้สมบัติทั้งทางด้านโฟโตคะตะไลติกและไฮโดรฟิลิกที่ดีขึ้นกว่าสูตรเดิมที่มีการได้อปเฉพาะ SiO_2 หรือ SnO_2 อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีสารได้อป เพราะสูตรเดิม เช่น ที่ได้อปเฉพาะ SiO_2 จะให้สมบัติไฮโดรฟิลิกเด่นแต่ประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกด้อย แต่สำหรับการได้อป SnO_2 จะเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติก แต่มีผลต่อสมบัติไฮโดรฟิลิกน้อย ดังนั้นสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของ $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{SnO}_2$ ที่พัฒนาขึ้นนี้มีสมบัติทั้งโฟโตคะตะไลติกและสมบัติไฮโดรฟิลิกที่ดีควบคู่กัน โดยสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของ $\text{TiO}_2/1\text{SiO}_2/1\text{SnO}_2$ จะแสดงประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกที่ดี คือมีการย่อยสลาย Methylene blue ได้ 82.51 % และมีมุมสัมผัส 7° ในขณะที่สารเคลือบองค์ประกอบของ $\text{TiO}_2/3\text{SiO}_2/3\text{SnO}_2$ มีมุมสัมผัส 0° ซึ่งแสดงว่ามีสมบัติเป็น Super-hydrophilic แต่ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการย่อยสลาย Methylene blue ต่ำเพียง 67.72 % ดังนั้น

ในการพัฒนาสารเคลือบที่มีสามองค์ประกอบนั้น $\text{TiO}_2/\text{1SiO}_2/\text{1SnO}_2$ เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานด้านทำความสะอาดด้วยตัวเองของวัสดุต่อไป

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขั้นตอนการเตรียมโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการบ่มนานเกินไป จะทำให้เกิดโซลมีความหนืดมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อความหนาในขั้นตอนการเคลือบได้
2. การเคลือบฟิล์มให้บาง สามารถลดการแตกของชั้นฟิล์มและลดการหลุดร่อนของชั้นฟิล์มได้
3. การเคลือบโซลบนชิ้นงานต้องทำในขณะบรรยากาศแห้ง ปราศจากไอน้ำ เนื่องจากหากมีความชื้นสูงโซลจะกลายเป็นผงไทเทเนียมไดออกไซด์และหลุดร่อนออก
4. วัสดุฐานต้องสะอาด ไม่มีฝุ่นละอองหรือคราบน้ำมัน เพราะจะทำให้ฟิล์มเคลือบไม่ทั่วและจะเป็นรอยบกพร่องของผิวฟิล์ม ดังนั้นควรทำภายใต้ระบบบรรยากาศ

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบและสรุปสมบัติต่างๆของสารเคลือบ

งานวิจัย	Coating Method	Calcination temperature (°C)	สารตัวเติม (mol%)		ความเข้มแสง (mW/cm ²)	Photocatalytic efficiency (%) (6 h)	Contact angle (Irradiation time = 30 min) (degree)	หมายเหตุ
			SiO ₂	SnO ₂				
Guan, 2005	Dip coating	650	10 - 20	-	-	-	10	
This work	Spin coating	500	-	-	3.89	23.06	6	Uncoated
			-	-		78.05	13	Pure TiO ₂
			5	-		82.79	20	C ₀ = 1 × 10 ⁻⁵ M
			10	-		59.60	18	
			15	-		68.38	0	
			20	-		69.83	18	
Ming, 2004	Dip coating	450	SiO ₂ :TiO ₂ 2:1 molar	-	200 – 230	-	Near 0	

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบและสรุปสมบัติต่างๆของสารเคลือบ (ต่อ)

งานวิจัย	Coating Method	Calcination temperature (°C)	สารตัวเติม (mol%)		ความเข้มแสง (mW/cm ²)	Photocatalytic efficiency (%) (6 h)	Contact angle (Irradiation time = 30 min) (degree)	หมายเหตุ
			SiO ₂	SnO ₂				
Kwon et al., 2003	Dip coating	500	50	-	-	95 (2 h)	10	
Maeda and Yamasaki, 2005	Spin coating	250	20	-	20	-	0 (10 min)	
This work	Spin coating	500	-	1 3 5 10	3.89	85.53 98.13 91.53 83.66	12 0 6 8	C ₀ = 1 × 10 ⁻⁵ M

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบและสรุปสมบัติต่างๆของสารเคลือบ (ต่อ)

งานวิจัย	Coating Method	Calcination temperature (°C)	สารตัวเติม (mol%)		ความเข้มแสง (mW/cm ²)	Photocatalytic efficiency (%) (6 h)	Contact angle (Irradiation time = 30 min) (degree)	หมายเหตุ
			SiO ₂	SnO ₂				
This work	spin coating	600	1	1	3.89	82.51	7	C ₀ = 1 × 10 ⁻⁵ M
			3	3		67.72	0	
Sayıkan et al., 2007	Spin coating	-	-	5	69	94 (4.5 h)	3-5	C ₀ = 20 mg/l
Liu et al., 2002	Dip coating	450	-	1-3	0.078	58.33	0	C ₀ = 46 mg/l
Liqiang et al., 2005	-	600	-	3	-	สูงสุด	-	ผง

บรรณานุกรม

- เล็ก สีคง. (2547). *วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม*, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- Brinker, C.J., and Scherer, G.W. (1990). *Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, Academic Press, New York.
- Yosry, A. Attia. (1993). *Sol-gel Processing and Applications*, New York.
- Benabbou, A.K., Derriche, Z., Felix, C., Lejeune, P., Guillard, C. (2007). "Photocatalytic inactivation escherischia coli effect of concentration of TiO₂ and microorganism, nature and intensity of UV irradiation." *Applied Catalysis B: Environmental*, 76, 257-263.
- Blake, D.M., Maness, P.C., Huang,Z., Wolfrum, E.J., Huang, J., Jacoby, W.A. (1999). "Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells." *Separation and Purification Methods*, 28(1), 1-5.
- Chai, S.Y., Kim, Y.S., and Lee, W.I. (2006). "Photocatalytic property of TiO₂ loaded with SnO₂ nanoparticles." *J Electroceram*, 17, 323–326.
- Chatterjee, S. (2008). "Titania–germanium nanocomposite as a photovoltaic material." *Solar Energy*, 82, 95–99.
- Cheng, P., Li, W., Zhou, T., Jin, Y., Gu, M. (2004). "Physical and photocatalytic properties of zinc ferrite doped titania under visible light irradiation." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 168, 97–101.
- Dadjour, M.F., Ogino, C., Matsumura, S., Shimizu, N. (2006). "Disinfection of *Legionella Pneumophila* by ultrasonic treatment with TiO₂." *Water Research*, 40, 1137- 1142.
- Evans, P., and Sheel, D.W. (2007). "Photoactive and antibacterial TiO₂ thin films on stainless steel." *Surface & coatings Technology*, 201, 9319-9324.
- Gould, P. (2003). "Smart clean surfaces." *Materialstoday*, November, 44-48.
- Gopal, K., Shankar, K., Paulose, M., Oomman K. Varghese, and Craig A. Grimes. (2006). "Use of highly-ordered TiO₂ nanotube arrays in dye-sensitized solar cells." *Nano Letters*, 6(2), 215-218.

- Guan, K., Lu, B., and Yin, Y. (2003). "Enhanced effect and mechanism of SiO₂ addition in super hydrophilic property of TiO₂ films." *Surface and Coatings Technology*, 173, 219–223.
- Harizanov, O., Ivnova, T., and Harixanova, A. (2001). "Study of sol–gel TiO₂ and TiO₂ - MnO obtained from a poeitized solution." *Material Letter*, 49, 165-171.
- Hong, S. S., et al. (2003). "Synthesis of nanosized TiO₂/SiO₂ particles in the microemulsion and their photocatalytic activity on the decomposition of *p*-nitrophenol." *Catalysis Today*, 87, 99–105.
- Hou, L.R., Yuan, C.Z., and Peng, Y. (2007). "Synthesis and photocatalytic property of SnO₂/TiO₂ nanotubes composites." *Journal of Hazardous Materials*, B139, 310-315.
- Hubbell, D.A., and Hubbell, M.C. (2005). "environmental coatings assemblies," U. S. Patent 0159309, July 21, 2005.
- Kanai, N., Nuida, T., Ueta, K., Hashimoto, K., Watanabe, T., Ohsaki, H. (2004). "Photocatalytic efficiency of TiO₂/SnO₂ thin film stacks prepared by DC magnetron sputtering." *Vacuum*, 74, 723-727.
- Kim, K.D., Han, D.N., Lee, J.B., Kim, H.T. (2005). "Formation and characterization of Ag deposited TiO₂ nanoparticles by chemical reduction method." *Scripta Materialia*, 54, 143– 146.
- Kim, S.Y., Chang, T.S., Lee, D.K., Shin, C.H. (2004). "Photocatalytic decomposition of methylene blue over nanosized titania partical." *J.Ind.Eng.Chem*, 2, 194-201.
- Koide, S., and Nonami, T. (2007). "Disinfecting efficacy of a plastic covered with photocatalyst for postharvest." *Food Control*, 18, 1-4.
- Kwon, C.H., et al. (2003). "Preparation and characterization of TiO₂–SiO₂ nano-composite thin films." *Ceramics International*, 29, 851–856.
- Lee, M., Lee, G.D., and Hong, S.S. (2003). "A sythesis of titanium dioxides prepare by reverse microemulsion method using nonionic surfactanta with different hydrophilic group and their photocatalytic activity." *Industy Engineering chemistry*, 9(4), 412-418.
- Lee, Y.C., Hong, Lee, Y., H.Y., Kim, H.,Young, Jung, J., Ko, K.H., Jung, H.S., Hong, K.S. (2003). "Photocatalysis and hydrophilicity of doped TiO₂ thin films." *Journal of Colloid and Interface Science*, 267, 127–131.

- Li, Y., Li, X., Li, J., Yin, J. (2005). "TiO₂-coated active carbon composites with increased photocatalytic activity prepared by a properly controlled sol-gel method." *Materials Letters*, 59, 2659–2663.
- Liu, Q., Wu, X., Wang, B., and Liu, Q. (2002). "Preparation and super-hydrophilic properties of TiO₂/SnO₂ composite thin film." *Materials Research Bulletin*, 37, 2255-2262.
- Liu, Z., Zhou, Y., Li, Z., Wang, Y., Ge, C. (2007). "Enhanced photocatalytic activity of (La, N) co doped TiO₂ by TiCl₄ sol-gel autoigniting synthesis." *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 14(6), 552-557.
- Maeda, M., and Yamasaki, S. (2005). "Effect of silica addition on crystallinity and photo-induced hydrophilicity of titania-silica mixed films prepared by sol-gel process." *Thin Solid Films*, 483, 102–106.
- Mao, L., Li, Q., Dang, H., Zhang, Z. (2005). "Synthesis of nanocrystalline TiO₂ with high photoactivity and large specific surface area by sol-gel method." *Materials Research Bulletin*, 40, 201–208.
- Maneerat C., and Hayata, Y. (2006). "Antifungal activity of TiO₂ photocatalysis against *Penicillium Expansum* in vitro and in fruit tests". *International Journal of Food Microbiology*, 107, 99-103.
- Misook Kang, M., Choi, D.H., and Choung, S.J. (2005). "Methyl orange removal in a liquid photo system with nanometer sized V/TiO₂ particle." *J. Ind. Eng. Chem*, 2, 240-247.
- Pal, A., Pehkonen, S.O., Yu, L.E., Ray, M.B. (200&). "Photocatalytic inactivation of Gram positive and Gram-negatives bacterial using fluorescent light." *Journal of Photochemistry and photobiology A. Chemistry*, 126, 335-341.
- Rana, S., Rawat, J., Sorensson, M.M., Misra, R.D.K. (2006). "Antimicrobial function of Nd³⁺ doped anatase titania-coated nickel ferrite composite nanoparticles: A biomaterial system." *Acta Biomaterialia*, 2, 421-432.
- Rao, A.R., and Dutta, V. (2007). "Low-temperature synthesis of TiO₂ nanoparticles and preparation of TiO₂ thin films by spray deposition." *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91, 1075–1080.
- Sayilkan, F., Asil'urk, M., Tatar, P., Kiraz, N., Arpac, E., Sayilkan, H. (2007). "Photocatalytic performance of Sn-doped TiO₂ nanostructured mono and double layer thin films for

- malachite green dye degradation under UV and vis-lights.” *Journal of Hazardous Materials*, 144, 140–146.
- Sheng, Q. et al., (2006). “Synthesis of mesoporous titania with high photocatalytic activity by nanocrystalline particle assembly.” *Microporous and Mesoporous Materials*, 177 - 184.
- Sichel, C., Tello, J., de Cara, M., Fernandez-Ibanez, P. (2007). “Effect of UV solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi: *Fusarium* species.” *Applied Catalysis B: Environmental*, 74, 152-160.
- Sokmen, M., Degerli, S., and Aslan, A. (2008). “Photocatalytic disinfection of *Giardia intestinalis* and *Acanthamoeba castellanii* cysts in water.” *Experimental parasitology*, doi:10.1016/j.exppara.12.014.
- Vinodgopal, K., and Kamat, P.V. (1995). “Enhanced rates of photocatalytic degradation of an azo dye using SnO₂/TiO₂ coupled semiconductor thin-films.” *Environ. Sci. Technol*, 29(3), 841-845.
- Wang, Y.M., Liu, S.W., Lü, M.K., Wang, S.F., Gu, F., Gai, X.Z., Cui, X.P., Pan, J. (2004). “Preparation and photocatalytic properties of Zr⁴⁺-doped TiO₂ nanocrystals.” *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 215, 137–142.
- Wanga, C., Xu, B.Q., Wang, X., Zhao, J. (2005). “Preparation and photocatalytic activity of ZnO/TiO₂/SnO₂ mixture.” *Journal of Solid State Chemistry*, 178, 3500 -3506.
- Wang, W.H. (2004). (Birch Stewart Kolasch & Birch), “Fluorescent lamp device capable of cleaning air,” U.S. Patent 0226813, November 18, 2004.
- Yang, J., Li, D., Wang, X., Yang, X., Lu, L. (2002). “Rapid synthesis of nanocrystalline TiO₂/SnO₂ binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange.” *Journal of Solid State Chemistry*, 165, 193-198.
- Yanagisawa, K., and Owenstone, J. (1999). “Crystallization of anatase from amorphous titania using the hydrothermal technique: effects of starting material and temperature.” *J. Phys. Chem. B*, 103 (37), 7781 -7787.
- Zhang, Q., Gao, L., and Guo J. (2000). “Effects of calcination on the photocatalytic properties of nanosized TiO₂ powders prepared by TiCl₄ hydrolysis.” *Applied Catalysis B: Environmental*, 26(9), 207-215.

Zhou, M., Yu, J., Liu, S., Zhai, P., Jiang, L. (2007). "Effects of calcination temperatures on photocatalytic activity of SnO₂/TiO₂ composite films prepared by an EPD method." doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.021.

Zhao, L., Han, M., and Lian, J. (2007). "Photocatalytic activity of TiO₂ films with mixed anatase and rutile structures prepared by pulsed laser deposition." doi:10.1016/j.tsf.2007.10.102

Zheng, J., Yu, H., Li, X., Shang. (2007). "Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ nano structured thin film with a silver hierarchical configuration." *Applied Surface Science*, 254, 1630 - 1635.

www.aist.go.jp สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2548

www.antonio.licciulli.unile.it สืบค้นเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2548

www.NationalInstituteforMaterialsScience.htm สืบค้นเมื่อ 11 สิงหาคม 2548

<http://www.1.sivento.com/wps3/portal/en/aerosil/industries/glass/eponate.html> สืบค้นเมื่อ 12/01/05

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่าขนาดผลึกและปริมาณเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD ของฟิล์มสามองค์ประกอบ ที่อุณหภูมิ 600 °C
ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

สูตร	Pos. [2θ] 2θ	cosθ	FWHM [2θ]	β (เรเดียน)
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	25.4912	0.9754	0.4546	7.934 × 10 ⁻³
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	25.3654	0.9756	0.3247	5.667 × 10 ⁻³
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	25.2121	0.9759	0.4546	7.934 × 10 ⁻³

การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size) จาก Scherrer' equation โดยใช้ข้อมูลจากตารางก.1

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

เมื่อ	t	คือ ขนาดของผลึก (nm)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (CuK _α = 0.15406 nm)
	β	คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)
	θ	คือ มุมสะท้อน (องศา)

ตัวอย่างการคำนวณของขนาดผลึกของฟิล์ม TiO₂/SiO₂/SnO₂ ที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ
เมื่อ β คำนวณได้จาก

$$\beta = \frac{\text{FWHM} \times \pi}{180}$$

$$\beta = \frac{0.4546 \times \pi}{180}$$

$$\beta = 7.934 \times 10^{-3} \text{ เรเดียน}$$

$$t = \frac{0.9 \times 0.15406}{7.934 \times 10^{-3} \times 0.9754}$$

$$t = 17.92 \text{ nm}$$

การคำนวณหาร้อยละของเฟสที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สมการ

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_b = k_b A_b / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

เมื่อ	W_a	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟส อะนาเทส
	W_r	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟส รูไทล์
	W_b	คือ สัดส่วนน้ำหนักของเฟส บรูไนต์
	A_a	คือ ความเข้มของพีคอะนาเทส (101) (หักลบจากค่า background)
	A_r	คือ ความเข้มของพีครูไทล์ (110) (หักลบจากค่า background)
	A_b	คือ ความเข้มของพีคบรูไนต์ (121)
	k_b	มีค่าเท่ากับ 0.886
	k_a	มีค่าเท่ากับ 2.721

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละของเฟสของผงไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 700 °C

$$W_a = k_a A_a / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_a = 0.886 \times 653 / (0.886 \times 653 + 148.54)$$

$$W_a = 0.796$$

$$W_r = A_r / (k_a A_a + A_r + k_b A_b)$$

$$W_r = 148.54 / (0.886 \times 653 + 148.54)$$

$$W_r = 0.204$$

$$W_{\text{total}} = 0.796 + 0.204 = 1$$

Content of anatase = 79.6 %

Content of rutile = 20.4

ภาคผนวก ข. ตารางแสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 1×10^{-5} โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue ที่เวลาได้รับรังสียูวี (C)

ตาราง ข.1 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวีในเวลาต่างๆ ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ความหนา/ สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
1 ชั้น									
C/C_0	0.49047	0.42751	0.40816	0.56702	0.55987	0.49429	0.74900	0.70423	0.65524
2 ชั้น									
C/C_0	0.48772	0.49983	0.41495	0.37113	0.24767	0.16635	0.59150	0.50334	0.38896
3 ชั้น									
C/C_0	0.46043	0.40384	0.29385	0.41477	0.24834	0.17893	0.47018	0.32050	0.21946

ตาราง ข.2 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue ที่รับรังสียูวีเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SiO₂ ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ

ความหนา 1ชั้น/สุตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO ₂ /5SiO ₂	0.70332	0.63444	0.58195	0.65224	0.59630	0.54153	0.50481	0.32859	0.26712
C/C_0	0.70332	0.63444	0.58195	0.65224	0.59630	0.54153	0.50481	0.32859	0.26712
TiO ₂ /10SiO ₂	0.71100	0.66718	0.64910	0.69533	0.68818	0.65143	0.68611	0.59106	0.54253
C/C_0	0.71100	0.66718	0.64910	0.69533	0.68818	0.65143	0.68611	0.59106	0.54253
TiO ₂ /15SiO ₂	0.69923	0.69020	0.65144	0.79855	0.74432	0.67253	0.67399	0.49846	0.43205
C/C_0	0.69923	0.69020	0.65144	0.79855	0.74432	0.67253	0.67399	0.49846	0.43205
TiO ₂ /20SiO ₂	0.68599	0.62337	0.53814	0.46329	0.40669	0.35711	0.91102	0.88612	0.82445
C/C_0	0.68599	0.62337	0.53814	0.46329	0.40669	0.35711	0.91102	0.88612	0.82445

ตาราง ข.3 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SiO₂ ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ

ความหนา 2ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)
TiO ₂ /5SiO ₂	0.48748	0.39375	0.32259	0.68301	0.57535	0.44896	0.57074	0.50231	0.40547
C/C ₀	0.48748	0.39375	0.32259	0.68301	0.57535	0.44896	0.57074	0.50231	0.40547
TiO ₂ /10SiO ₂	0.59693	0.57913	0.48956	0.58603	0.49315	0.42684	0.56068	0.52446	0.45763
C/C ₀	0.59693	0.57913	0.48956	0.58603	0.49315	0.42684	0.56068	0.52446	0.45763
TiO ₂ /15SiO ₂	0.49685	0.40999	0.39425	0.63261	0.51625	0.37803	0.44570	0.34856	0.35677
C/C ₀	0.49685	0.40999	0.39425	0.63261	0.51625	0.37803	0.44570	0.34856	0.35677
TiO ₂ /20SiO ₂	0.34441	0.27717	0.240195	0.52637	0.45648	0.39607	0.47108	0.43442	0.38206
C/C ₀	0.34441	0.27717	0.24020	0.52637	0.45648	0.39607	0.48436	0.44785	0.43252

ตาราง ข.4 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SiO₂ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

ความหนา 3 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO ₂ /5SiO ₂	0.54497	0.45332	0.39895	0.75532	0.71474	0.65584	0.37737	0.24676	0.17207
C/C ₀	0.54497	0.45332	0.39895	0.75532	0.71474	0.65584	0.37737	0.24676	0.17207
TiO ₂ /10SiO ₂	0.44000	0.35611	0.29693	0.76216	0.72316	0.72787	0.51718	0.43803	0.40405
C/C ₀	0.44000	0.35611	0.29693	0.76216	0.72316	0.72787	0.51718	0.43803	0.40405
TiO ₂ /15SiO ₂	0.50836	0.44351	0.41566	0.59591	0.48623	0.35511	0.49019	0.34868	0.31618
C/C ₀	0.50836	0.44351	0.41566	0.59591	0.48623	0.35511	0.49019	0.34868	0.31618
TiO ₂ /20SiO ₂	0.31859	0.25640	0.17733	0.71169	0.56805	0.47264	0.38218	0.31393	0.30170
C/C ₀	0.31859	0.25640	0.17733	0.71169	0.56805	0.47264	0.38218	0.31393	0.30170

ตาราง ข.5 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SnO₂ ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ

ความหนา 1 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO ₂ /SnO ₂	0.49927	0.40444	0.40323	0.38231	0.35441	0.30813	0.46130	0.41780	0.37607
C/C ₀	0.49927	0.40444	0.40323	0.38231	0.35441	0.30813	0.46130	0.41780	0.37607
TiO ₂ /3SnO ₂	0.52735	0.47412	0.45825	0.40121	0.37789	0.35658	0.49670	0.46140	0.45381
C/C ₀	0.52735	0.47412	0.45825	0.40121	0.37789	0.35658	0.49670	0.46140	0.45381
TiO ₂ /5SnO ₂	0.56663	0.56482	0.52552	0.41209	0.38564	0.36086	0.46134	0.41611	0.38827
C/C ₀	0.56663	0.56482	0.52552	0.41209	0.38564	0.36086	0.46134	0.41611	0.38827
TiO ₂ /10SnO ₂	0.56663	0.56482	0.52552	0.43353	0.41168	0.37158	0.55331	0.51529	0.49173
C/C ₀	0.52382	0.50071	0.50819	0.43353	0.41168	0.37158	0.55331	0.51529	0.49173

ตาราง ข.6 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SnO₂ ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ

ความหนา 2 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO ₂ /SnO ₂	0.51841	0.47020	0.42331	0.31744	0.22529	0.16548	0.33684	0.26284	0.21191
C/C ₀	0.51841	0.47020	0.42331	0.31744	0.22529	0.16548	0.33684	0.26284	0.21191
TiO ₂ /3SnO ₂	0.29484	0.20580	0.15131	0.27064	0.21409	0.16154	0.35639	0.28248	0.22708
C/C ₀	0.29484	0.20580	0.15131	0.27064	0.21409	0.16154	0.35639	0.28248	0.22708
TiO ₂ /5SnO ₂	0.47996	0.45863	0.43565	0.35282	0.29635	0.24087	0.36706	0.27541	0.20736
C/C ₀	0.47996	0.45863	0.43565	0.35282	0.29635	0.24087	0.36706	0.27541	0.20736
TiO ₂ /10SnO ₂	0.59106	0.59129	0.58146	0.26121	0.26945	0.27587	0.36330	0.29088	0.23587
C/C ₀	0.59106	0.59129	0.58146	0.26121	0.26945	0.27587	0.36330	0.29088	0.23587

ตาราง ข.7 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ ของฟิล์ม TiO₂/SnO₂ ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

ความหนา 3 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)	$C \times 10^{-5}$ (M)
TiO ₂ /SnO ₂	0.40979	0.38100	0.34052	0.18222	0.09900	0.03621	0.24433	0.12143	0.14465
C/C ₀	0.40979	0.38100	0.34052	0.18222	0.09900	0.03621	0.24433	0.12143	0.14465
TiO ₂ /3SnO ₂	0.55303	0.44665	0.32945	0.29560	0.15861	0.10981	0.16618	0.05112	0.01875
C/C ₀	0.55303	0.44665	0.32945	0.29560	0.15861	0.10981	0.16618	0.05112	0.01875
TiO ₂ /5SnO ₂	0.31796	0.28245	0.25788	0.31950	0.20750	0.18169	0.29769	0.15173	0.08470
C/C ₀	0.31796	0.28245	0.25788	0.31950	0.20750	0.18169	0.29769	0.15173	0.08470
TiO ₂ /10SnO ₂	0.45272	0.42220	0.41446	0.33177	0.26011	0.22059	0.32510	0.21401	0.16343
C/C ₀	0.45272	0.42220	0.41446	0.33177	0.26011	0.22059	0.32510	0.21401	0.16343

ตาราง ข.8 ความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆของฟิล์ม
TiO₂/SiO₂/SnO₂ ที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

ความหนา 3 ชั้น/ สูตร	C/C ₀		
	2 h	4 h	6 h
	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)	C × 10 ⁻⁵ (M)
Uncoated	0.77189	0.79020	0.76936
Pure TiO ₂	0.56665	0.43292	0.31937
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	0.39171	0.238125	0.17486
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	0.43539	0.27925	0.19174
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	0.46015	0.34803	0.22200
TiO ₂ /SiO ₂ /10SnO ₂	0.47007	0.32698	0.23359
TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂	0.43266	0.33624	0.27311
TiO ₂ /3SiO ₂ /3SnO ₂	0.50688	0.41166	0.32278
TiO ₂ /3SiO ₂ /5SnO ₂	0.61333	0.51207	0.46056
TiO ₂ /3SiO ₂ /10SnO ₂	0.73409	0.69565	0.65459
TiO ₂ /5SiO ₂ /SnO ₂	0.57460	0.40313	0.30758
TiO ₂ /5SiO ₂ /3SnO ₂	0.59866	0.49336	0.43032
TiO ₂ /5SiO ₂ /5SnO ₂	0.53109	0.40844	0.33761
TiO ₂ /5SiO ₂ /10SnO ₂	0.47271	0.44798	0.36488
TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂	0.60659	0.51461	0.48557
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	0.62239	0.56445	0.53579
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	0.54648	0.51536	0.46020
TiO ₂ /10SiO ₂ /10SnO ₂	0.53477	0.42723	0.34915
TiO ₂ /15SiO ₂ /SnO ₂	0.62419	0.54772	0.50323
TiO ₂ /15SiO ₂ /3SnO ₂	0.71047	0.68044	0.69046
TiO ₂ /15SiO ₂ /5SnO ₂	0.43408	0.31346	0.22339

ตาราง ข.9 เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ
ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 1 ชั้นเคลือบ

ความหนา 1 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
Pure TiO ₂	50.95	57.25	59.18	43.30	44.01	50.57	25.10	29.58	34.48
TiO ₂ /5SiO ₂	29.67	36.56	41.81	34.78	40.37	45.85	49.52	67.14	73.29
TiO ₂ /10SiO ₂	28.90	33.28	35.09	30.47	31.18	34.86	31.39	40.89	45.75
TiO ₂ /15SiO ₂	30.08	30.98	34.86	20.15	25.57	32.75	32.60	50.15	56.80
TiO ₂ /20SiO ₂	31.40	37.66	46.19	53.67	59.33	64.29	8.90	11.39	17.56
TiO ₂ /SnO ₂	50.07	59.56	59.68	61.77	64.56	69.19	53.87	58.22	62.39
TiO ₂ /3SnO ₂	47.27	52.59	54.18	59.88	62.21	64.34	50.33	53.86	54.62
TiO ₂ /5SnO ₂	43.34	43.52	47.45	58.79	61.44	63.91	53.87	58.39	61.17
TiO ₂ /10SnO ₂	47.62	49.93	49.18	56.65	59.55	62.84	44.67	48.47	50.83

ตาราง ข.10 เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ
ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ

ความหนา 2 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
Pure TiO ₂	51.23	50.02	58.50	62.89	75.23	83.37	40.85	49.67	61.10
TiO ₂ /5SiO ₂	51.25	60.62	67.74	31.70	42.46	55.10	42.93	49.77	59.45
TiO ₂ /10SiO ₂	40.31	42.09	51.04	41.40	50.69	57.32	43.93	47.55	54.24
TiO ₂ /15SiO ₂	50.32	59.00	60.58	36.74	48.38	62.20	55.43	65.14	64.32
TiO ₂ /20SiO ₂	65.56	72.28	75.98	47.36	54.35	60.39	52.89	56.56	61.79
TiO ₂ /SnO ₂	48.16	52.98	57.67	68.26	77.47	83.45	66.32	73.72	78.81
TiO ₂ /3SnO ₂	70.52	79.42	84.87	72.94	78.59	83.85	64.36	71.75	77.29

ตาราง ข.10 เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ
ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 2 ชั้นเคลือบ (ต่อ)

ความหนา 2 ชั้น/สูตร	300 °C			400 °C			500 °C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
TiO ₂ /5SnO ₂	52.00	54.14	56.44	64.72	70.37	72.70	63.29	72.46	79.26
TiO ₂ /10SnO ₂	40.89	40.87	41.85	73.88	73.06	72.41	63.67	70.91	76.41

ตาราง ข.11 เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ
ของฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

ความหนา 3 ชั้น/สูตร	300°C			400°C			500°C		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
Pure TiO ₂	53.96	59.62	70.62	58.52	75.17	82.11	52.98	67.95	78.05
TiO ₂ /5SiO ₂	45.50	54.67	60.11	24.47	28.53	34.42	62.26	75.32	82.79
TiO ₂ /10SiO ₂	56.00	64.39	70.31	23.78	27.68	27.21	48.28	56.20	59.60
TiO ₂ /15SiO ₂	49.16	55.65	58.43	40.41	51.38	64.49	50.98	65.13	68.38
TiO ₂ /20SiO ₂	68.14	74.36	82.27	28.83	43.20	52.74	61.78	68.61	69.83
TiO ₂ /SnO ₂	59.02	61.90	65.95	81.78	90.10	96.38	75.57	87.86	85.53
TiO ₂ /3SnO ₂	44.70	55.34	67.06	70.44	84.14	89.02	83.38	94.89	98.13
TiO ₂ /5SnO ₂	68.20	71.76	74.21	68.05	79.25	81.83	70.23	84.83	91.53
TiO ₂ /10SnO ₂	56.80	57.43	58.55	66.82	73.99	77.94	67.49	78.60	83.66

ตาราง ข.12 เปอร์เซ็นต์การสลายสีของสารละลาย Methylene blue เมื่อได้รับรังสียูวีเป็นเวลาต่างๆ
ของฟิล์มสามองค์ประกอบที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

ความหนา 3 ชั้น/ สูตร	% Degradation		
	2 h	4 h	6 h
	$C \times 10^{-5} (M)$	$C \times 10^{-5} (M)$	$C \times 10^{-5} (M)$
Uncoated	22.81	20.98	23.06
Pure TiO ₂	43.34	56.71	68.06
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	60.83	80.09	82.51
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	56.46	72.08	80.83
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	53.99	65.20	77.80
TiO ₂ /SiO ₂ /10SnO ₂	52.99	67.30	76.64
TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂	56.73	66.38	72.69
TiO ₂ /3SiO ₂ /3SnO ₂	49.31	58.83	67.72
TiO ₂ /3SiO ₂ /5SnO ₂	38.67	48.79	53.94
TiO ₂ /3SiO ₂ /10SnO ₂	26.59	30.44	34.54
TiO ₂ /5SiO ₂ /SnO ₂	42.54	59.69	69.24
TiO ₂ /5SiO ₂ /3SnO ₂	40.13	50.66	56.97
TiO ₂ /5SiO ₂ /5SnO ₂	46.89	59.16	66.24
TiO ₂ /5SiO ₂ /10SnO ₂	52.73	55.20	63.51
TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂	39.34	48.54	51.44
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	37.76	43.56	46.42
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	45.35	48.46	53.98
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	46.52	57.28	65.09
TiO ₂ /15SiO ₂ /SnO ₂	37.58	45.23	49.68
TiO ₂ /15SiO ₂ /3SnO ₂	28.95	31.96	30.95
TiO ₂ /15SiO ₂ /5SnO ₂	56.59	68.65	77.66

ตารางที่ ข.13 มุมสัมผัสของกระจกโซดาไล่มที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มที่
เติม SiO₂ และ SnO₂ เมื่อได้รับรังสียูวี สักระยะที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์ม 3 ชั้น
เคลือบ

เวลา (นาที) Sample	มุมสัมผัส (องศา)						
	0	5	10	15	20	25	30
Uncoated	22	18	16	14	10	9	6
Pure TiO ₂	30	28	25	22	18	16	13
TiO ₂ /5SiO ₂	45	39	36	33	28	26	20
TiO ₂ /10SiO ₂	38	33	30	27	24	21	18
TiO ₂ /15SiO ₂	6	4	3	2	0	0	0
TiO ₂ /20SiO ₂	32	30	28	26	22	20	18
TiO ₂ /SnO ₂	40	37	32	28	23	18	12
TiO ₂ /3SnO ₂	20	17	14	10	4	2	0
TiO ₂ /5SnO ₂	20	18	16	13	11	9	6
TiO ₂ /10SnO ₂	22	20	17	14	11	9	8

ตารางที่ ข.14 มุมสัมผัสของกระจกโซดาไลม์ที่เคลือบด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับรังสียูวี สังกะระห์ที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์ม 3 ชั้นเคลือบ

เวลา (นาที) Sample	มุมสัมผัส (องศา)						
	0	5	10	15	20	25	30
Uncoated	22	18	16	14	10	9	6
TiO ₂ /SiO ₂ /SnO ₂	28.0	25	22	20	16	12	7
TiO ₂ /SiO ₂ /3SnO ₂	44.0	38	33	27	20	16	12
TiO ₂ /SiO ₂ /5SnO ₂	34.0	30	26	21	17	13	9
TiO ₂ /SiO ₂ /10SnO ₂	30.0	26	24	20	16	12	9
TiO ₂ /3SiO ₂ /SnO ₂	37.0	31	27	22	18	13	9
TiO ₂ /3SiO ₂ /3SnO ₂	23.0	20	18	14	11	8	0
TiO ₂ /3SiO ₂ /5SnO ₂	28.0	24	20	16	12	8	3
TiO ₂ /3SiO ₂ /10SnO ₂	30.0	24	20	15	11	8	5
TiO ₂ /5SiO ₂ /SnO ₂	32.0	27	25	20	17	13	8
TiO ₂ /5SiO ₂ /3SnO ₂	32.0	26	23	19	15	11	6
TiO ₂ /5SiO ₂ /5SnO ₂	22.0	19	16	12	7	5	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /SnO ₂	30.0	24	22	18	14	9	2
TiO ₂ /10SiO ₂ /3SnO ₂	14.0	10	8	5	2	0	0
TiO ₂ /10SiO ₂ /5SnO ₂	16.0	13	12	12	12	10	10
TiO ₂ /15SiO ₂ /SnO ₂	48.0	42	34	28	22	18	14
TiO ₂ /15SiO ₂ /3SnO ₂	27.0	25	22	19	17	16	15
TiO ₂ /15SiO ₂ /5SnO ₂	32.0	32	28	25	22	19	15
TiO ₂ /15SiO ₂ /10SnO ₂	39.0	39	32	28	25	20	16

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวจิราภรณ์ คำจันทร์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812010	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2546

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2549
- ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนผู้ช่วยสอน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Jiraporn Damchan , Lek Sikong , Kalayanee Kooptarnond, Sutham Niyomwas “Effect of Doped SiO₂ and Calcinations Temperature on Phase Transformation of TiO₂ Photocatalyst Prepared by Sol-gel Method” International Conference Tentative Program on Mining, Materials and Petroleum Engineering, The Frontiers of Technology Phuket Graceland Resort and Spa Phuket 10-12 May 2007, Thailand.

- Jiraporn Damchan , Lek Sikong , Kalayanee Kooptarnond, Sutham Niyomwas “Contact angle of glass substrate coated with TiO₂/SiO₂ thin film” The First Thailand National Nanotechnology Conference on Nanomaterials, Pharmaceuticals, Devices, Central Duangtawan Chiang Mai 14 – 16 August 2007, Thailand.