



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี)

ปริญญา

เคมี	เคมี
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การเตรียม และตรวจสอบลักษณะแผ่นฟิล์มบางของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน โดยวิธี โซล-เจล สำหรับย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17
	Synthesis and Characterization of Nanocrystalline TiO_2 Thin Films by Sol-gel Method for Photodegradation of Reactive Yellow 17
นามผู้วิจัย	นายราชนัน เลิศพยัคฆรัตน์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	(รองศาสตราจารย์สุจิตต์ สงวนเรือง, Ph.D.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันทมน คุณแสง, Ph.D.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(อาจารย์ธารินี สาลีโกษณ์, ประ.ค.)
หัวหน้าภาควิชา	(รองศาสตราจารย์สุภา หารหนองบัว, Dr. rer. nat.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียม และตรวจสอบลักษณะแผ่นฟิล์มบางของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน
โดยวิธีโซล-เจล สำหรับย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17

Synthesis and Characterization of Nanocrystalline TiO_2 Thin Films by Sol-gel Method for
Photodegradation of Reactive Yellow 17

โดย

นายราชัน เลิศพยัคฆรัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ราชัน เลิศพยัคฆรัตน์ 2554: การเตรียม และตรวจสอบลักษณะแผ่นฟิล์มบางของผลึก
ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน โดยวิธีโซล-เจล สำหรับย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี) สาขาเคมี ภาควิชาเคมี อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุจิตต์ สงวนเรือง, Ph.D. 96 หน้า

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีรูพรุน จาก
กระบวนการ โซล-เจลประยุกต์ โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) เป็นสารตั้ง
ต้น ร่วมกับ เอทานอล (EtOH) กรดอะซิติก (AcOH) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc.HCl) และ
สารลดแรงตึงผิว อัตราส่วนโดยโมลของ EtOH: สารลดแรงตึงผิว (R): AcOH: TTIP: conc.HCl
เป็น 45: R: 6: 1: 0.1 งานวิจัยนี้ใช้สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35
และเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด เป็น 0.25 0.5 1 2 3 และ 4 โมล ฟิล์ม
บางไทเทเนียมไดออกไซด์ได้จากการจุ่มตัวรองรับ โบโรซิลิเกต (Borosilicate) ลงในสารละลาย
โซล โดยเทคนิค dip-coating แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ผล
จากการตรวจสอบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค เอกซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน ยูวี-วิสิเบิล
สเปกโตรสโกปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส มี
ลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาด 25-32 นาโนเมตร และเริ่มดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความ
ยาวคลื่นประมาณ 380 นาโนเมตร งานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มที่ได้จากการเติมสารลดแรงตึงผิวมีความ
เป็นรูพรุนสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และการรวมตัวของอนุภาคลดลง ส่งผลให้พื้นที่
ผิวของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟิล์มแบบไม่เติมสารลดแรงตึงผิวจะมีความหนาแน่นของ
อนุภาคสูงกว่าและความขรุขระต่ำกว่า ผลจากการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม
ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ภายใต้แสง
อัลตราไวโอเล็ต พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ฟิล์มที่เตรียมจาก โซล-เจลที่เติมสารลดแรงตึงผิว
ในปริมาณต่ำๆ มีประสิทธิภาพสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และประสิทธิภาพมีแนวโน้ม
ลดลงเมื่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เติมสูงขึ้น โดยฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ปริมาณ
0.25 โมล มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ได้ 84.49
เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 120 นาที

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Rachan Leotphayakkarat 2011: Synthesis and Characterization of Nanocrystalline TiO₂ Thin Films by Sol-gel Method for Photodegradation of Reactive Yellow 17. Master of Science (Chemistry), Major Field: Chemistry, Department of Chemistry. Thesis Advisor: Associate Professor Sudjit Sanguanruang, Ph.D. 96 pages.

In this work, the porous thin films titanium dioxide photocatalyst were successfully prepared by an adapted sol-gel method using titanium tetraisopropoxide (TTIP) as a precursor with the addition of EtOH, AcOH, conc.HCl and the surfactants in the mol ratios of 1: 45: 6: 0.1: R, respectively. In this study three surfactants, TritonX-100, Tween 80 and Brij 35 were added into the gel with various amounts (R) of 0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 mol ratios. The prepared gels were deposited onto borosilicate glass substrates by dip-coating technique and then calcined at 500 °C for 15 minutes to obtain the films. The results from thin film characterizations by XRD, UV-Vis spectroscopy, SEM and AFM exhibited that all of prepared films were anatase phases of titanium dioxide with the particle sizes of 25-32 nm and the adsorption edges around 380 nm. The gels with surfactants adding gave the thin films with high porosity and loose particles aggregation denoting to the high surface area of prepared films while the without adding gave more dense and low roughness.

The results from photocatalytic degradations of reactive yellow 17 by the prepared films under the UV light showed that the degradation reaction obeyed the first order kinetics. The prepared thin films from the small amount of the surfactant exhibited higher catalytic activity than that of without the surfactant adding, but the activity was reduced when the amounts of the surfactants increased. The films from 0.25 mol ratios of tween 80/TTIP showed the highest photodegradation for the reactive yellow 17 within 120 minutes, 84.49%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สุกจิต สงวนเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ผศ.ดร. นัทธมน คุณแสงและ ดร. ชารินี สาลีโกชน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้
คำปรึกษา แนะนำข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือต่าง ๆ รวมทั้งสละเวลาในการตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมี และคณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน
และคอยให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ราชัน เลิศพยัคฆ์รัตน์

ธันวาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	15
อุปกรณ์	15
วิธีการ	17
ผลและวิจารณ์	22
สรุปผลการทดลอง	69
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	75
ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	75
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 อัตราส่วนโมลที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในปริมาณต่างๆ	19
2 อัตราส่วนโมล และปริมาณสาร ที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยเติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในปริมาณต่างๆ	19
3 อัตราส่วนโมล และปริมาณสาร ที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยเติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในปริมาณต่างๆ	20
4 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	24
5 ขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์อ่อนาเทศที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการ Sherrer	28
6 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุน ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากสารละลายโซล-เจล	29
7 ค่าความขรุขระ (Roughness) พื้นที่ผิว (Surface area) และขนาดอนุภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค AFM (Scan size = 500 x 500 nm)	58
8 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่งฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Without surfactant และ TritonX-100/TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ	60
9 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่งฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80 / TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ	62
10 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่งฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35 / TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ	66

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคท์	3
2	แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงาน และการเกิดช่องว่างที่เป็นบวกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสง	5
3	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมที่ฟิสิกส์ 17	11
4	กล้องจุลทรรศน์ (ก) ภาพวาดภาคตัดขวาง (ข) ภาพถ่ายใน	17
5	ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับโบโรซิลิเกตที่เตรียมโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ	22
6	ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับโบโรซิลิเกต ที่เตรียมโดยเติม Tween 80 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ	23
7	ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับโบโรซิลิเกต ที่เตรียมโดยเติม Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ	23
8	แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวรองรับโบโรซิลิเกตฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2) หน้า 1-9 ชั้น ผงไทเทเนียมไดออกไซด์จาก โซล-เจล TritonX-100/TTIP (1/2) และ JCPDS ที่ 01-0890-4921	25
9	แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 19 สภาวะ	26
10	เปรียบเทียบสเปกตราเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวรองรับโบโรซิลิเกต กับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียม โดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว	30
11	เปรียบเทียบสเปกตราเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนต่างๆ	31
12	เปรียบเทียบสเปกตราเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
13	33
14	35
15	36
16	37
17	38
18	39
19	41
20	42
21	43
22	44
23	45
24	46
25	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ภาพ AFM 3 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ	48
27	แถบการดูดกลืนแสงของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 ความเข้มข้น 5 mg/l	50
28	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต เมื่อไม่มี และมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	51
29	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วน TritonX-100/TTIP ที่แตกต่างกัน	52
30	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วน Tween 80/TTIP ที่แตกต่างกัน	52
31	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน Brij 35/TTIP ที่แตกต่างกัน	53
32	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ	55
33	กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	55
34	กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	56
35	กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	56
36	กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเยลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	56

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
37 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	57
38 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	57
39 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (4/1) ตัวเร่งปฏิกิริยา	57
40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ	59
41 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/4) ตัวเร่งปฏิกิริยา	60
42 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/2) ตัวเร่งปฏิกิริยา	60
43 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/1) ตัวเร่งปฏิกิริยา	60
44 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	61
45 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	61
46 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเยล โด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (4/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	61
47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
48 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	64
49 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	64
50 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	64
51 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	65
52 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	65
53 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสิริแอกทีฟเยล โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (4/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	65
54 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (% Decomposition rate) ของสิริแอกทีฟเยล โล 17 ที่เวลา 120 นาที เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ	67
55 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสิริแอกทีฟเยล โล 17 ที่เวลา 120 นาทีของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/4) เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ 7 ครั้ง	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

% T	=	เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง
•OH	=	ไฮดรอกซิลเรดิคัล
°C	=	องศาเซลเซียส
C	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C ₀	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
CB	=	แถบการนำไฟฟ้า
CO ₂	=	คาร์บอนไดออกไซด์
e ⁻ _{cb}	=	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
E _g	=	ช่องว่างแถบพลังงาน
h ⁺ _{vb}	=	โฮลที่แถบวาเลนซ์
H ₂ O	=	น้ำ
H ₂ O ₂	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
O ₂	=	ออกซิเจน
O ₂ ⁻	=	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล
OH ⁻	=	ไฮดรอกซิลไอออน
R	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์
r	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาท)
t	=	เวลาในการฉายแสง (นาท)
t _{0.5}	=	เวลาที่ความเข้มข้นของสารปราบศัตรูพืชลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเริ่มต้น (นาท)
TiO ₂	=	ไทเทเนียมไดออกไซด์
VB	=	แถบวาเลนซ์
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135 x 10 ⁻¹⁵ อิเล็กตรอนโวลต์-วินาที)
v	=	ค่าความถี่ (วินาที ⁻¹)
λ	=	ค่าความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
RY 17	=	Reactive Yellow 17

การเตรียม และตรวจสอบลักษณะแผ่นฟิล์มบางของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด
นาโนโดยวิธีโซล-เจล สำหรับย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17

Synthesis and Characterization of Nanocrystalline TiO_2 Thin Films by Sol-gel
Method for Photodegradation of Reactive Yellow 17

คำนำ

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม (photocatalysis) สำหรับบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำและอากาศ เนื่องจากปัจจุบันมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ โดยอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในหลายๆ อุตสาหกรรมที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ โรงงานประเภทนี้มีการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้าออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งสีที่ใช้ส่วนมากเป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะ โครงสร้างที่ค่อนข้างเสถียร จึงไม่สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีตามธรรมชาติ กระบวนการย่อยสลายแบบใช้แสงร่วมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากที่จะนำมาบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม

การนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำ สามารถใช้ได้ทั้งสองลักษณะ คือ ในรูปของผงที่แขวนลอยในน้ำ และในรูปของฟิล์มที่ยึดติดอยู่บนวัสดุตัวกลาง โดยการใช้งานไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบแรกนั้น ได้รับความนิยมนอย่างมากในช่วงต้นๆ ของงานวิจัย แต่เนื่องจากปัญหาของความจำเป็นในการแยกไททาเนียมไดออกไซด์ที่มี ลักษณะเป็นคอลลอยด์ออกจากน้ำหลังการบำบัดแล้ว มีความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง ส่งผลให้มีความไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การพัฒนาของงานวิจัยจึงหันมามุ่งเน้นในการหาวิธีการที่จะยึดติดไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุตัวกลาง แทนการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของผง นักวิจัยพบว่าหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งแบบใช้แสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ขนาดผลึก ขนาดอนุภาค รูปแบบของโครงสร้างผลึก พื้นที่ผิว และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยกระบวนการโซล-เจล เพื่อศึกษาถึงผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อลักษณะของแผ่นฟิล์ม และประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้นอกจากจะได้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนที่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้แล้ว ยังอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการเคลือบผิวไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุชนิดอื่นๆ ซึ่งอาจนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ต่อไปได้



วัตถุประสงค์

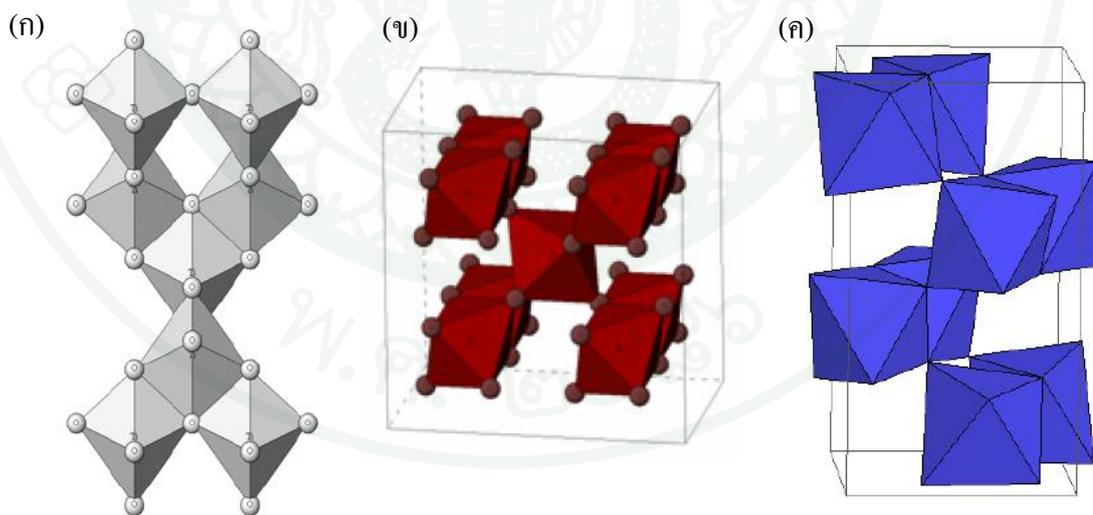
1. เตรียมแผ่นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุน จากกระบวนการโซล-เจล โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นแม่แบบ (template)
2. ศึกษาลักษณะและสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโคปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
3. ศึกษาประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต โดยการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17

การตรวจเอกสาร

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

โครงสร้างผลึกและสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาติมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และ บรูคไคท์ (brookite) ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบบรูคไคท์พบน้อยมากเมื่อเทียบกับรูปแบบอนาเทสและรูไทล์ ไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทสและรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (tetragonal) ส่วนบรูคไคท์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างผลึกอนาเทส, รูไทล์และบรูคไคท์ ในลักษณะการเชื่อมต่อกันของรูปทรงออกตะฮีดรอลของ (TiO_2) โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดจากการเชื่อมต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละทรงออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดจากการเชื่อมต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละทรงออกตะฮีดรอล ส่วนโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดจากการเชื่อมต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละทรงออกตะฮีดรอล



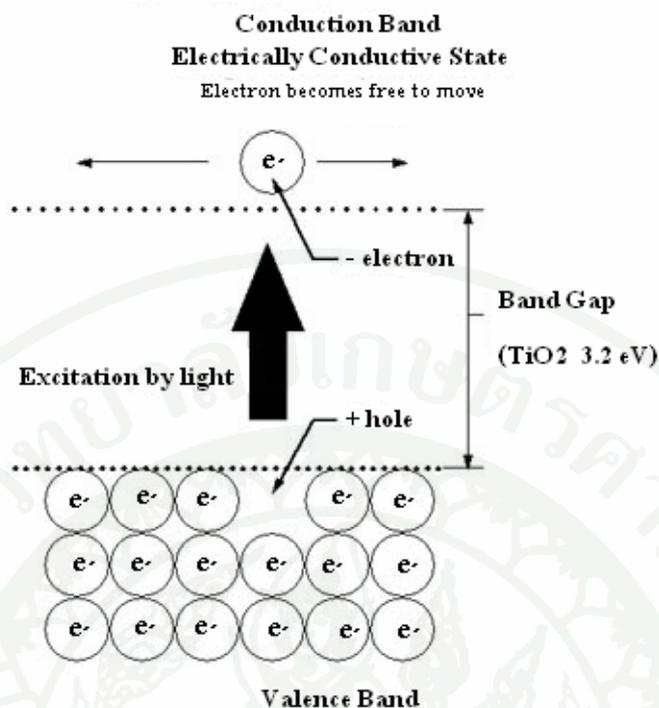
ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคท์

ที่มา: Namura (2002)

การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ใช้เป็นองค์ประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) และ ใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แสงร่วม

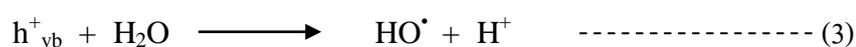
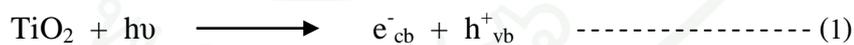
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสง ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้เป็นการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysis) คือ การเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่งสถานะ โดยทั่วไป โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (adsorbed) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในแง่ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลายตัว ในกรณีของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้รับพลังงานจากแสง ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ (valence band) ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้า แทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และโฮลกระจายอยู่ที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 2 โฮลที่เกิดขึ้นในแถบเวเลนซ์จะเป็นตัวออกซิไดส์หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (strong oxidant) และอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าจะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี (strong reductant)

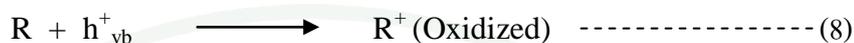


ภาพที่ 2 แสดงแผนภาพโครงสร้างแถบพลังงาน และการเกิดช่องว่างที่เป็นบวกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสง

ที่มา: Green Titan Inc. (2004)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้ (Al-Ekabi *et al.*, 1991; Ioannis and Triantafyllos, 2003)





โฮลที่แถบเวเลนซ์ (h_{vb}^+) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ions : OH^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO^\bullet) (สมการที่ 2) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่ดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน (สมการที่ 3) ส่วนอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}^-) จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ที่ดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O_2^-) (สมการที่ 4) ในการบำบัดสารอินทรีย์ (R) ไฮดรอกซิลเรดิคัล (HO^\bullet) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง (strong oxidizing agent) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง จะทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในสารละลาย ซึ่งดูดซับผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (สมการที่ 7) ส่วนโฮลที่แถบเวเลนซ์ (h_{vb}^+) ก็สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) ที่ปนเปื้อนในสารละลายได้โดยตรง (สมการที่ 8) แต่การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลและสารอินทรีย์เป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Matthews 1990; Kwaguchi 1994) นอกจากนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสมการที่ 5 เป็นตัวออกซิไดซ์ได้ดี และจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (สมการที่ 6)

การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น sputtering, chemical vapour decomposition (CVD) และวิธี โซล-เจล (sol-gel process) ในวิธีการเหล่านี้วิธีโซล-เจล เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจากสารที่เตรียมได้โดยวิธีนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง (high homogeneity) และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ราคาไม่แพง

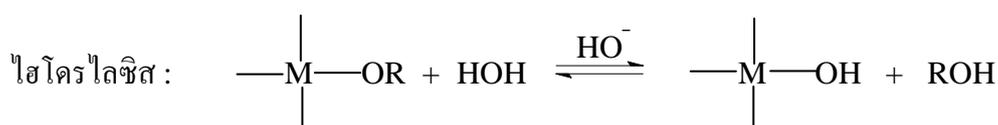
กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเตรียมวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ และสามารถเคลือบสารประกอบประเภทเซรามิกให้เป็นฟิล์มบางได้ รวมถึงควบคุมความหนาได้ด้วย นอกจากนี้แผ่นฟิล์มยังมีค่าการยึดเกาะ (bonding strength) กับวัสดุที่เป็นตัวรองรับได้ดี (Pätsi *et al.*, 1998) จากข้อดีของวิธีการนี้ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีผิวเรียบและสม่ำเสมอซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่าโซล (sol) ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ไปเป็นของแข็งที่เรียกว่าเจล (gel) ปฏิกริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกริยา คือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกริยาการควบแน่น (condensation) ขั้นตอนการเตรียมโซล-เจลโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (สุภา, 2549) ดังนี้

1. การเกิดโซล (formation of sol)
2. การเกิดเจล (formation of gel)
3. การบ่ม (aging)
4. การทำแห้ง (drying)
5. การให้ความร้อน (heat treatment)

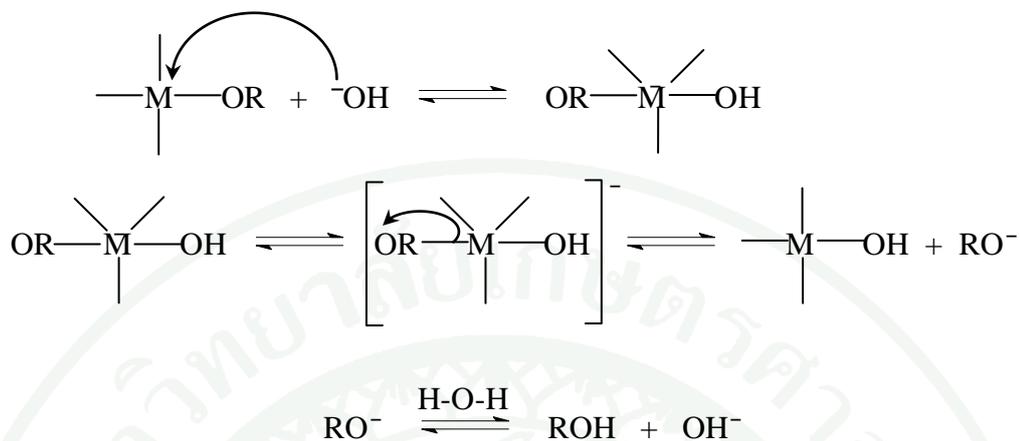
1. การเกิดโซล

ขั้นตอนแรกของการทำโซล คือการผสมสารตั้งต้นกับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้มักเป็นโลหะอัลคอกไซด์ ($M(OR)_n$ เมื่อ $R = CH_3-, C_2H_5-, C_3H_7-$ เป็นต้น และ M คือ โลหะ เช่น Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce เป็นต้น) เนื่องจากสารประเภทนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี โดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆแล้วเกิดเป็นสาร $-M-OH$ ปฏิกริยาในขั้นนี้อาจเกิดได้เร็วขึ้นถ้าเติมกรด หรือ เบสลงไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย ดังหัวข้อต่อไปนี้

1.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่ใช้เบสเป็นตัวเร่ง เกิดขึ้นดังนี้



กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

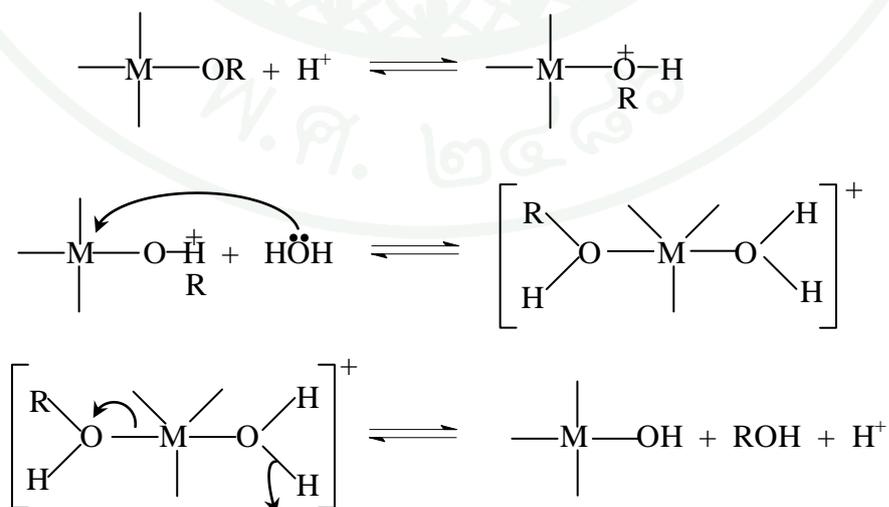


ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ -M-OH, แอลกอฮอล์ (ROH) และได้ตัวเร่งปฏิกิริยา OH⁻ กลับคืนมา

1.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ใช้กรดเป็นตัวเร่ง เกิดขึ้นดังนี้



กลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ -M-OH แอลกอฮอล์ (ROH) และได้ตัวเร่งปฏิกิริยา H⁺ กลับคืนมา

2. การเกิดเจล (formation of gel)

เจลเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของ -M-OH ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หลังการควบแน่นจะเกิดหมู่ -M-O-M- ขึ้น ซึ่งการควบแน่นนั้นแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การควบแน่นน้ำ และการควบแน่นแอลกอฮอล์

2.1 การควบแน่นน้ำ (water condensation) หลังการควบแน่นจะได้ H₂O และหมู่ -M-O-M-



2.2 การควบแน่นแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) หลังการควบแน่นจะได้หมู่ ROH และหมู่ -M-O-M-



3. การบ่ม (aging)

การบ่ม หมายถึงช่วงระยะเวลาในการทำให้เกิดเจลอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในช่วงระยะเวลานี้ ปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดขึ้นมากมาย ความแข็งแรงของพันธะ -M-O-M- เพิ่มขึ้น เจลเหนียวขึ้น และตัวทำละลายระเหยออกจาก โครงสร้างด้วย ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการบ่ม นอกจากนี้ยังมี อิทธิพลของออสโมซิส (osmosis) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่นในระบบที่เป็นสารละลายผสมระหว่าง แอลกอฮอล์กับน้ำ เนื่องจากแอลกอฮอล์ระเหยได้ง่ายกว่าน้ำ ทำให้มีความเข้มข้นของสารละลาย แตกต่างกันในบางบริเวณ จึงเกิดการแพร่ของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่อบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ส่งผลให้เจลเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

4. การทำแห้ง (drying)

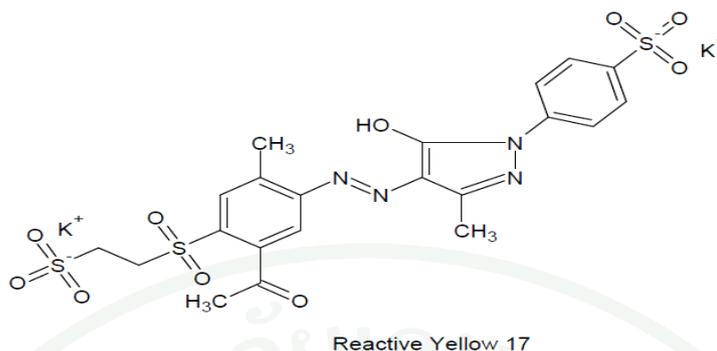
การทำแห้ง คือ การไล่ของเหลวในรูปพรุนออกจากโครงตาข่ายของเจล โดยในช่วงแรก อัตราการระเหยของของเหลวภายในรูปพรุนมีค่าคงที่ ซึ่งงานจะหดตัวในปริมาณเท่ากับปริมาณของเหลวที่ถูกระเหยออกไป จากนั้นการระเหยจะเริ่มยากขึ้นส่งผลให้เจลเกิดการหดตัว นอกจากนี้ การไหลของของเหลวออกจากรูปพรุนที่มีขนาดเล็กจะทำให้ยากกว่ารูปพรุนที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีอิทธิพลของความดันคาпилลารี (capillary pressure) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยค่าความดันคาпилลารีจะสูงเมื่อรูปพรุนมีขนาดเล็ก และจะมีค่าต่ำเมื่อรูปพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งถ้าหากขนาดรูพรุนในเจลมีความแตกต่างกันมากก็จะทำให้ความดันคาпилลารีของรูปพรุนที่อยู่ติดกันมีค่าต่างกันมากส่วนของผนังรูพรุนต้องรับภาระแรงดันนี้ นำไปสู่การยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนได้ วิธีที่จะทำให้คงเป็นโครงตาข่ายไว้ได้ คือการทำให้มีความแตกต่างของความดันนี้น้อยที่สุด โดยควบคุมอัตราปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นเพื่อให้เจลมีขนาดรูพรุนสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวของรูพรุนมากขึ้น

5. การให้ความร้อน (heat treatment)

การให้ความร้อนเป็นขั้นตอนการนำเจลมาเผาในสภาวะที่มีแก๊สที่ว่องไว เช่น การเผาในบรรยากาศของอากาศ ในบรรยากาศออกซิเจน โดยการเพิ่มความร้อนมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังอยู่ใน โครงสร้างออกไป เหลือไว้เฉพาะวัฏภาคของแข็งในรูปของสารประกอบออกไซด์ที่เกิดการหลอมรวมกันเป็นผลึกของแข็งที่มีโครงสร้างต่างๆกัน ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเผา ได้แก่ อุณหภูมิที่เผา อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน และสภาวะบรรยากาศการเผา

สีรีแอกทีฟยेलโล 17

รีแอกทีฟยेलโล 17 เป็นสีในกลุ่มสีรีแอกทีฟ (reactive dyes) มีโครงสร้างทางเคมีซึ่งประกอบด้วยหมู่อะโซ (aso, -N=N-) 1 หมู่ ดังแสดงในภาพที่ 3 รีแอกทีฟยेलโล 17 เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด สามารถละลายน้ำได้ดี มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่างโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโคเวเลนต์



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟเยลโล 17

ที่มา: Rupa (2007)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ivanda *et al.* (1998) ทำการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการ sol-gel โดยควบคุมปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสของ titanium (IV) isopropoxide ด้วยการใช้อนุพันธ์ esterification ระหว่างกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดออกซาลิก กับเอทานอล เพื่อให้เกิดโมเลกุลน้ำอย่างช้าๆ ในกระบวนการ sol-gel พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจนถึง 320 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะสูงขึ้นจาก 3 ถึง 280 ตารางเมตรต่อกรัม และสารประกอบอินทรีย์จะสลายหมดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และพื้นที่ผิวจะลดลงหลังจากเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส โดยปริมาณของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสแอนาเทสเพิ่มขึ้น ขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสแอนาเทสใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น

Bernardi *et al.* (2001) เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธี metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นจากผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการเคลือบ และผลของตัวรองรับ โดยใช้ตัวรองรับสองชนิด คือแผ่นแก้ว และแผ่น Si (100) พบว่าความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเคลือบ โดยฟิล์มจะหนาขึ้นเมื่อใช้เวลาในการเคลือบนานขึ้น ความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรองรับ โดยพบว่าฟิล์มที่เคลือบบน Si (100) เป็นผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสแอนาเทส ส่วนฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นแก้วนั้น ไม่มีลักษณะเป็นอัญฐาน การศึกษาสมบัติทางแสง โดย UV-vis spectroscopy พบว่าค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 72 ถึง 91 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 2.6

Dong *et al.* (2001) ทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์จากกระบวนการ โชล-เจล โดยใช้ titanium (IV) isopropoxide ในสารละลายไอโซโพรพานอล และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.7 นอร์มัล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 300-1100 °C พบว่าถ้าเผาที่อุณหภูมิ 300 °C ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงเป็นอสัณฐานแต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 °C จะเกิดผลึก ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส และถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1100 °C จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์ ซึ่งขนาดของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

Neppolian *et al.* (2001) ศึกษาการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17 และใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นพลังงานแสง พบว่าการย่อยสลายของสีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น และการเติม O_2 , H_2O_2 และ persulphat ion จะทำให้อัตราการย่อยสลายของสีเพิ่มขึ้น

Neppolian *et al.* (2003) ศึกษาปฏิกิริยาการโดยใช้แสงร่วมในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเยลโล 17 โดยใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) ซึ่งเคลือบบนแผ่นกระจก และใช้แสงอาทิตย์ในการให้พลังงาน พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายของสีจะสูงเมื่อสารละลายเป็นกรดหรือด่าง และพบว่า Na_2CO_3 และ $NaCl$ ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของสีลดลง ในทางตรงกันข้าม H_2O_2 และ $K_2S_2O_8$ จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของสีเพิ่มขึ้น

Balasubramanian *et al.* (2003) เตรียมฟิล์มหนาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นกระจก และเหล็กสแตนเลส จากกระบวนการ โชล-เจล โดยใช้ titanium (IV) isopropoxide ในสารละลายไอโซโพรพานอล กับ Diethanolamine และเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) พบว่าฟิล์มที่มีการเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25) จะหนาและแข็งแรงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติม ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างเฟสอนาเทส และรูไทล์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 100-150 นาโนเมตร

Bouras *et al.* (2004) เตรียมแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จาก titanium (IV) isopropoxide ในสารละลายชนิดต่างๆ เช่น cyclohexane acetone และ กรดอะซิติก แล้วเติมสารลดแรงตึงผิว (TritonX-100) ทำให้สามารถย่อยสลายสี basic blue ได้ภายในเวลา 10 ชั่วโมง

Wang *et al.* (2005) เตรียมและศึกษาการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุน จากกระบวนการโซล-เจล ซึ่งถูกปรับปรุงด้วยการเติมร่วมของสารลดแรงตึงผิวชนิด non-ionic คือ TritonX-100 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแบบ (templet) เพื่อให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้พบว่าสามารถกำจัด TritonX-100 ออกจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์ได้โดยการล้างออกด้วยน้ำ และแอลกอฮอล์ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสเปกตรัมของ FT-IR และได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสแอนาเทสเกิดขึ้น

Choi *et al.* (2006) เตรียมแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จาก titanium (IV) isopropoxide ในสารละลายไอโซโพรพานอล และกรดอะซิติก และเติมสารลดแรงตึงผิว (Tween 80) โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีพื้นที่ผิวสูงถึง 147 ตารางเมตรต่อกรัม และมีความพรุน 46 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายสี methylene blue และ creatinine ที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี

Valtierra *et al.* (2006) เตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนใยแก้วจากกระบวนการโซล-เจล โดยใช้ titanium (IV) isopropoxide เป็นสารตั้งต้น และเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว cetyltrimethyl ammonium bromide เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์มบางในขั้นตอนการเตรียม โซล-เจล แล้วทำการเผาฟิล์มบางที่ได้จากการจุ่มเคลือบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่ได้เป็นเนื้อเดียวกันและเกาะแน่นบนเส้นใยแก้ว ฟิล์มทั้งหมดเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสแอนาเทส มีลักษณะโครงสร้างเป็นเม็ดเล็กๆ และประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดต่างๆอยู่ในช่วง 1.5-3 ไมโครเมตร และพบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิวมีความขรุขระน้อยที่สุด ส่วนฟิล์มที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวจะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น และพบว่าฟิล์มที่มีความขรุขระมากจะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมดีกว่าฟิล์มที่มีความขรุขระน้อยกว่า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องเอกซเรย์ ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer; XRD, Rigaku model TTRAXII)
2. Brunauer-Emmett-Teller surface area (BET Surface Analyzer; Autosorb 1C Quantachrome Instrument)
3. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงอะตอม (Atomic force microscopy; AFM, AR MFP-3D model)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM, LEO Electron microscopy model 1450 VP)
4. เครื่องอบด้วยความร้อน (Oven, GCA Economy model 16 EG)
5. เครื่องชั่งละเอียด
6. แผ่นแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass, China)
7. เตาเผา (Furnace, LENTON)
8. ถังปฏิกิริยา (Reactor)
9. เครื่องเคลือบแบบจุ่ม (Dip-coater, PDC-01)
8. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทางเคมี

สารเคมี

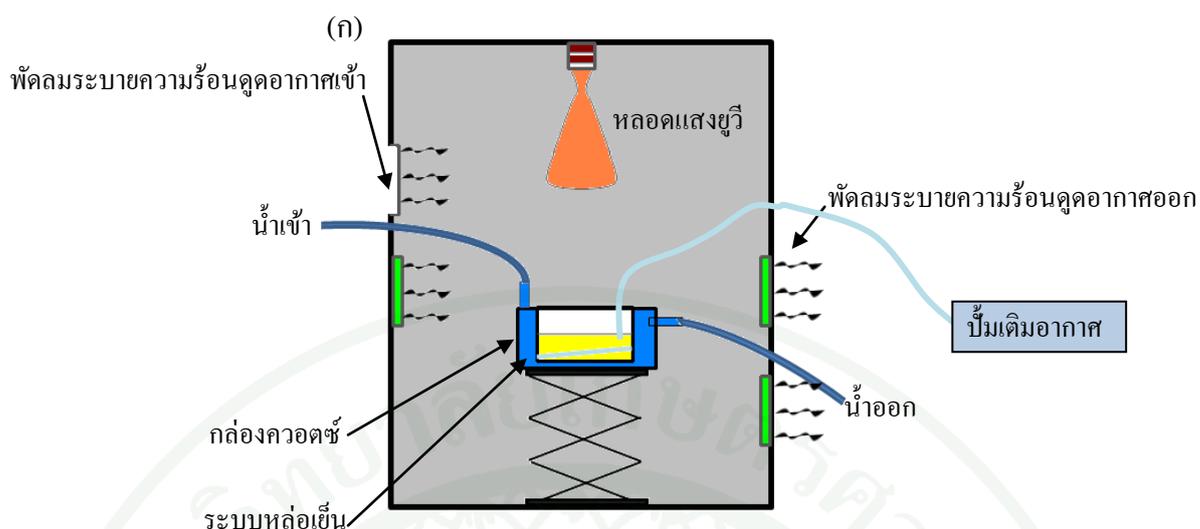
1. ไททานเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ บริษัท แอลดริช (Titanium(IV)isopropoxide; $Ti\{OCH(CH_3)_2\}_4$, Aldrich)
2. เอทานอล (Ethanol; CH_3CH_2OH , Carlo Erba)
3. อะซิโตน บริษัท แลป-สแกน (Acetone; CH_3COCH_3 , Lab-scan)
4. ไอโซโพรพานอล บริษัท แลป-สแกน (Isopropanol; $(CH_3)_2CHOH$, Lab-scan)
5. สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 บริษัท แอลดริช (Octylphenol-polyethylene glycol ether; $C_{34}H_{62}O_{11}$, Aldrich)

6. สารลดแรงตึงผิว Tween 80 บริษัท แอลดริช (Polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate; $C_{64}H_{124}O_{26}$, Aldrich)
7. สารลดแรงตึงผิว Brij 35 บริษัท แอลดริช (Polyoxyethylene (23) lauryl ether; $C_{58}H_{118}O_{24}$, Aldrich)
8. กรดไฮโดรคลอริก บริษัท เมิร์ก (Hydrochloric acid; HCl, Merck)
9. สีย้อมฟาร์แอกทีฟเยลโล 17 บริษัท ตั้งไทฮั่วเฮง จำกัด (Reactive Yellow 17, RY 17)

กล่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

กล่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4 โดยกล่องปฏิกรณ์มีส่วนประกอบดังนี้

- 1) กล่องไม้ขนาด 40 x 40 x 60 เซนติเมตร
- 2) หลอดยูวี ชนิด High-pressure mercury-vapour ให้แสงความยาวคลื่นระหว่าง 300-500 นาโนเมตร โดยมีความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร รุ่น HPR 125 W HG ของบริษัท Philips
- 3) พัดลมระบายความร้อน โดยพัดลมจะดูดอากาศเข้าและออกจากกล่องปฏิกรณ์ เพื่อให้ทำให้อุณหภูมิในกล่องปฏิกรณ์คงที่
- 4) ระบบหล่อเย็น โดยผ่านน้ำเข้าและออก เพื่อลดความร้อนจากสารละลายในขณะฉายแสง
- 5) กล่องควอตซ์ขนาด 3 x 8 x 4 เซนติเมตร สำหรับบรรจุสารละลายสีย้อม และไทเทเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม
- 6) ระบบเติมอากาศ โดยผ่านอากาศลงในสารละลายสีย้อม เพื่อเติมออกซิเจนให้กับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม และทำให้โมเลกุลสีย้อมสัมผัสกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างทั่วถึง



(ข)



ภาพที่ 4 กล้องปฏิกรณ์ (ก) ภาพวาดภาคตัดขวาง (ข) ภาพถ่ายใน

วิธีการ

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธี โซล-เจล

1.1 เตรียมโซล-เจล จำนวน 19 สภาวะ โดยให้ความเข้มข้นของเอทานอล กรดอะซิติก Titanium (IV) tetraisopropoxide (TTIP) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นคงที่ และเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35

จำนวนโมลของสารที่ใช้เตรียมโซล-เจลทั้งหมดแสดงในตารางที่ 1 ถึง 3 มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1.1.1 ละลายสารลดแรงตึงผิวด้วยเอทานอลในขวดรูปกรวยมีฝาปิด พร้อมทั้งคนไปด้วยเป็นเวลา 3 นาที แล้วเติมกรดอะซิติก

1.1.2 ค่อยๆเติม TTIP ทีละหยด พร้อมทั้งคนอย่างแรง แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น คนสารละลายผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

1.2 สร้างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ บนตัวรองรับแผ่นแก้วโบโรซิลิเกตจำนวน 19 สภาวะ สภาวะละ 3 แผ่น

1.2.1 ทำความสะอาดแผ่นแก้วโบโรซิลิเกตขนาด 8x3x0.2 เซนติเมตร โดยการ sonicate ในน้ำกลั่น, อะซิโตน, เอทานอล และ ไอโซโพรพานอล ตามลำดับ ซึ่งใช้เวลา 15 นาที ต่อ ชนิดของตัวทำละลาย แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นในโถดูดความชื้น พร้อมสำหรับนำไป dip-coating

1.2.2 นำแผ่นแก้วโบโรซิลิเกตที่ทำความสะอาดแล้วจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 โดยใช้อัตราเร็วในการจุ่มประมาณ 12.8 ซม./นาที หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง

1.2.3 นำฟิล์มบางจากข้อ 1.2.2 ไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 3°C/นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 1 ชั้น

1.2.4 นำฟิล์มบางจากข้อ 1.2.3 ไป dip-coating และ เผา ตามข้อ 1.2.2 และ 1.2.3 ตามลำดับ จนได้แผ่นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 1, 3, 5, 7, 9 ชั้น

ตารางที่ 1 อัตราส่วนโมลที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในปริมาณต่างๆ

รหัส Sol-gel	จำนวนโมล (mol)				
	TTIP	TritonX-100	Ethanol	Acitic acid	Conc.HCl
Without surfactant	1.00	0.00	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (1/4)	1.00	0.25	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (1/2)	1.00	0.50	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (1/1)	1.00	1.00	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (2/1)	1.00	2.00	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (3/1)	1.00	3.00	45.00	6.00	0.05
TritonX-100 / TTIP (4/1)	1.00	4.00	45.00	6.00	0.05

ตารางที่ 2 อัตราส่วนโมลที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยเติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในปริมาณต่างๆ

รหัส Sol-gel	จำนวนโมล (mol)				
	TTIP	Tween 80	Ethanol	Acitic acid	Conc.HCl
Tween 80 / TTIP (1/4)	1.00	0.25	45.00	6.00	0.05
Tween 80 / TTIP (1/2)	1.00	0.50	45.00	6.00	0.05
Tween 80 / TTIP (1/1)	1.00	1.00	45.00	6.00	0.05
Tween 80 / TTIP (2/1)	1.00	2.00	45.00	6.00	0.05
Tween 80 / TTIP (3/1)	1.00	3.00	45.00	6.00	0.05
Tween 80 / TTIP (4/1)	1.00	4.00	45.00	6.00	0.05

ตารางที่ 3 อัตราส่วนโมลที่ใช้ในการเตรียมโซล-เจล โดยเติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในปริมาณต่างๆ

รหัส Sol-gel	จำนวนโมล (mol)				
	TTIP	Brij 35	Ethanol	Acetic acid	Conc.HCl
Brij 35 / TTIP (1/4)	1.00	0.25	45.00	6.00	0.05
Brij 35 / TTIP (1/2)	1.00	0.50	45.00	6.00	0.05
Brij 35 / TTIP (1/1)	1.00	1.00	45.00	6.00	0.05
Brij 35 / TTIP (2/1)	1.00	2.00	45.00	6.00	0.05
Brij 35 / TTIP (3/1)	1.00	3.00	45.00	6.00	0.05
Brij 35 / TTIP (4/1)	1.00	4.00	45.00	6.00	0.05

2. การเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ทำการเตรียมผงไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 19 สภาวะ โดยการนำสารละลายโซล-เจล ที่เตรียมขึ้นจากข้อ 1.1 สภาวะละ 20 ml ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 ml ที่งัดให้แห้ง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 3°C/นาที แล้วปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ผงของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

3. การตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มบาง และผงไทเทเนียมไดออกไซด์

3.1 หาโครงสร้าง และขนาดผลึกของฟิล์มบาง และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3.2 ตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาคของแผ่นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงอะตอม (AFM)

3.3 หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน โดยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller surface area (BET surface area)

3.4 วัดการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

3.5 ตรวจสอบความหนา และลักษณะพื้นผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. การทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟเยลโล 17 (RY 17)

4.1 เตรียมสารละลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ความเข้มข้นต่างๆ

4.1.1 เตรียมสารละลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำสีรีแอคทีฟเยลโล 0.100 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ในขวดเชิงปริมาตร

4.1.2 เจือจางสารละลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ให้ได้ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลายความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 การทดสอบความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17

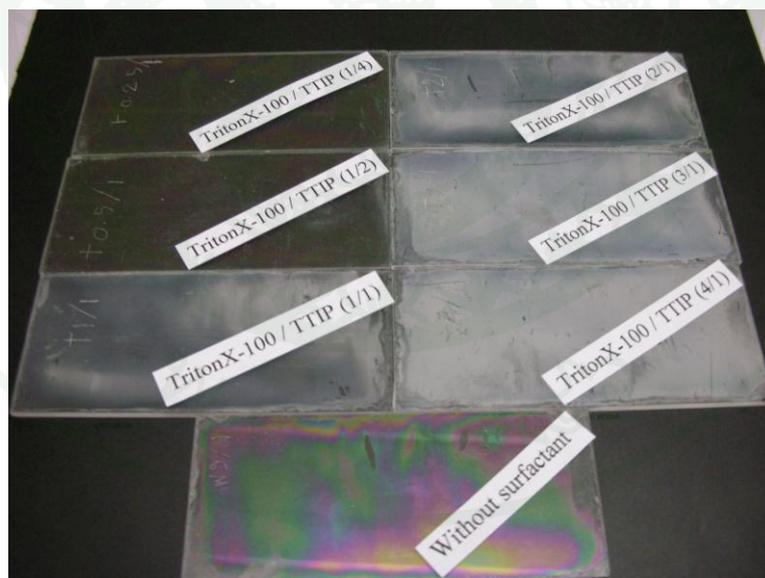
4.2.1 บรรจุสารละลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ลงในกล่องควอตซ์ขนาด 3 x 8 x 4 เซนติเมตร

4.2.3 แซ้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในกล่องควอตซ์ที่มีสารละลายสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ในข้อ 4.2.1 แล้ววางกล่องควอตซ์ลงในระบบหล่อเย็นภายในกล่องปฏิกรณ์ จากนั้นผ่านอากาศลงในสารละลายสี และทำการฉายแสงจาก mercury UV lamp (125 watt) ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีรีแอคทีฟเยลโล 17 ที่เวลาต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างสีครั้งละ 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร โดยเครื่อง UV-vis spectrophotomete

ผลและวิจารณ์

1. ผลการสังเกตฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยตาเปล่า

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นแก้วโบโรซิลิเกต (borisilicate glass) เป็นตัวรองรับฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะแก้วโบโรซิลิเกตสามารถทนความร้อนสูง มีพื้นผิวแบนเรียบ และยอมให้แสงวิสิเบิลและยูวีใกล้ผ่านได้ซึ่งยืนยันได้จากผลของค่าการส่งผ่านแสง (% transmittance) พบว่าฟิล์มจากโซล-เจลที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (without surfactant) มีลักษณะเป็นสีรุ้ง เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการหลุดร่วนของเนื้อฟิล์ม ฟิล์มจากโซล-เจลที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในปริมาณต่ำๆ มีลักษณะใส เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อปริมาณ TritonX-100 สูงขึ้นความขุ่นของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น และเกิดการหลุดร่วนของเนื้อฟิล์ม (ภาพที่ 5) ฟิล์มจากโซล-เจลที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อฟิล์มเป็นสีรุ้งและชัดเจนขึ้นเมื่อปริมาณ Tween 80 สูงขึ้น และไม่มีการหลุดร่วนของเนื้อฟิล์ม (ภาพที่ 6) ส่วนฟิล์มจากโซล-เจลที่เติม Brij 35 ทั้งหมดเกิดการหลุดร่วนของเนื้อฟิล์ม (ภาพที่ 7) สำหรับตารางที่ 4 เป็นการสรุปลักษณะของฟิล์มบางที่สังเกตได้



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับ โบโรซิลิเกตที่เตรียมโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับ โปโรซิลิกา ที่เตรียมโดยเติม Tween 80 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับ โปโรซิลิกา ที่เตรียมโดยเติม Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ

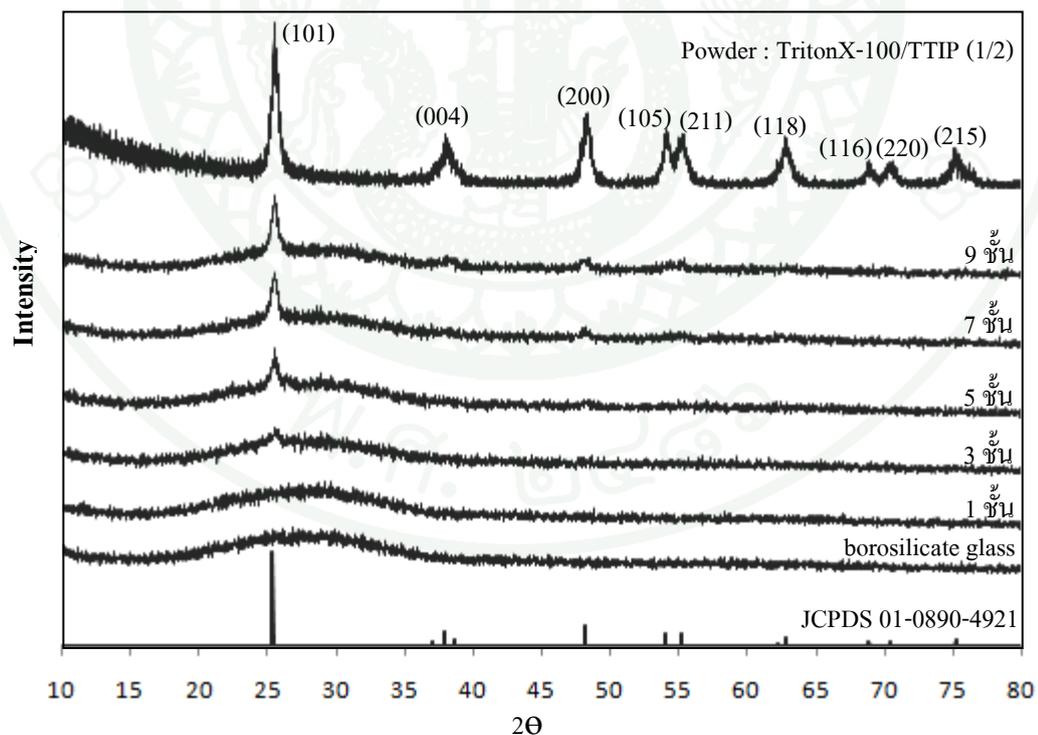
ตารางที่ 4 ลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์	สีของฟิล์ม	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	การยึดเกาะของ อนุภาค TiO ₂
Without surfactant	สีรุ้ง	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (1/4)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (1/2)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (1/1)	ใสและขาวขุ่น	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (2/1)	ใสและขาวขุ่น	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (3/1)	ขาวขุ่น	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
TritonX-100 / TTIP (4/1)	ขาวขุ่น	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (1/4)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (1/2)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (1/1)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (2/1)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (3/1)	สีรุ้ง	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Tween 80 / TTIP (4/1)	สีรุ้ง	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	ไม่หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (1/4)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (1/2)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (1/1)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (2/1)	ใส	เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (3/1)	ขาวขุ่น	เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน
Brij 35 / TTIP (4/1)	ขาวขุ่น	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	หลุดร่อน

2. ผลการวิเคราะห์ผงและฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

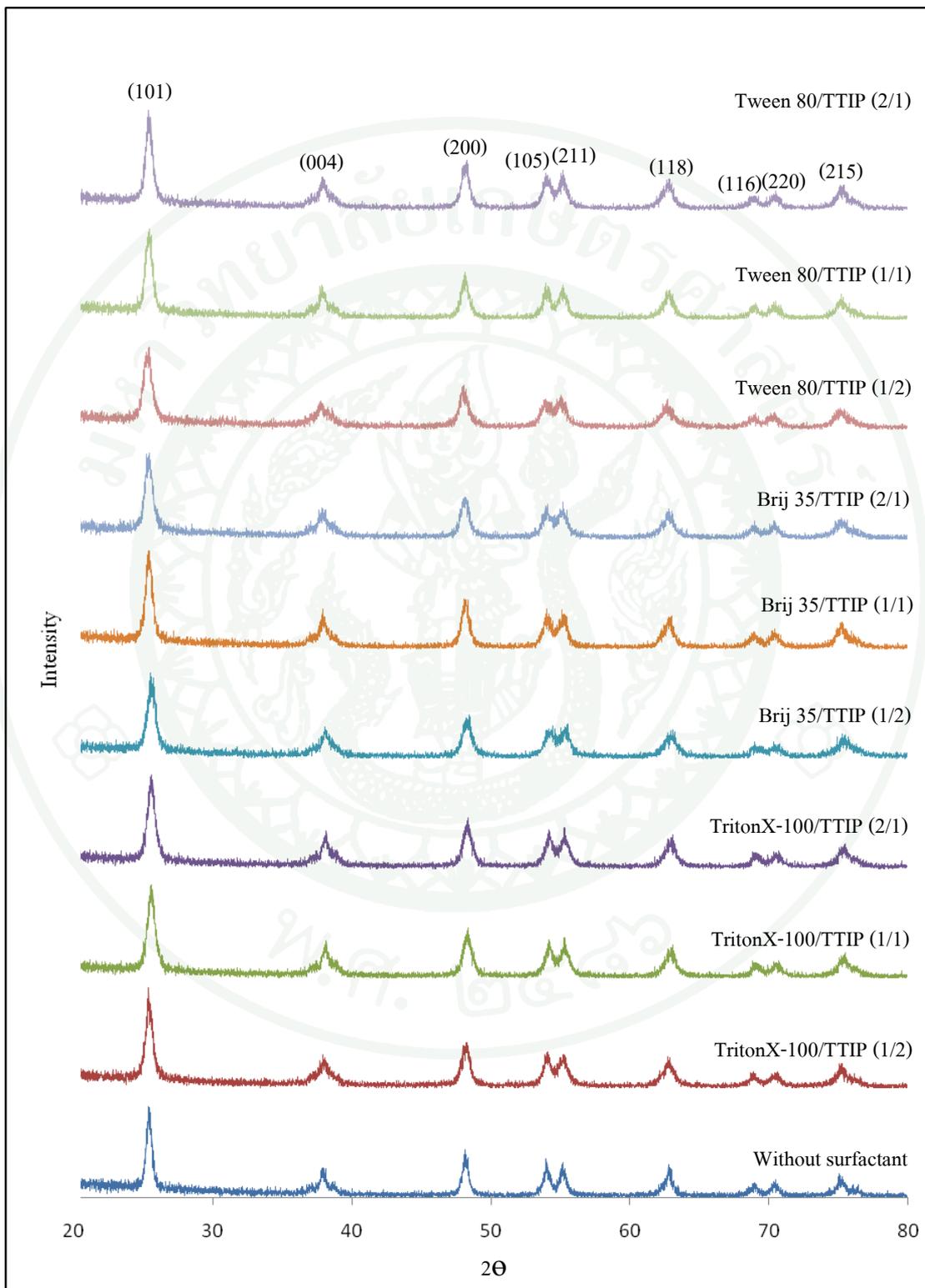
2.1 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผง และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

จากภาพที่ 8 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวรองรับโบโรซิลิเกต มีลักษณะเป็นออสันฐานซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi *et al.* (2006) ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ 1 ชั้น ไม่ปรากฏฟีกของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์น้อยมาก ส่วนฟิล์มที่เคลือบ 3 ถึง 9 ชั้น ปรากฏฟีกที่ 2θ เท่ากับ 25.4° เมื่อจำนวนครั้งในการเคลือบสูงขึ้นฟีกนี้将有ความเข้มสูงขึ้น และปรากฏฟีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 37.8° 48.1° ในฟิล์มที่เคลือบ 7 และ 9 ชั้น ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากสารละลายโซล-เจล ในสภาวะเดียวกันที่ใช้เตรียมฟิล์ม ให้สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ชัดเจน โดยปรากฏฟีกที่ตำแหน่งเดียวกันกับไทเทเนียมไดออกไซด์จากเพิ่มอ้างอิง เช่น ฟีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.4° 37.8° 48.1° และตำแหน่งอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าผง และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส



ภาพที่ 8 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตัวรองรับโบโรซิลิเกต ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2) หนา 1-9 ชั้น ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2) และ JCPDS ที่ 01-0890-4921

2.2 การคำนวณขนาดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 9 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 19 สภาวะ

จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 19 สภาวะ (ภาพที่ 9) ทำการคำนวณขนาดผลึกจากสมการของ Sherrer (Guo, 2005) โดยใช้ฟังก์ชันที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.4° ในการคำนวณดังนี้

$$D = \frac{K\beta}{\lambda \cos\theta}$$

เมื่อ

D	=	Crystallite size (nm)
β	=	the FWHM of the diffraction line (radians)
θ	=	the diffraction angle
K	=	a constant, which has been assumed to be 0.9
λ	=	the X-ray wavelength (0.154 nm for CuK α)

ตารางที่ 5 แสดงขนาดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จากการคำนวณโดยสมการ Sherrer พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว มีขนาดผลึก 63.60 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าขนาดผลึกของ TiO₂-Degussa (P25) ซึ่งมีขนาด 69.05 นาโนเมตร สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวมีขนาดผลึกเล็กลงมากเมื่อเทียบกับขนาดผลึกที่ได้จากการไม่เติมสารลดแรงตึงผิว แสดงให้เห็นว่า วิธีที่ใช้เตรียมในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมขนาดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของสารลดแรงตึงผิวต่อขนาดผลึก พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 และ Brij 35 มีขนาดผลึกไม่ต่างกันมากนัก คืออยู่ในช่วงประมาณ 13.06-14.64 และ 10.66-12.94 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 มีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่า คือประมาณ 46.93-58.23 นาโนเมตร

ตารางที่ 5 ขนาดผลึกไททาเนียมไดออกไซด์อนาเทสที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Sherrer

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	ขนาดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทส (nm)
TiO ₂ -Degussa (P-25)	69.05
Without surfactant	63.60
TritonX-100/TTIP (1/2)	58.23
TritonX-100/TTIP (1/1)	48.33
TritonX-100/TTIP (2/1)	46.93
Tween 80/TTIP (1/2)	13.06
Tween 80/TTIP (1/1)	14.64
Tween 80/TTIP (2/1)	14.64
Brij 35/TTIP (1/2)	12.94
Brij 35/TTIP (1/1)	12.50
Brij 35/TTIP (2/1)	10.66

3. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ จากเทคนิค BET surface area

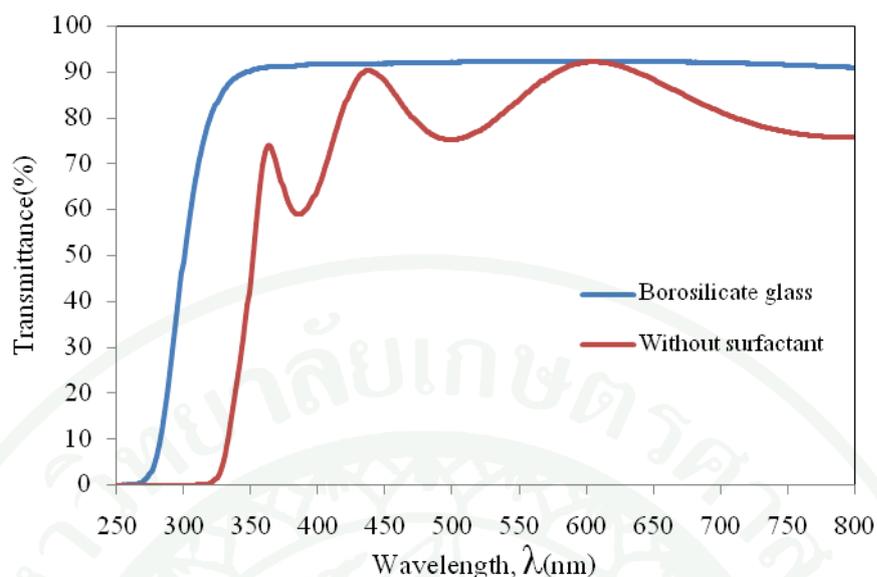
ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว รูพรุน และขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค BET surface area พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยเติมสารลดแรงตึงผิวมีพื้นที่ผิวสูงกว่า ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว การเกิดไมเซลล์ (micelle) ขณะเกิดโซล ทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัว และส่งผลให้ปริมาตรและขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมดที่ได้จากการเตรียมในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าผง TiO₂-Degussa (P-25)

ตารางที่ 6 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./ กรัม)	ขนาดรูพรุน (Å)
TiO ₂ -Degussa (P-25)	60.94	3.15	0.002
Without surfactant	14.59	0.02	47.47
TritonX-100/TTIP (1/2)	65.80	0.07	44.51
TritonX-100/TTIP (1/1)	68.70	0.09	52.22
TritonX-100/TTIP (2/1)	81.50	0.12	57.99
Tween 80/TTIP (1/2)	63.32	0.10	60.21
Tween 80/TTIP (1/1)	58.29	0.20	137.40
Tween 80/TTIP (2/1)	52.14	0.06	45.85
Brij 35/TTIP (1/2)	78.37	0.13	67.87
Brij 35/TTIP (1/1)	91.14	0.20	87.46
Brij 35/TTIP (2/1)	101.30	0.24	95.91

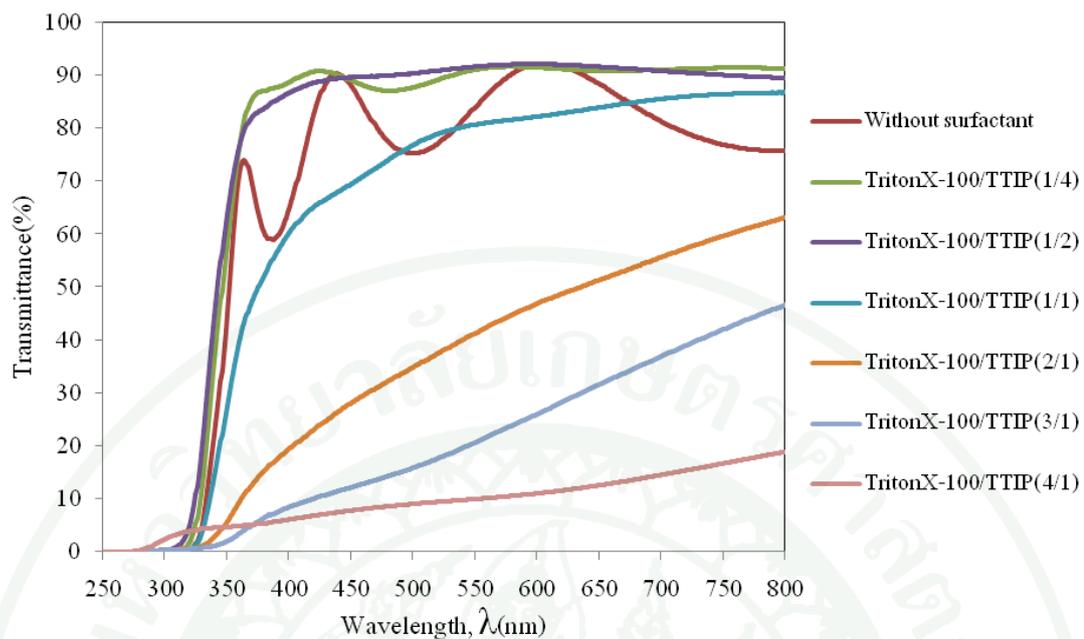
3. ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

สมบัติทางแสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จากสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 250-800 นาโนเมตร



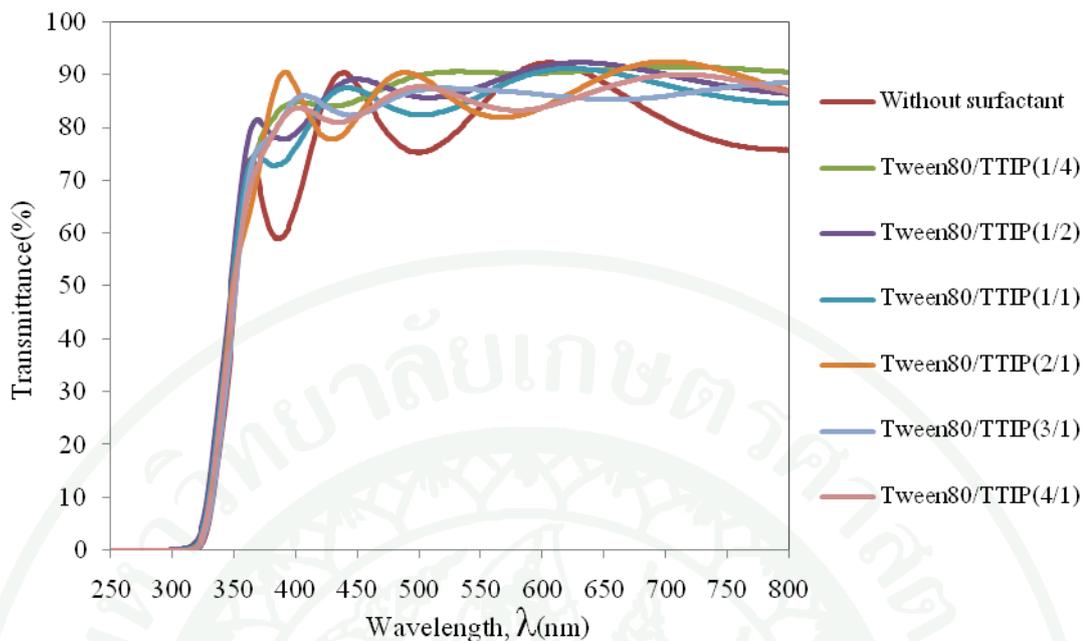
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวรองรับ โบโรซิลิเกต กับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยไม่เติมสารลดแรงตึงผิว

ภาพที่ 10 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของตัวรองรับโบโรซิลิเกต และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว พบว่าตัวรองรับโบโรซิลิเกตไม่ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 350 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่า โบโรซิลิเกตเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวรองรับเพราะไม่ดูดกลืนแสงในช่วงเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 นาโนเมตร) ส่วนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ดูดกลืนแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2002) ส่วนสเปกตรัมที่มีลักษณะเป็นคลื่นในช่วงความยาวคลื่น 450-800 นาโนเมตร เนื่องจากการรบกวนที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนของแสงจากพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และการสะท้อนจากอินเตอร์เฟซ (interface) ระหว่างตัวรองรับกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (Domaradzki, 2006)



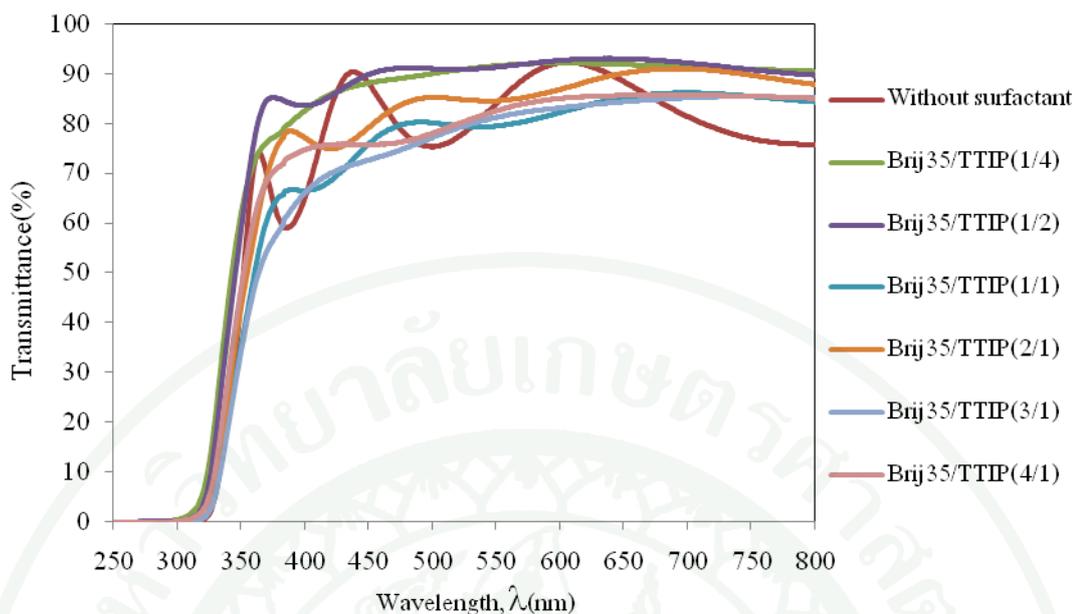
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราโมลส่วนต่างๆ

ภาพที่ 11 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว กับฟิล์มบาง TritonX-100/TTIP ในอัตราส่วน โมลต่างๆ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนของ TritonX-100/TTIP ต่ำๆ มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมากกว่าฟิล์มบางที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว โดยฟิล์มบาง TritonX-100/TTIP (1/4) และ TritonX-100/TTIP (1/2) มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เท่ากับ 83 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น TritonX-100 ต่ำๆ ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความใสและเป็นเนื้อเดียวกันสูง และไม่ดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล (400-800 นาโนเมตร) ส่วนฟิล์ม 1/1, 2/1, 3/1 และ 4/1 มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เท่ากับ 45, 11, 5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น TritonX-100 สูงขึ้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความใสและเป็นเนื้อเดียวกันลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฟิล์มที่สังเกตจากตาเปล่าในภาพที่ 5



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ

ภาพที่ 12 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว กับ ฟิล์มบาง Tween 80/TTIP ในอัตราส่วน โมลต่างๆ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในทุกอัตราส่วนของ Tween 80/TTIP มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล แสดงให้เห็นว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ในทุกอัตราส่วนของ Tween 80/TTIP มีความใสและเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ

ภาพที่ 13 เปรียบเทียบสเปกตรัมเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว กับฟิล์มบาง Brij 35/TTIP ในอัตราส่วน โมลต่างๆ พบว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนของ Brij 35/TTIP ต่ำๆ มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว โดยฟิล์ม 1/4 และ 1/2 มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เท่ากับ 76 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น Brij 35 ต่ำๆ ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความใสและเป็นเนื้อเดียวกันสูง และไม่ดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล (400-800 นาโนเมตร) ส่วนฟิล์ม 1/1, 2/1, 3/1 และ 4/1 มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เท่ากับ 57, 65, 56 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น Brij 35 สูงขึ้น ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความใสและเป็นเนื้อเดียวกันลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของฟิล์มที่สังเกตด้วยตาเปล่าดังภาพที่ 7

4. ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

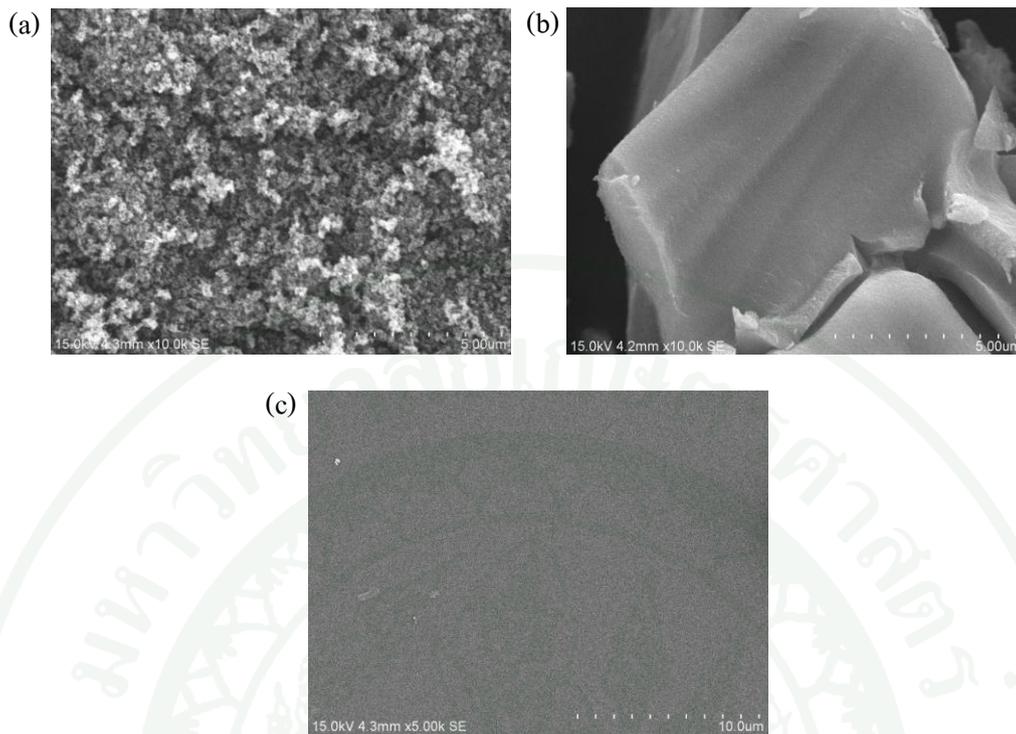
งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และ กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) มาใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้น

4.1 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะให้ข้อมูลเป็นภาพ 2 มิติ

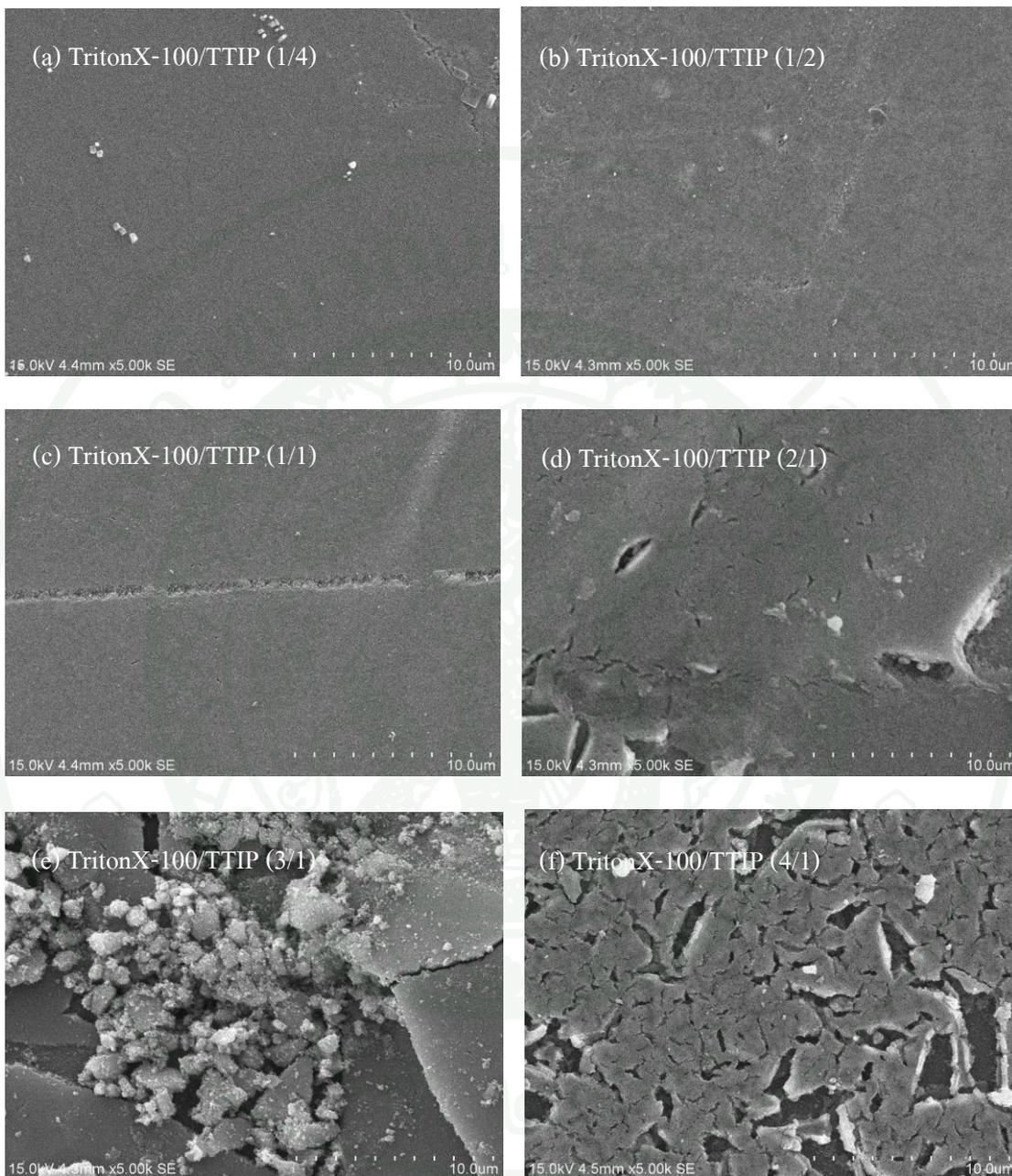
4.1.1 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของผง TiO_2 -Degussa (P-25) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และฟิล์มบางที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว

จากภาพที่ 14 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (ภาพที่ 14b) มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผง TiO_2 -Degussa (P-25) (ภาพที่ 14a) ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก BET surface area (ตารางที่ 6) โดยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าผง TiO_2 -Degussa (P-25) โดยมีค่าเท่ากับ 14.59 และ 60.94 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (ภาพที่ 14c) พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปกคลุมตัวรองรับ โปโรซิลิกา อย่างสมบูรณ์ เป็นเนื้อเดียวกัน และยึดเกาะบนตัวรองรับอย่างสม่ำเสมอ ผลนี้แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่ใช้ในการเตรียม โซล-เจล ในงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับใช้เตรียมเป็นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งยึดเกาะบนตัวรองรับ โปโรซิลิกา แต่ไม่เหมาะที่จะเตรียมเป็นผงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย



ภาพที่ 14 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa (P25) (a) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) และฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (c)

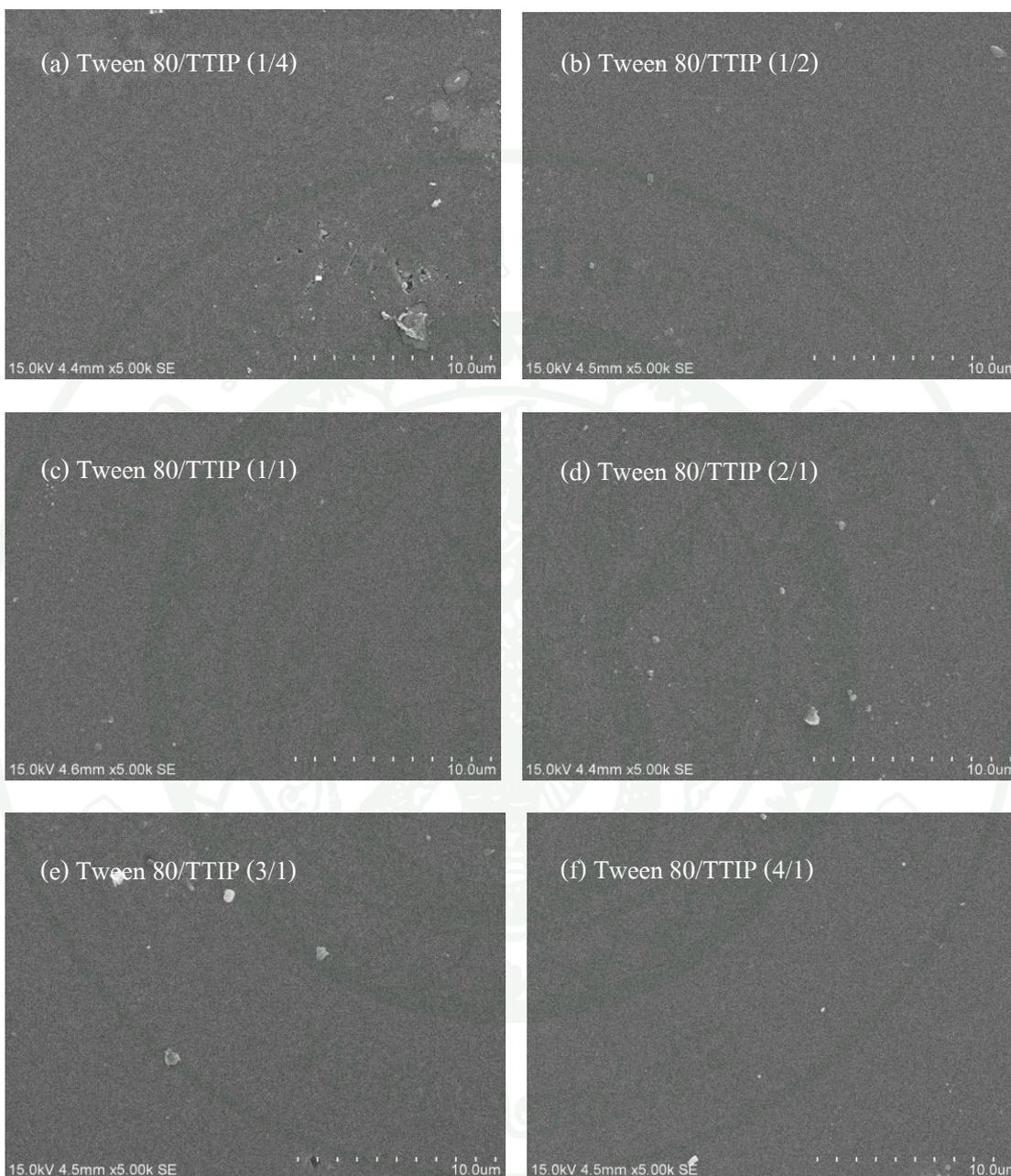
4.1.2 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100



ภาพที่ 15 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 15 พบว่าฟิล์มบาง TritonX-100/TTIP ที่อัตราส่วน 2/1, 3/1 และ 4/1 เนื้อฟิล์มแตก และไม่สามารถยึดเกาะกับตัวรองรับได้ ส่วนฟิล์มที่อัตราส่วน 1/4, 1/2 และ 1/1 เนื้อฟิล์มไม่แตก เป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถยึดเกาะกับตัวรองรับได้

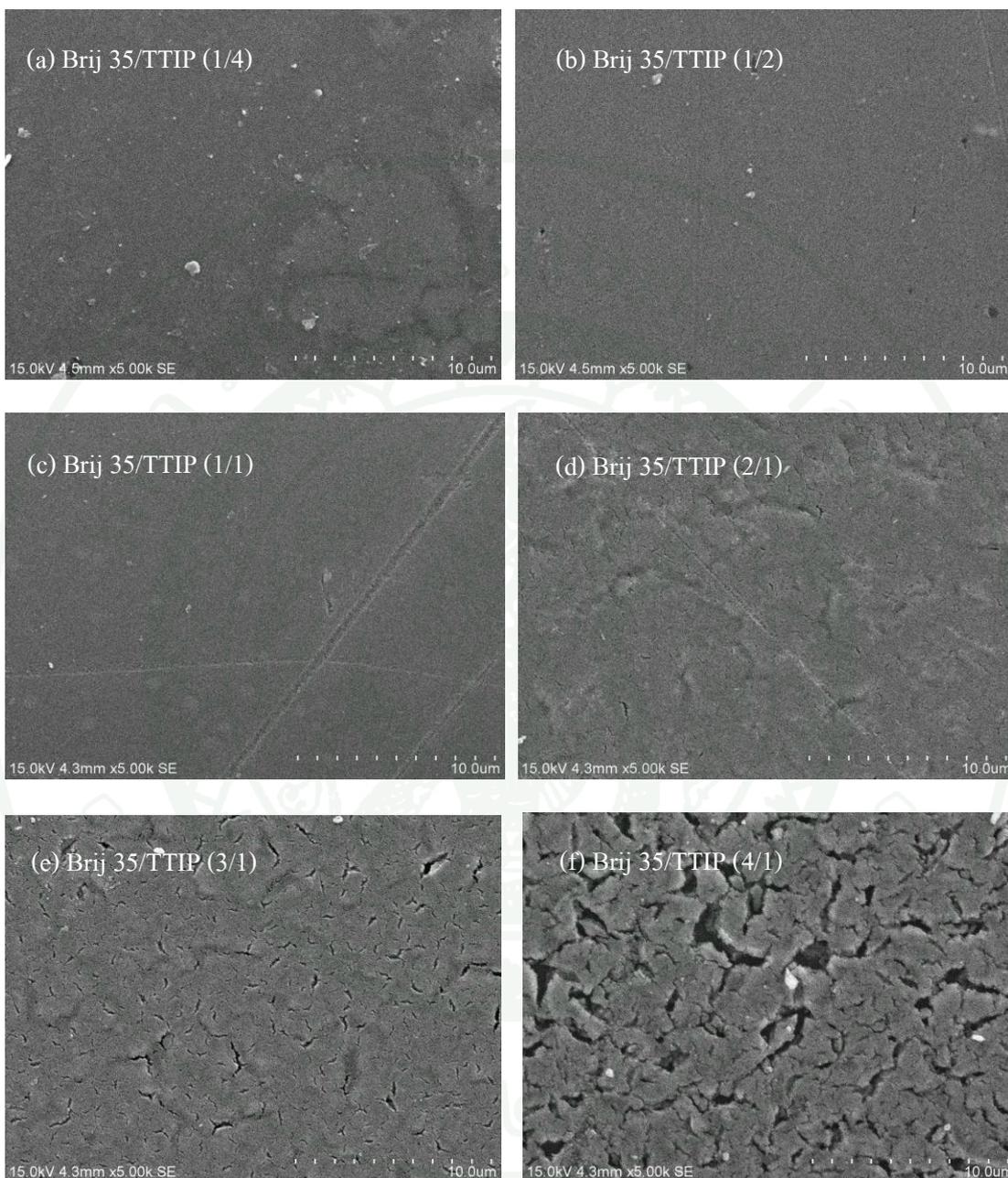
4.1.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80



ภาพที่ 16 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80-/TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าฟิล์มบาง Tween 80/TTIP ทุกอัตราส่วน ฟิล์มเป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อฟิล์มไม่แตก และสามารถยึดเกาะกับตัวรองรับได้

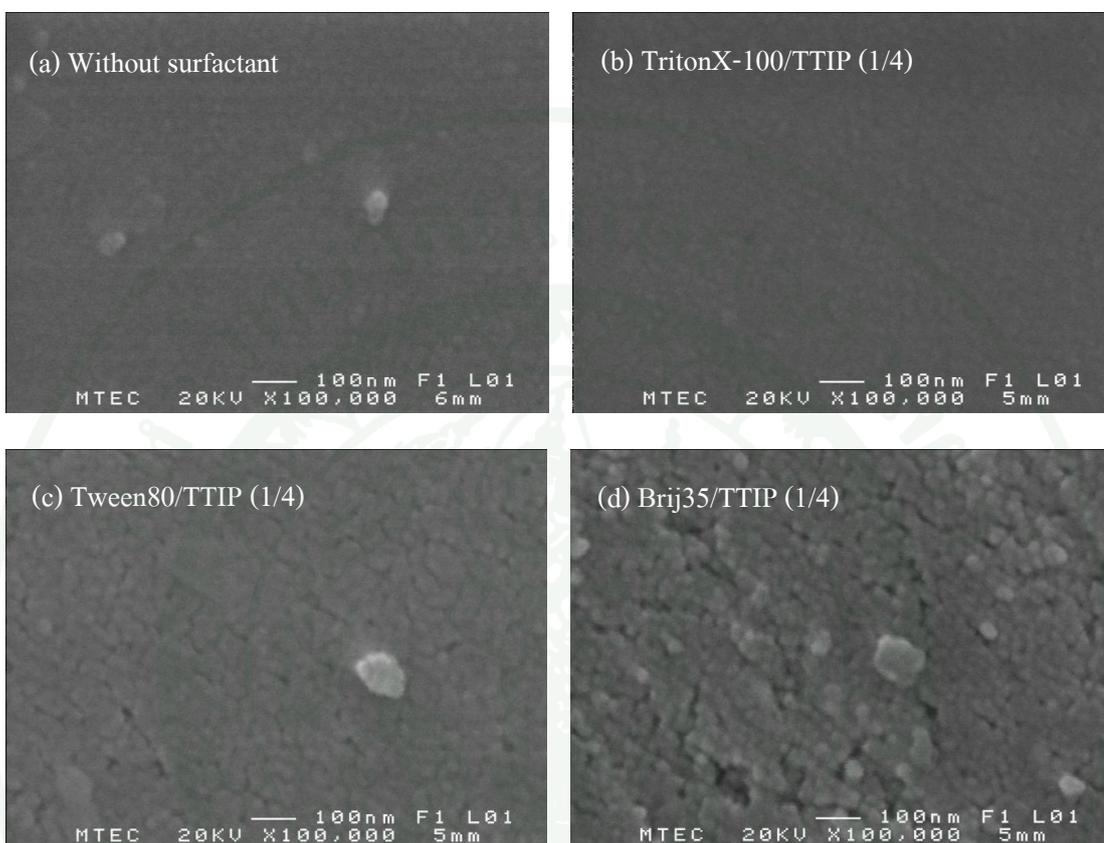
4.1.4 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35



ภาพที่ 17 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 17 พบว่าฟิล์มบาง Brij 35/TTIP ที่อัตราส่วน 2/1, 3/1 และ 4/1 เนื้อฟิล์มแตก และไม่สามารถยึดเกาะกับตัวรองรับได้ ส่วนฟิล์มที่อัตราส่วน 1/4, 1/2 และ 1/1 เนื้อฟิล์มไม่แตก เป็นเนื้อเดียวกัน

4.1.5 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว



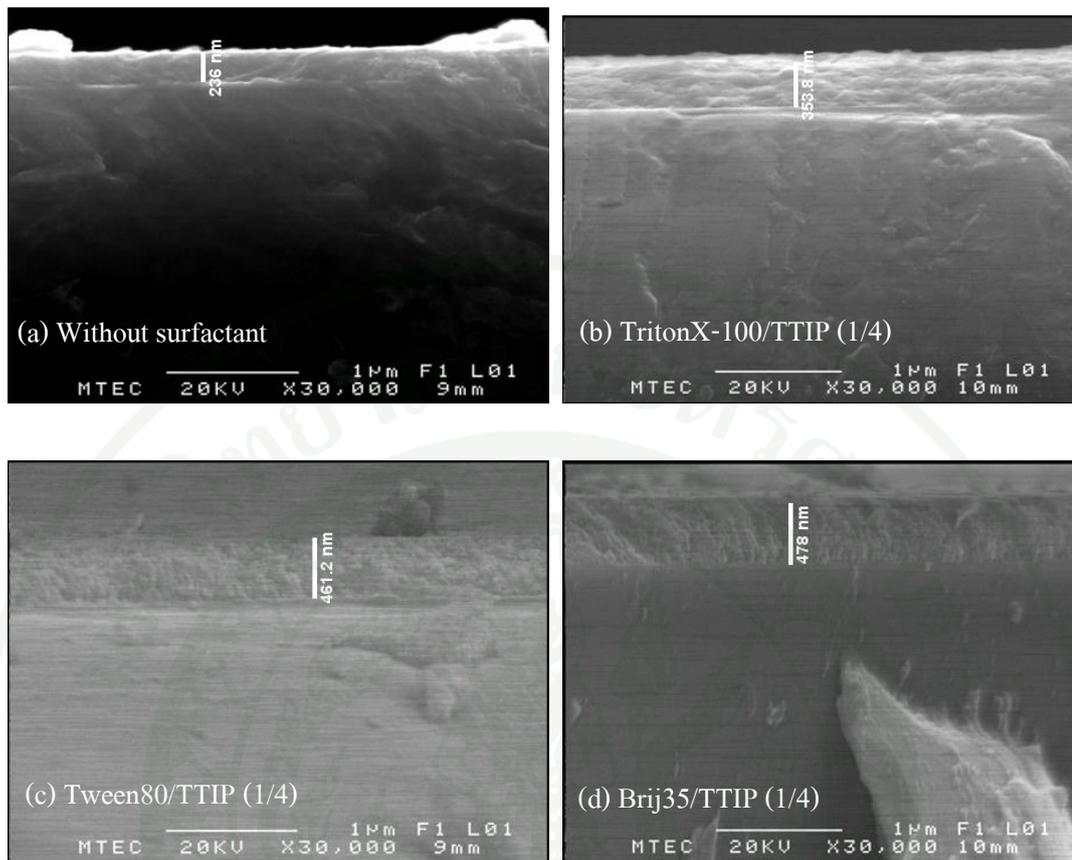
ภาพที่ 18 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (b) TritonX-100/TTIP (1/4) (c) Tween 80/TTIP (1/4) และ (d) Brij 35/TTIP (1/4) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

เมื่อวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายสูงขึ้น (100,000 เท่า) ทำให้สามารถเห็นลักษณะพื้นผิวในระดับนาโน ภาพที่ 18 แสดงภาพ SEM ของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิวในอัตราส่วน โมล Surfactant/TTIP เป็น 1 : 4 พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวมีลักษณะพื้นผิวเรียบ อนุภาคเกาะกันหนาแน่น และไม่มีรูพรุน ส่วนฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว พบว่าฟิล์ม TritonX-100/TTIP (1/4) มีลักษณะพื้นผิวไม่ต่างจากฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว ส่วนฟิล์ม Tween 80/TTIP (1/4) และ Brij 35/TTIP (1/4) มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมที่เกาะกันหลวมๆ และมีรูพรุนเกิดขึ้น โดยฟิล์ม Brij 35/TTIP (1/4) มีอนุภาคบางส่วนที่หลุดออกจากเนื้อฟิล์ม ซึ่งเป็นการยืนยันผลจากการสังเกตฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยตาเปล่า (ภาพที่ 7)

เมื่อพิจารณาจากมวลโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดโดย TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 625 1,310 และ 1,199 กรัมต่อโมล ตามลำดับ จะเห็นว่า TritonX-100 มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า Tween 80 และ Brij 35 ซึ่งมีมวลโมเลกุลพอๆกัน จากภาพที่ 18 พบว่าฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 มีความพรุนของเนื้อฟิล์มน้อยกว่า ฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 และ Brij 35 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo *et al.* (2005)

4.1.6 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว

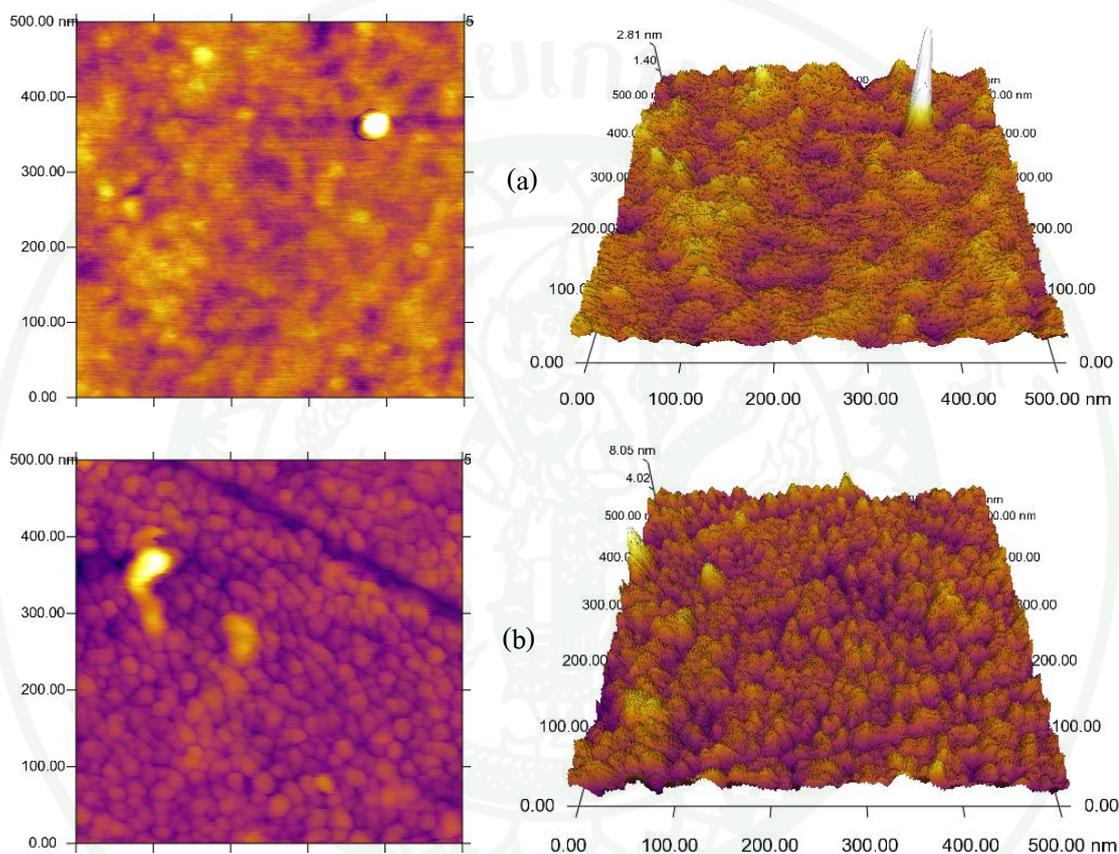
จากภาพที่ 19 แสดงภาพ SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิวในอัตราส่วน โมล Surfactant/TTIP เป็น 1 : 4 พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35 มีความหนาเท่ากับ 236 353 461 และ 478 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิวหนากว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว ประมาณ 2 เท่า เมื่อพิจารณาโครงสร้างของฟิล์ม พบว่าฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิวฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 และ Brij 35 มีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม อนุภาคไม่เกิดการรวมตัวกัน จึงมีความพรุนเกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม ฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 พบว่า อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน ทำให้ความพรุนในเนื้อฟิล์มต่ำกว่าฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 และ Brij 35 ส่วนฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว พบว่าอนุภาคเกิดการรวมตัวกันสูง และไม่มีรูพรุน จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวในกระบวนการ โซล-เจล สามารถยับยั้งการรวมตัวของอนุภาคได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2007)



ภาพที่ 19 ภาพ SEM แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (b) TritonX-100/TTIP 1/4 (c) Tween 80/TTIP 1/4 และ (d) Brij 35/TTIP 1/4 ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า

4.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM)

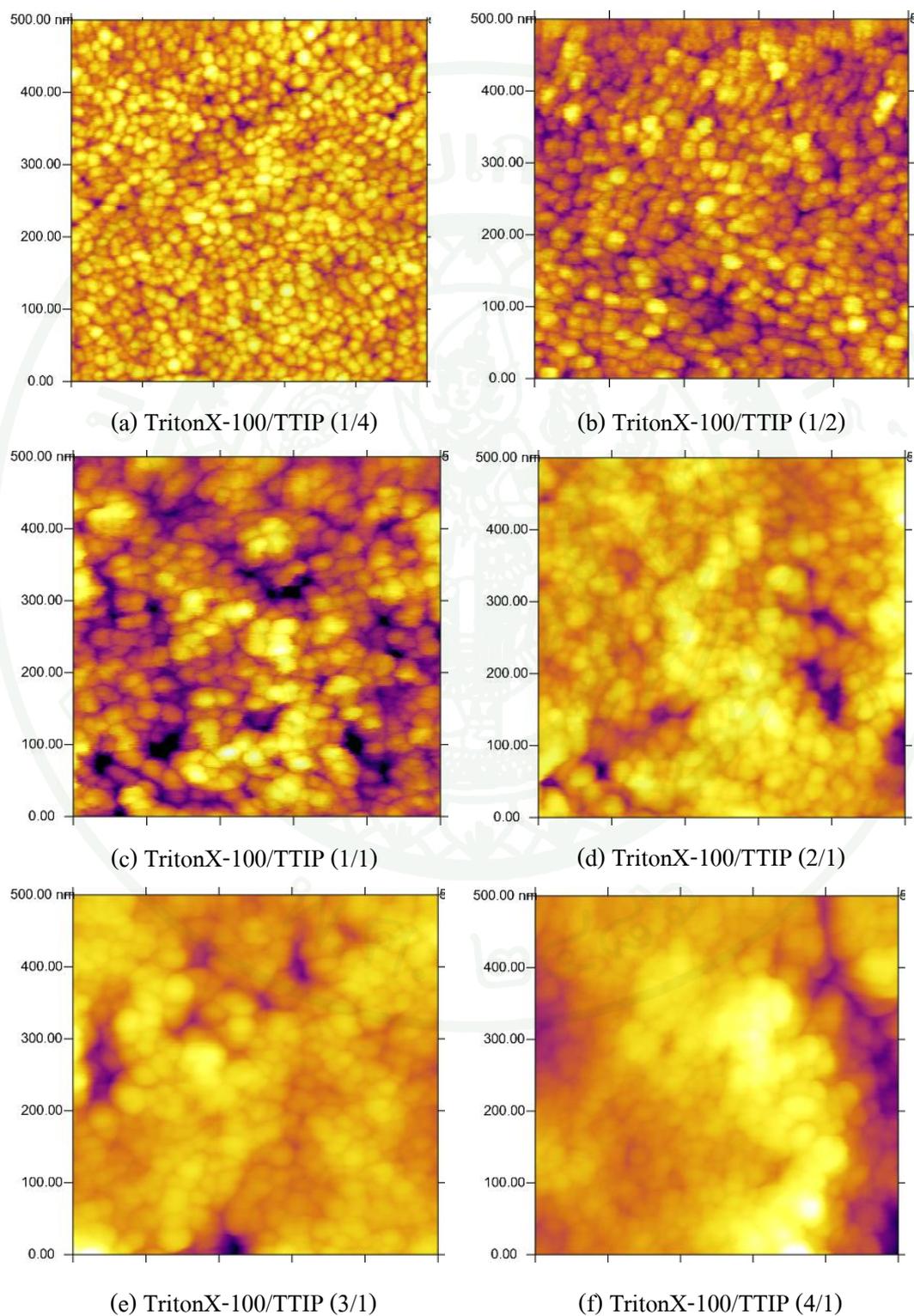
4.2.1 เปรียบเทียบภาพ AFM ของตัวรองรับ โบโรซิลิเกต และ फिल्मไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว



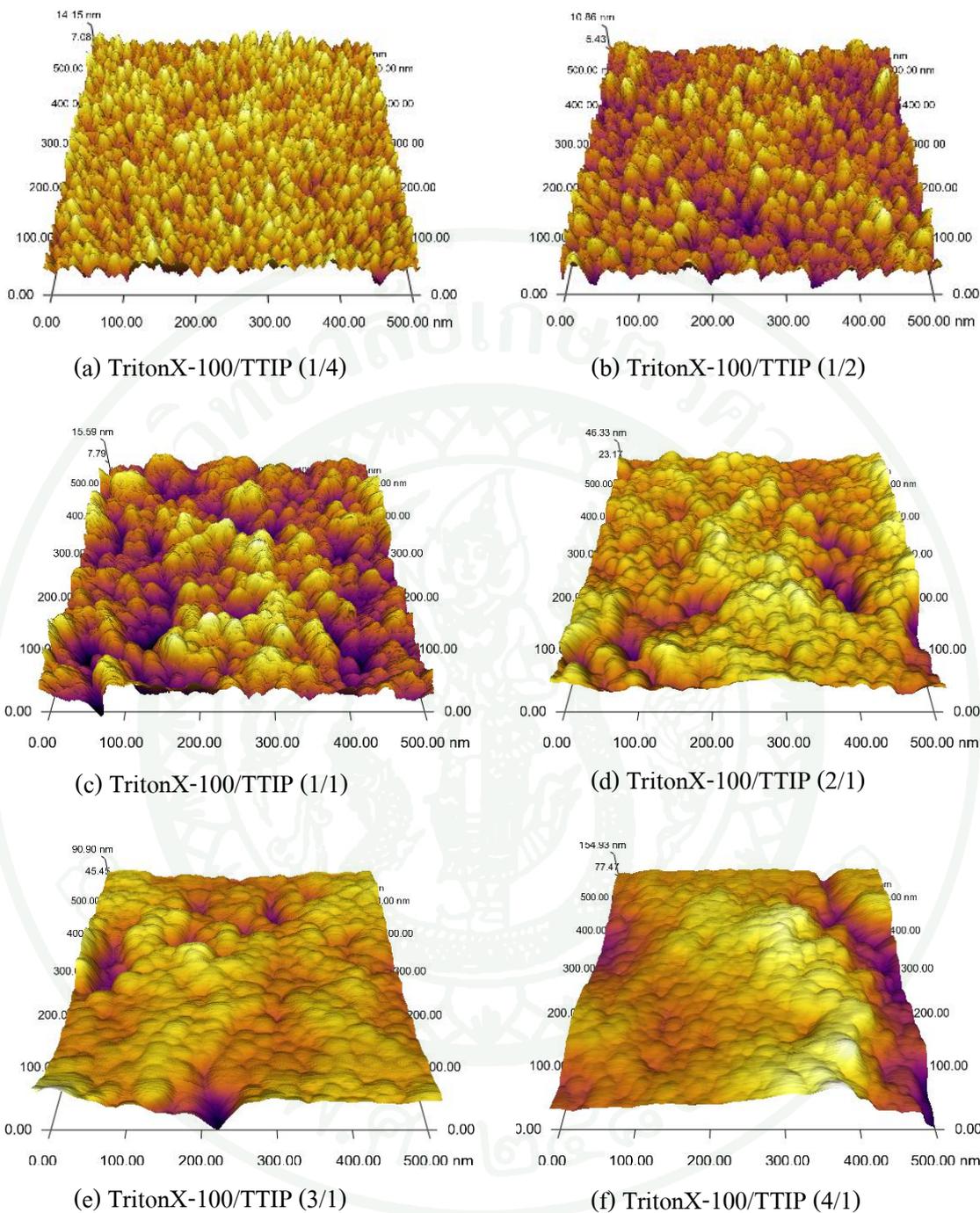
ภาพที่ 20 ภาพ AFM 2 และ 3 มิติ ของ (a) ตัวรองรับโบโรซิลิเกต (b) फिल्मไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว

จากภาพที่ 20 แสดงภาพ AFM แบบ 2 และ 3 มิติ ของตัวรองรับโบโรซิลิเกต (19a) และ फिल्मไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (19b) ซึ่งเคลือบอยู่บนตัวรองรับโบโรซิลิเกต พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว มีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเม็ดเล็กๆปกคลุมพื้นผิวของตัวรองรับ โดยลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็กมีประมาณ 26.08 นาโนเมตร (ตารางที่ 7) ค่าความขรุขระของฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าตัวรองรับโบโรซิลิเกต โดยฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และตัวรองรับโบโรซิลิเกต มีค่าความขรุขระ 1.270 และ 0.273 นาโนเมตร ตามลำดับ

4.2.2 เปรียบเทียบภาพ AFM ของตัวรองรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงดึงผิว TritonX-100



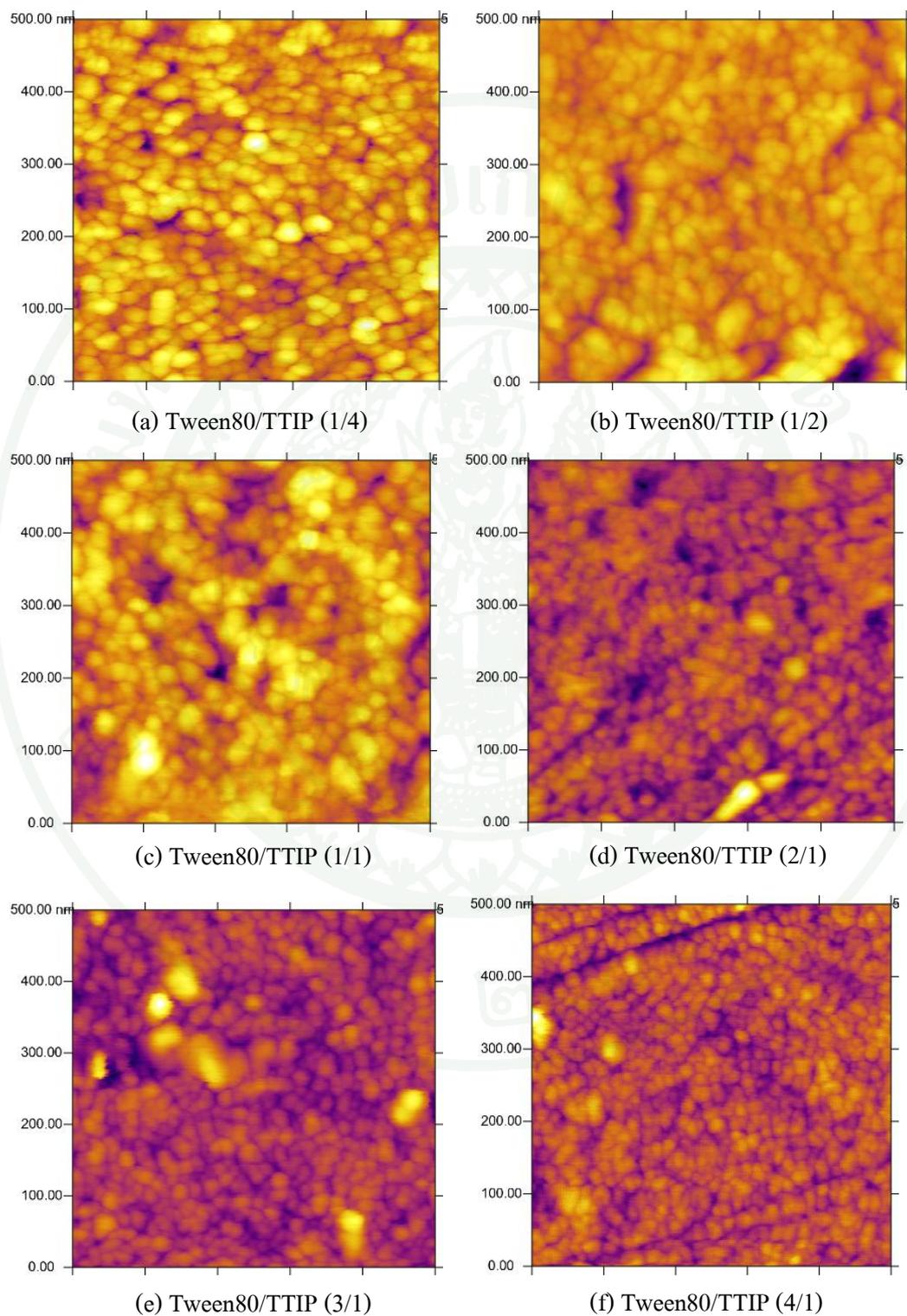
ภาพที่ 21 ภาพ AFM 2 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงดึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ



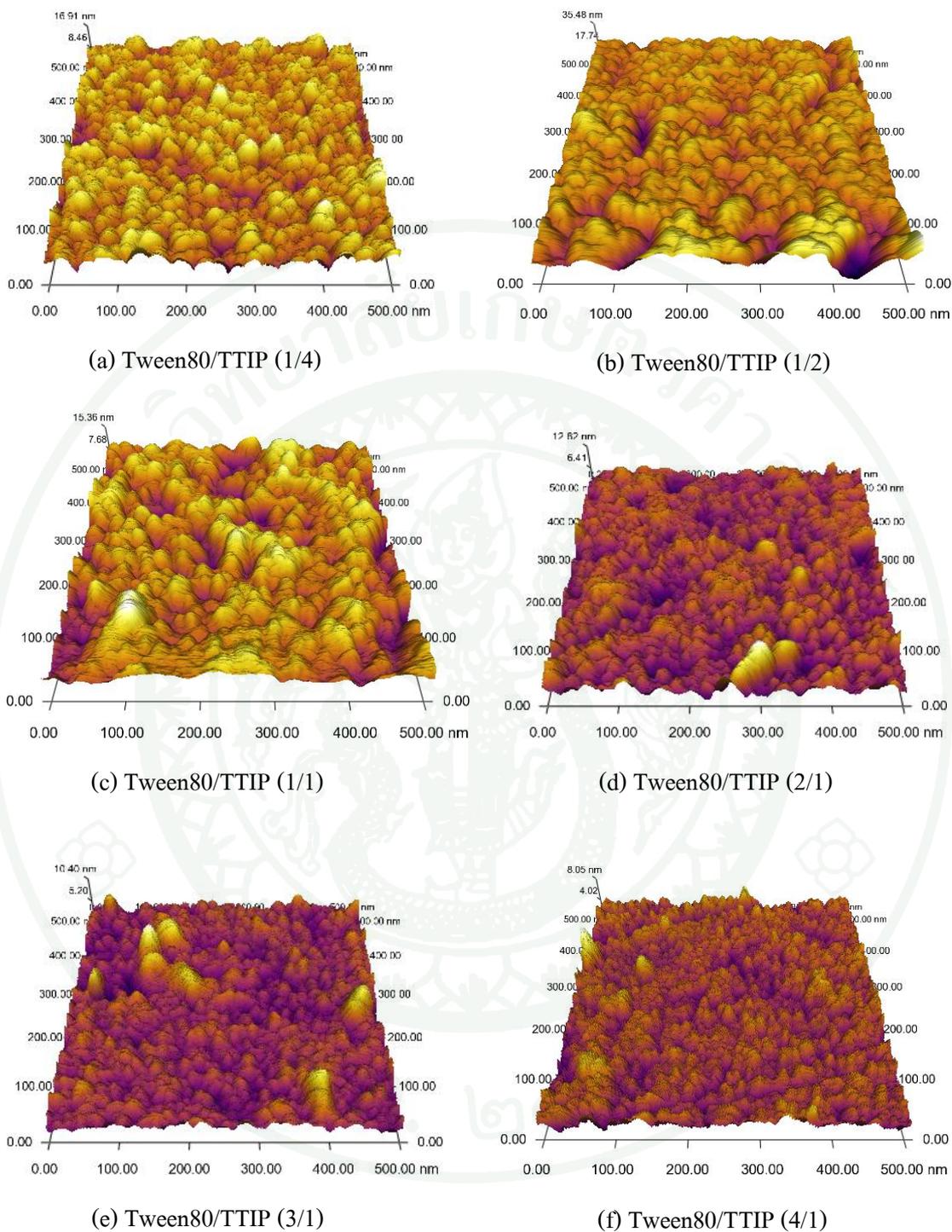
ภาพที่ 22 ภาพ AFM 3 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ

จากภาพที่ 21 และ 22 แสดงภาพ AFM แบบ 2 และ 3 มิติ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 พบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 21-30 นาโนเมตร การเกาะกันของอนุภาคหนาแน่นขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ TritonX-100 / TTIP สูงขึ้น ค่าความขรุขระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ TritonX-100 / TTIP เพิ่มขึ้น และมีพื้นที่ผิว $26 \times 10^4 - 33 \times 10^4$ ตารางนาโนเมตร

4.2.3 เปรียบเทียบภาพ AFM ของตัวรองรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว tween 80



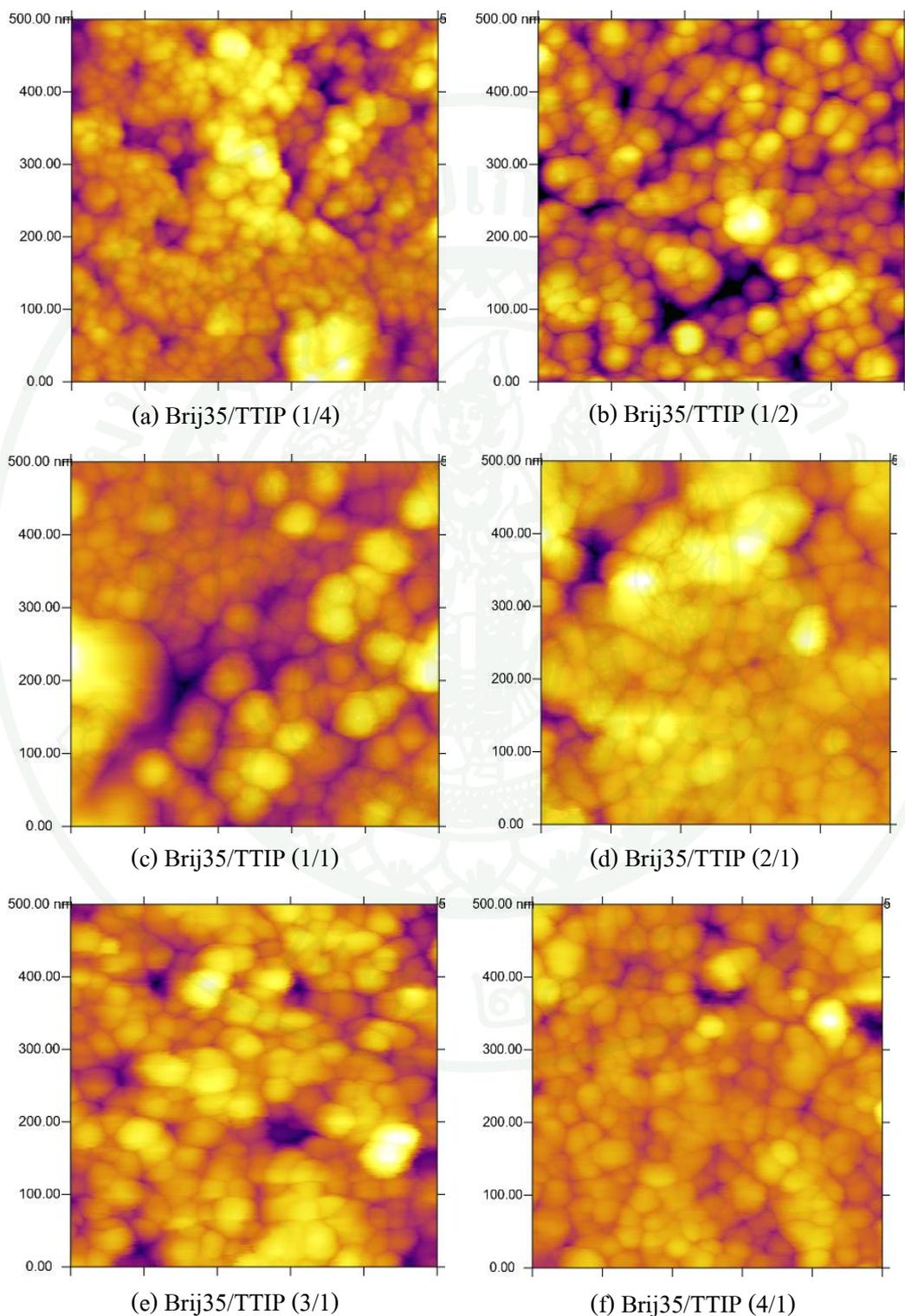
ภาพที่ 23 ภาพ AFM 2 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราโมลส่วนต่างๆ



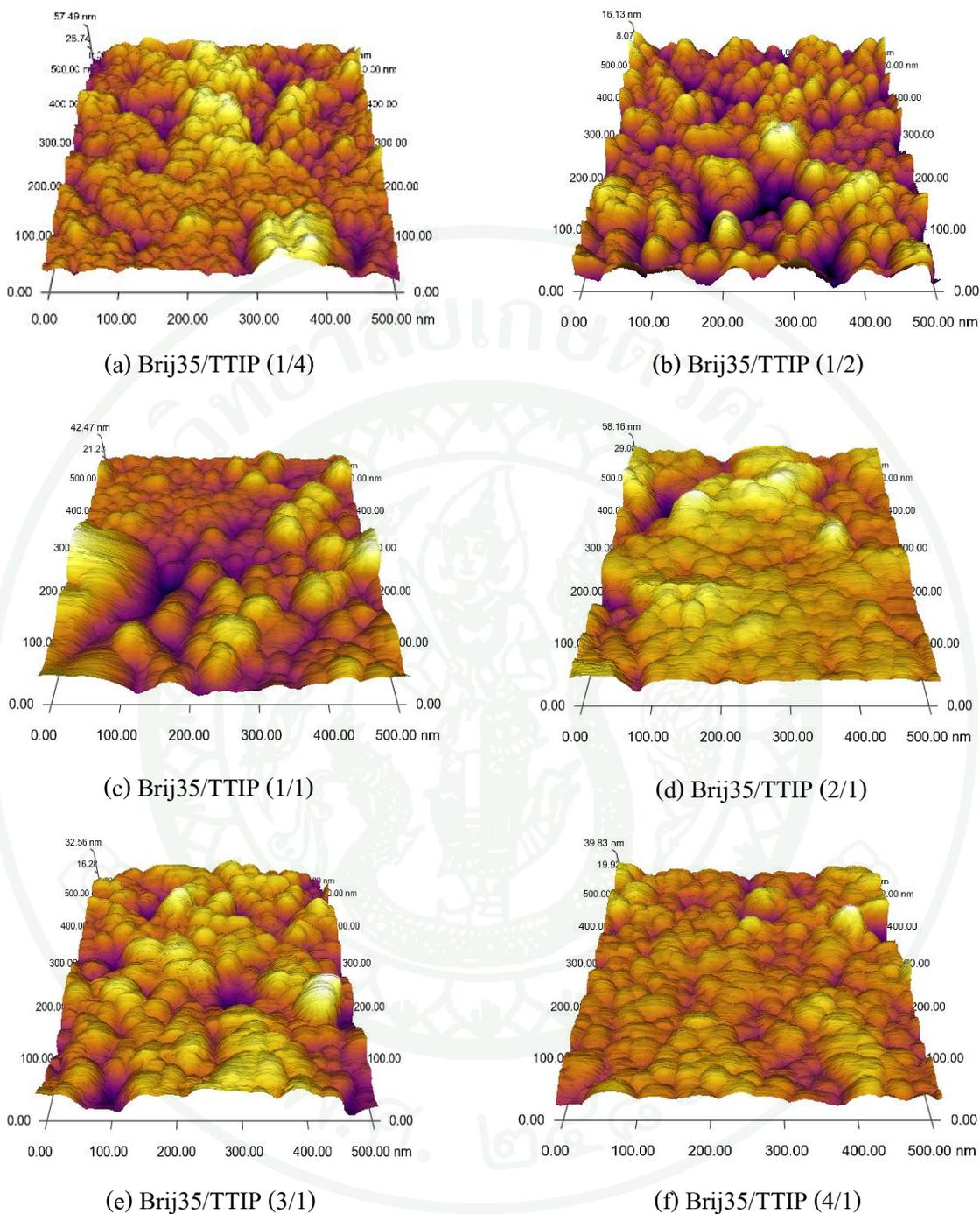
ภาพที่ 24 ภาพ AFM 3 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราโมลส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 23 และ 24 พบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 25-31 นาโนเมตร ค่าความขรุขระมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของ tween 80 / TTIP เพิ่มขึ้น และมีพื้นที่ผิว $25 \times 10^4 - 27 \times 10^4$ ตารางนาโนเมตร

4.2.4 เปรียบเทียบภาพ AFM ของตัวรองรับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว tween 80



ภาพที่ 25 ภาพ AFM 2 มิติ ของฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราโมลส่วนต่างๆ



ภาพที่ 26 ภาพ AFM 3 มิติ ของฟิล์มที่เตรียมด้วยสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราโมลส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 25 และ พบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 30-47 นาโนเมตร ค่าความขรุขระไม่เป็นแนวโน้มเหมือนฟิล์มบางที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 และ tween 80 และมีพื้นที่ผิว $25 \times 10^4 - 27 \times 10^4$ ตารางนาโนเมตร

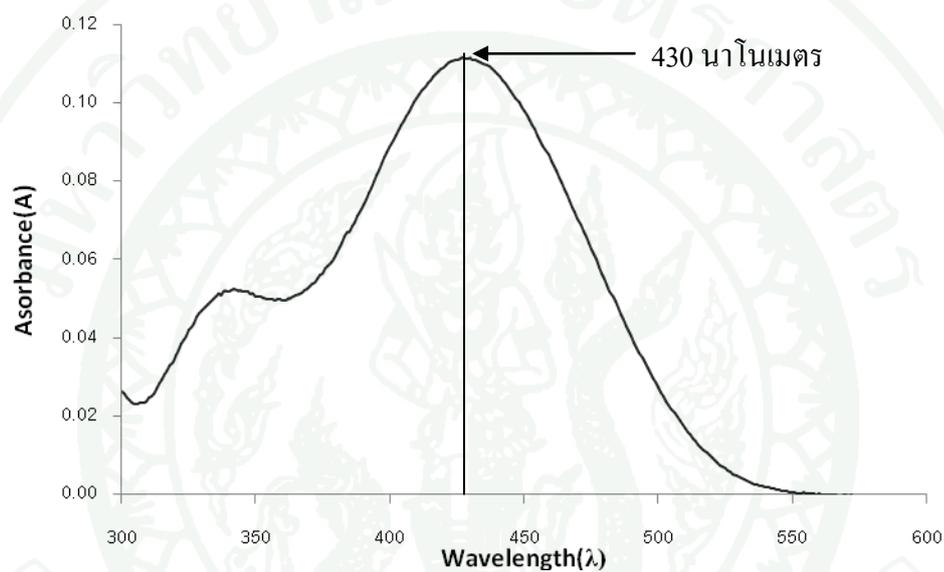
ตารางที่ 7 ค่าความขรุขระ (Roughness), พื้นที่ผิว (Surface area) และขนาดอนุภาค ของฟิล์มบาง
ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค AFM (Scan size = 500 x 500 nm)

ฟิล์มบาง ไทเทเนียมไดออกไซด์	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ความขรุขระ (nm)	พื้นที่ผิว ($\times 10^4 \text{ nm}^2$)
Borosilicate glass	-	0.273	25.10
Without surfactant	26.08	1.27	29.42
TritonX-100/TTIP (1/4)	21.00	1.52	28.06
TritonX-100/TTIP (1/2)	28.84	1.35	26.65
TritonX-100/TTIP (1/1)	29.42	2.72	27.53
TritonX-100/TTIP (2/1)	25.10	5.23	28.11
TritonX-100/TTIP (3/1)	28.76	8.04	29.64
TritonX-100/TTIP (4/1)	30.12	21.10	32.69
Tween 80/TTIP (1/4)	31.26	1.78	27.07
Tween 80/TTIP (1/2)	25.20	2.08	26.72
Tween 80/TTIP (1/1)	30.24	1.87	26.34
Tween 80/TTIP (2/1)	25.76	1.21	25.66
Tween 80/TTIP (3/1)	25.10	1.03	25.57
Tween 80/TTIP (4/1)	20.70	0.73	25.84
Brij 35/TTIP (1/4)	30.18	7.72	31.54
Brij 35/TTIP (1/2)	42.23	2.67	26.51
Brij 35/TTIP (1/1)	46.90	5.74	27.40
Brij 35/TTIP (2/1)	41.48	6.50	28.37
Brij 35/TTIP (3/1)	47.68	4.37	27.56
Brij 35/TTIP (4/1)	38.46	3.54	26.72

5. ผลการศึกษาการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1 ลักษณะการดูดกลืนแสงของสียรีแอกทีฟเฟลโล 17

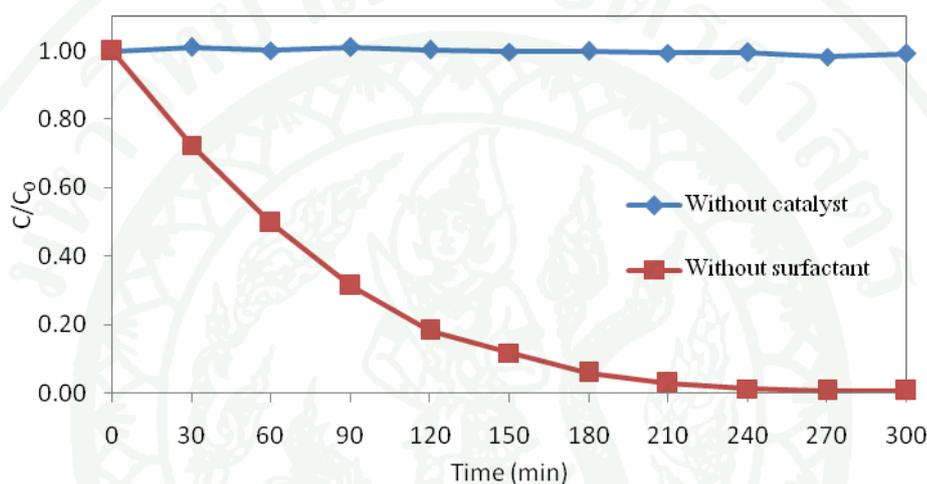
แถบการดูดกลืนแสงของสียรีแอกทีฟเฟลโล 17 แสดงดังภาพที่ 27 พบว่ามีการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงตามองเห็น ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร



ภาพที่ 27 แถบการดูดกลืนแสงของสียรีแอกทีฟเฟลโล 17 ความเข้มข้น 5 mg/l

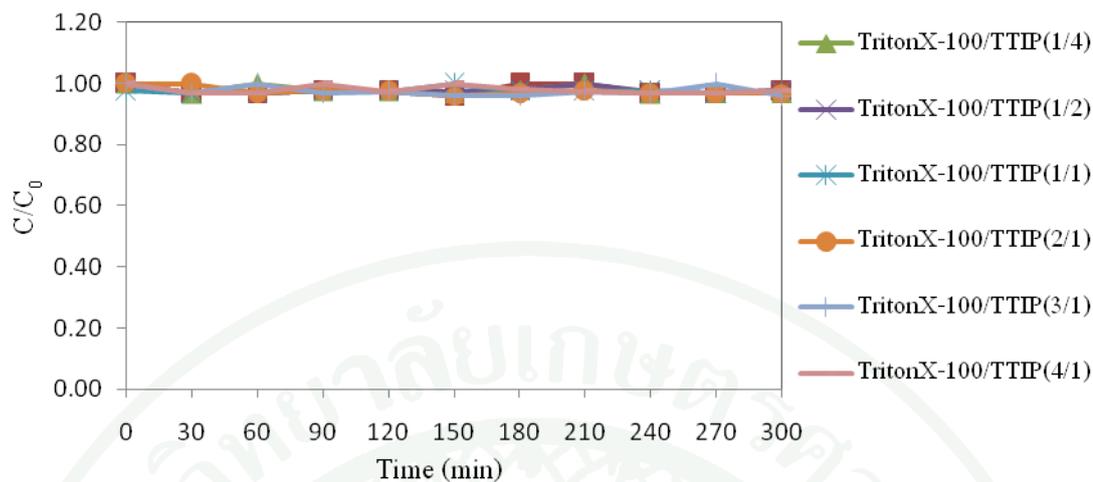
5.2 การศึกษาเปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ในส่วนนี้แสดงค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ณ เวลาต่างๆ จากปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยอัตราส่วนความเข้มข้นสี ณ เวลาใดๆ (C) ต่อความเข้มข้นสีเริ่มต้น (C_0)

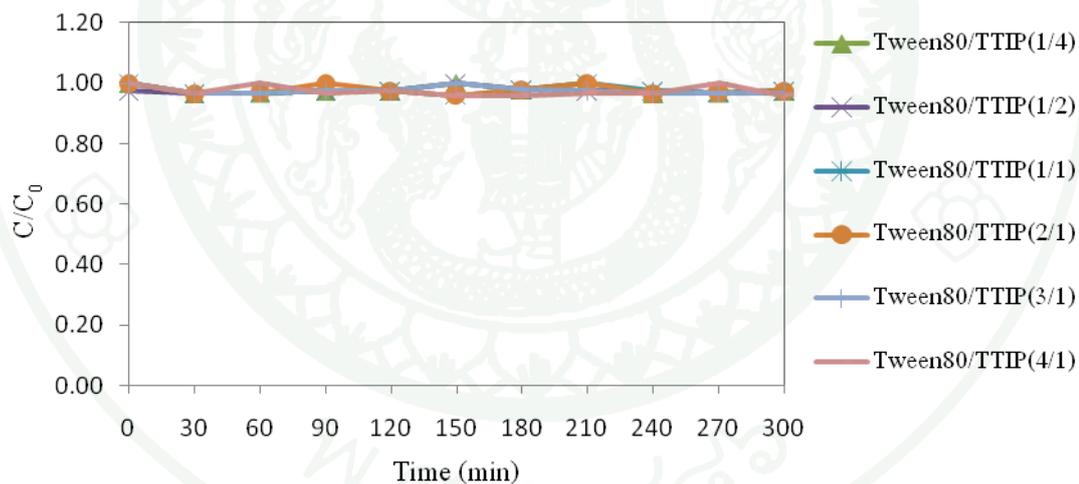


ภาพที่ 28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต เมื่อไม่มี และมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

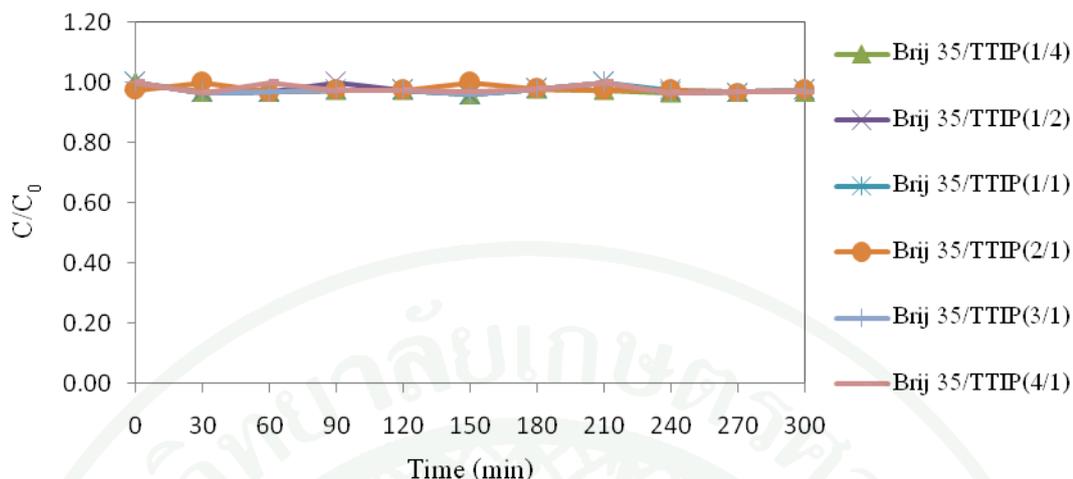
ภาพที่ 28 แสดงกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต เมื่อไม่มี และมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ขณะที่สภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เกิดการลดลงของความเข้มข้นสี แสดงให้เห็นว่า การย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น และนอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นว่า สีรีแอกทีฟเฟลโล 17 มีความเสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตอีกด้วย



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสรีรเอกทีฟเฮลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วน TritonX-100/TTIP ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 30 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสรีรเอกทีฟเฮลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วน Tween 80/TTIP ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 31 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเฮลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน Brij 35/TTIP ที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 29-31 แสดงกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเฮลโล 17 ในที่มีด โดยมีฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35 ตามลำดับ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเฮลโล 17 ลดลงน้อยมากเมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีความสามารถในการดูดซับสีข้อมน้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฮลโล 17 จึงถือว่าไม่มีผลจากการดูดซับโดยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

5.3 ประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้น โดยใช้ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เปอร์เซนต์การย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเฮลโล 17 คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Photocatalytic decomposition rate (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสรีแอกทีฟเฮลโล 17
 C = ความเข้มข้นที่เวลาใดๆของสรีแอกทีฟเฮลโล 17

การหาค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของสรีแอกทีฟเฮลโล 17 เมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 120 นาที โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง (ภาคผนวก ก) ซึ่งใช้วิธีเดียวกับงานวิจัยของ Rupa *et al.* (2007) ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายของสรีแอกทีฟเฮลโล 17 เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 (first order reaction) ดังสมการต่อไปนี้

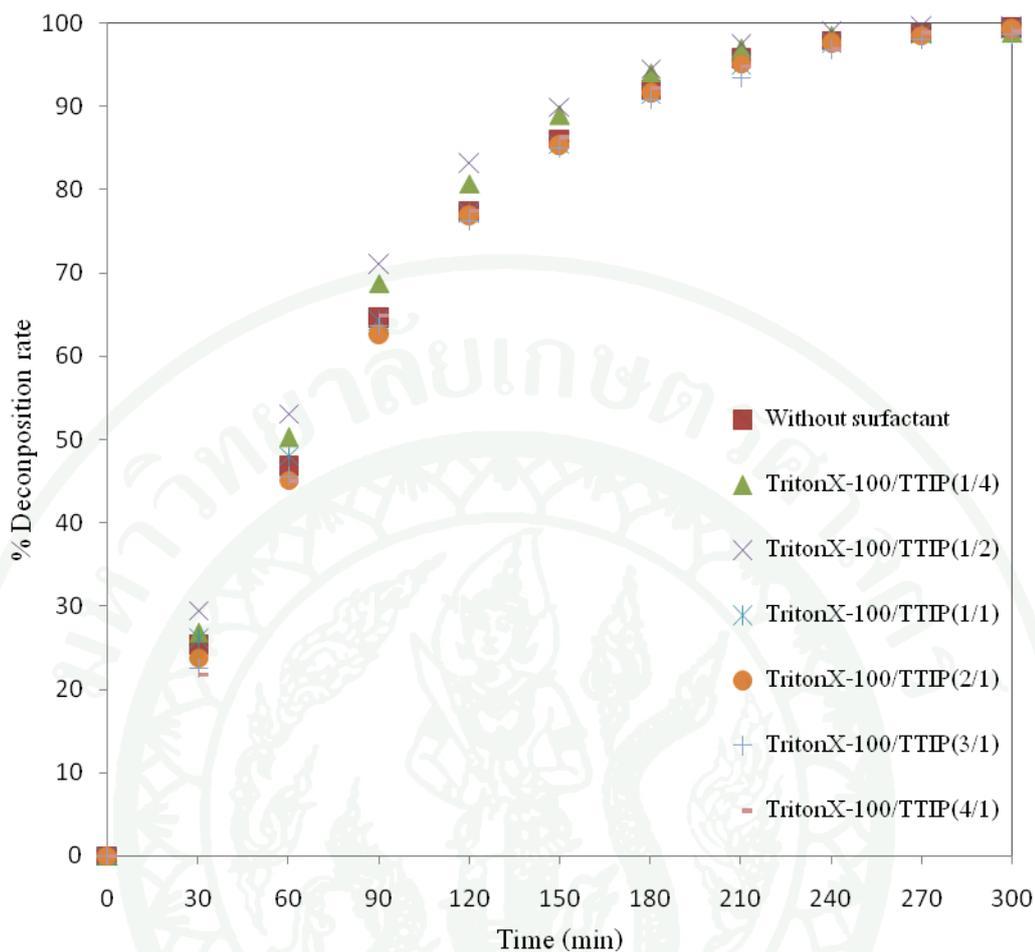
$$\frac{-d[C]}{dt} = k'[C]$$

$$\ln \frac{C_0}{C} = k't$$

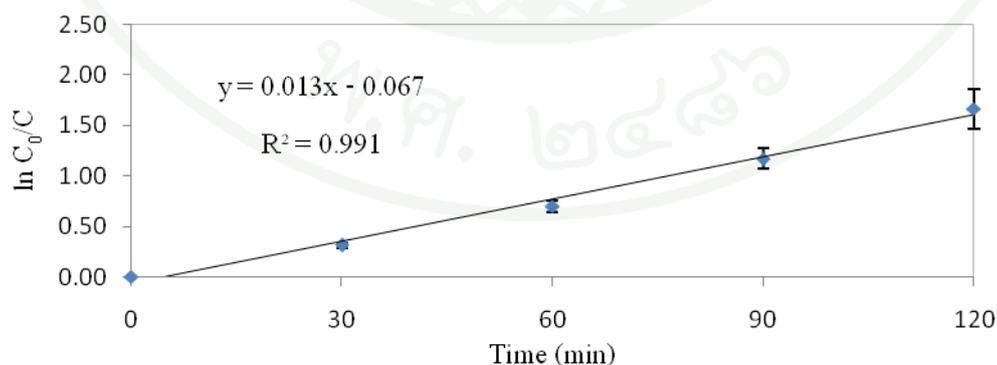
เมื่อ k' = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที⁻¹)
 เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C_0/C$ และ เวลา (นาที) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ใกล้เคียงกับ 1 ความชันของกราฟที่ได้คือ ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายของสรีแอกทีฟเฮลโล 17 (k) ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

5.3.1 การย่อยสลายสรีแอกทีฟเฮลโล 17 ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100

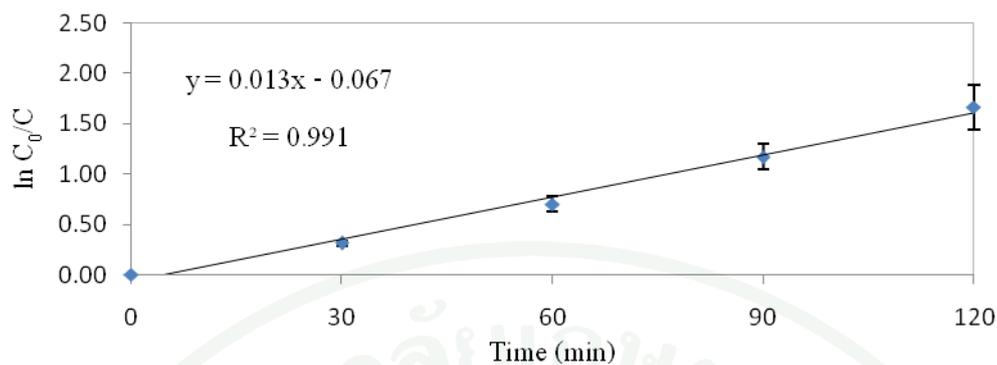
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 สามารถย่อยสลายสรีแอกทีฟเฮลโล 17 ได้ประมาณ 77- 83 เปอร์เซ็นต์ โดยมีครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ประมาณ 50 นาที ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 32 อย่างไรก็ตามเป็นที่สังเกตว่าฟิล์มบาง TritonX-100 / TTIP (1/4) และ TritonX-100 / TTIP (1/2) ที่มีลักษณะใส (ภาพที่ 5) แสงส่องผ่านได้ดี (ภาพที่ 11) และพื้นผิวไม่มีรอยแตกกร้าว (ภาพที่ 15 (a-b)) สามารถย่อยสลายสรีแอกทีฟเฮลโล 17 ได้ 80.71 % และ 83.16 % ตามลำดับ ส่วนฟิล์มที่เริ่มขุ่น และมีรอยแตกกร้าว ซึ่งได้จากการเติม TritonX-100 ความเข้มข้นสูงขึ้น (ภาพที่ 15 (c-f)) สามารถย่อยสลายสรีแอกทีฟเฮลโล 17 ได้น้อยกว่าโดยย่อยสลายได้ประมาณ 77 % และมี $t_{1/2}$ สูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งไม่แตกต่างจากฟิล์มบางที่ไม่ได้เติมสารลดแรงตึงผิว ภาพที่ 33-39 แสดงการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ



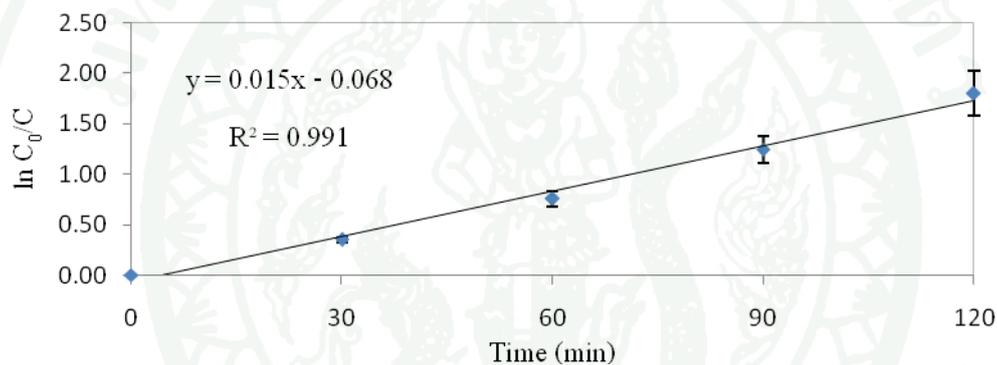
ภาพที่ 32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ



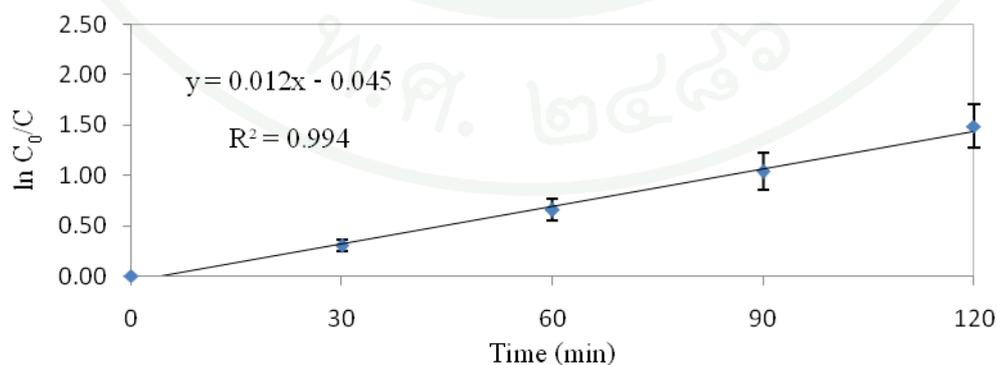
ภาพที่ 33 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสไตรีนอกทีฟขนาด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



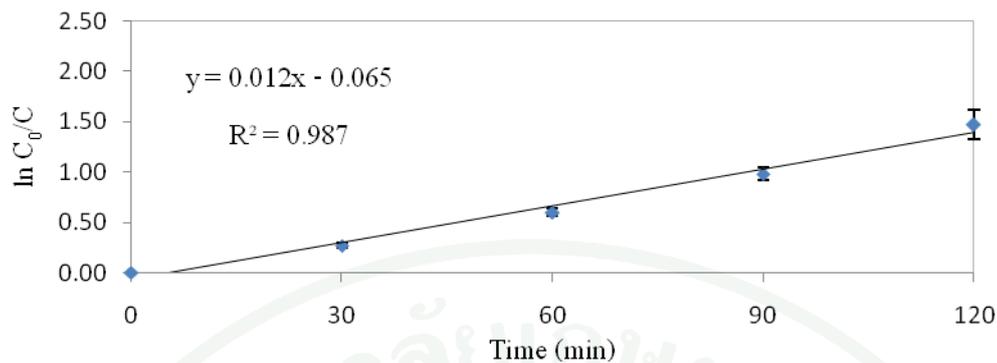
ภาพที่ 34 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



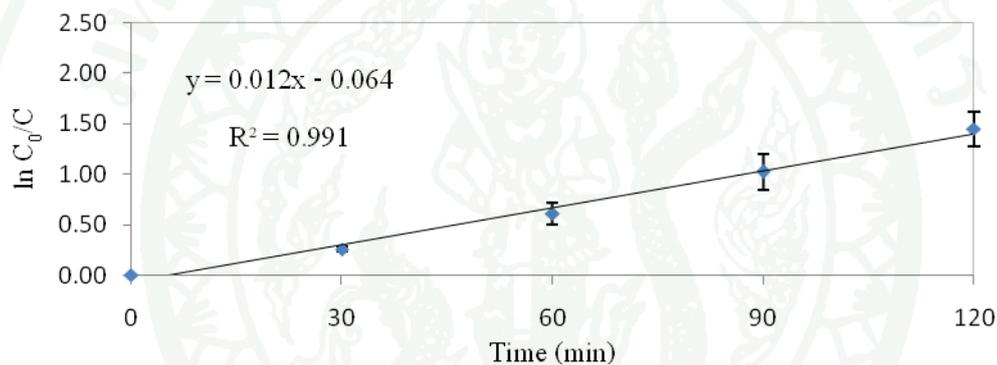
ภาพที่ 35 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



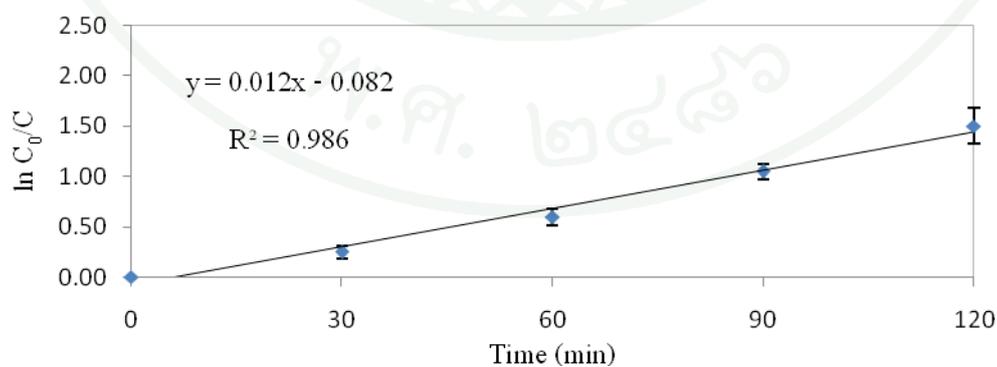
ภาพที่ 36 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 37 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฟลโด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 38 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฟลโด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



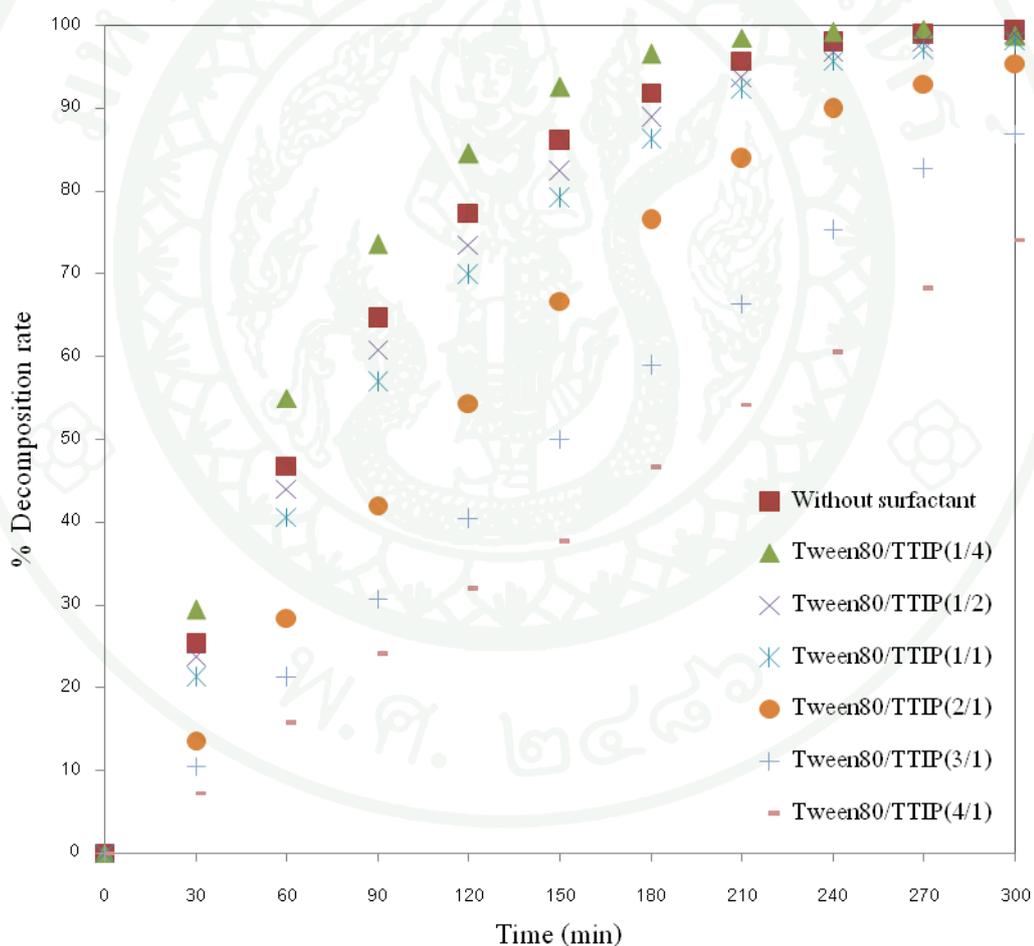
ภาพที่ 39 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฟลโด 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (4/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 8 เปรอ์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่งฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Without surfactant และ TritonX-100/TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ

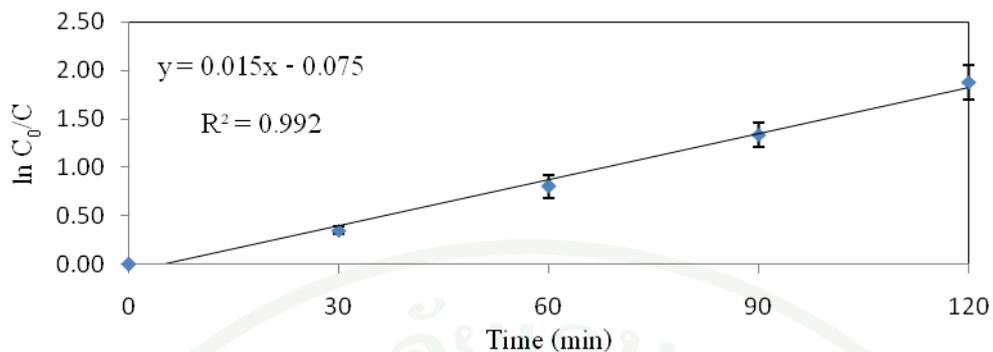
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	Photocatalytic decomposition rate (%)	k ($\times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$)	R ²	$t_{1/2}$ (min)
Without catalyst	-	-	-	-
Without surfactant	77.32 ± 4.23	1.24	0.9926	55.89
TritonX-100 /TTIP (1/4)	80.71 ± 4.39	1.38	0.9925	50.22
TritonX-100 /TTIP (1/2)	83.16 ± 3.56	1.48	0.9924	46.82
TritonX-100 /TTIP (1/1)	77.14 ± 4.93	1.23	0.9947	56.34
TritonX-100 /TTIP (2/1)	76.85 ± 3.29	1.21	0.9880	57.27
TritonX-100 /TTIP (3/1)	76.22 ± 4.02	1.21	0.9913	57.27
TritonX-100 /TTIP (4/1)	77.52 ± 3.92	1.26	0.9867	55.00

5.3.2 การย่อยสลายสียรีแอกทีฟเฟลโล 17 ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว Tween 80

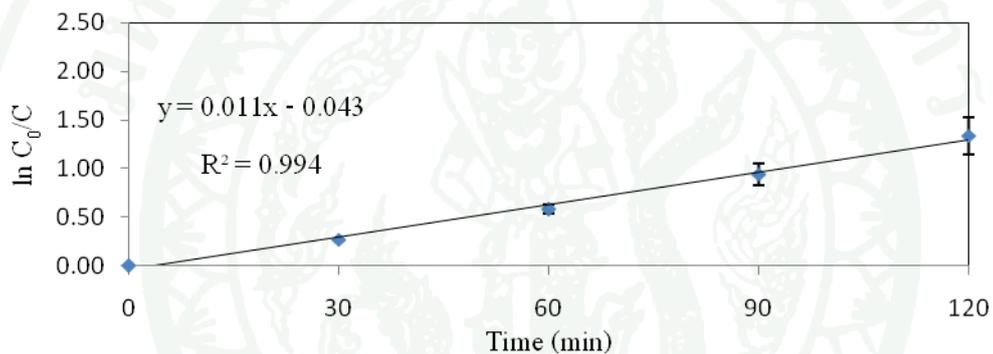
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80 / TTIP (1/4) สามารถย่อยสลายสียรีแอกทีฟเฟลโล 17 ได้สูงสุดถึง 84.49 % และมี $t_{1/2}$ ประมาณ 44 นาที ในขณะที่ฟิล์มบางที่ได้จากการปรับปรุงพื้นผิวโดยเติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงการย่อยสลายสีได้น้อยลงเป็นลำดับอย่างชัดเจนในช่วงประมาณ 32-73 % และค่า $t_{1/2}$ เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 9 และภาพที่ 40 ส่วนภาพที่ 41-46 แสดงการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยการย่อยสลายโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ



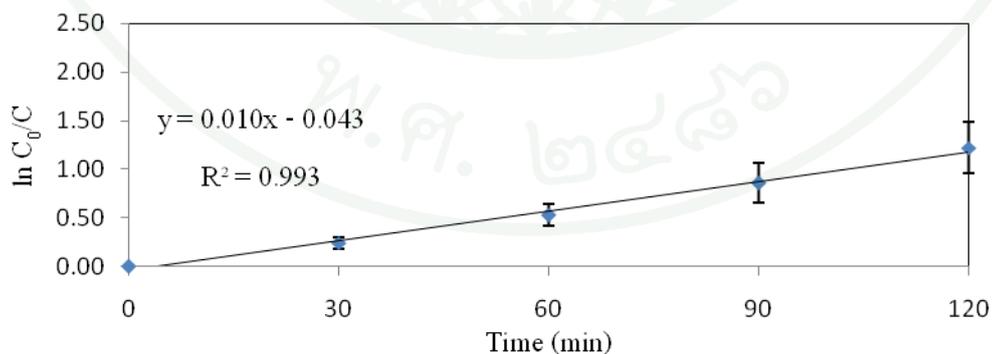
ภาพที่ 40 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ



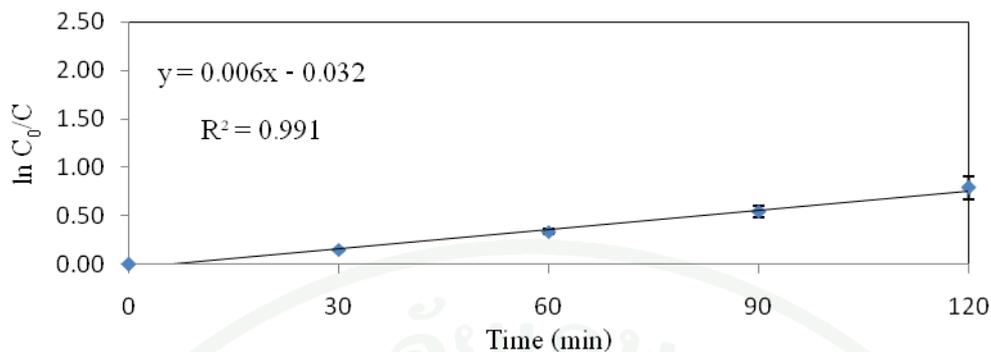
ภาพที่ 41 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



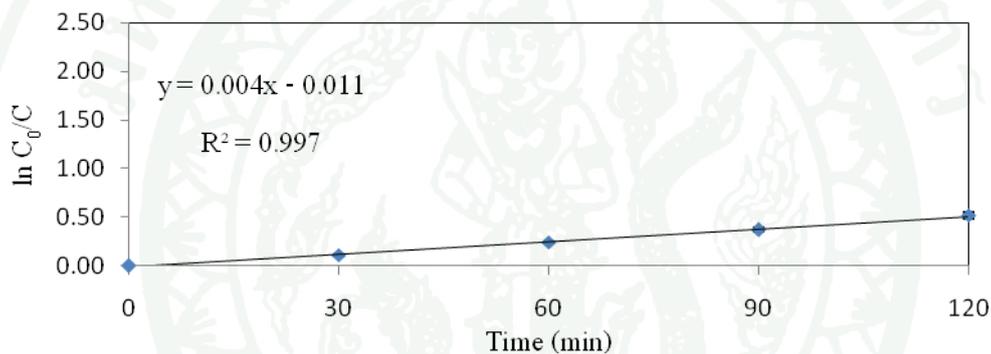
ภาพที่ 42 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



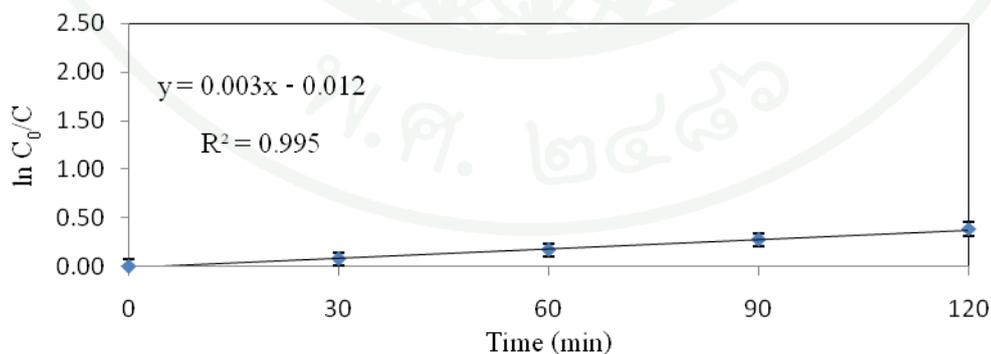
ภาพที่ 43 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 44 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอททิฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 45 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอททิฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



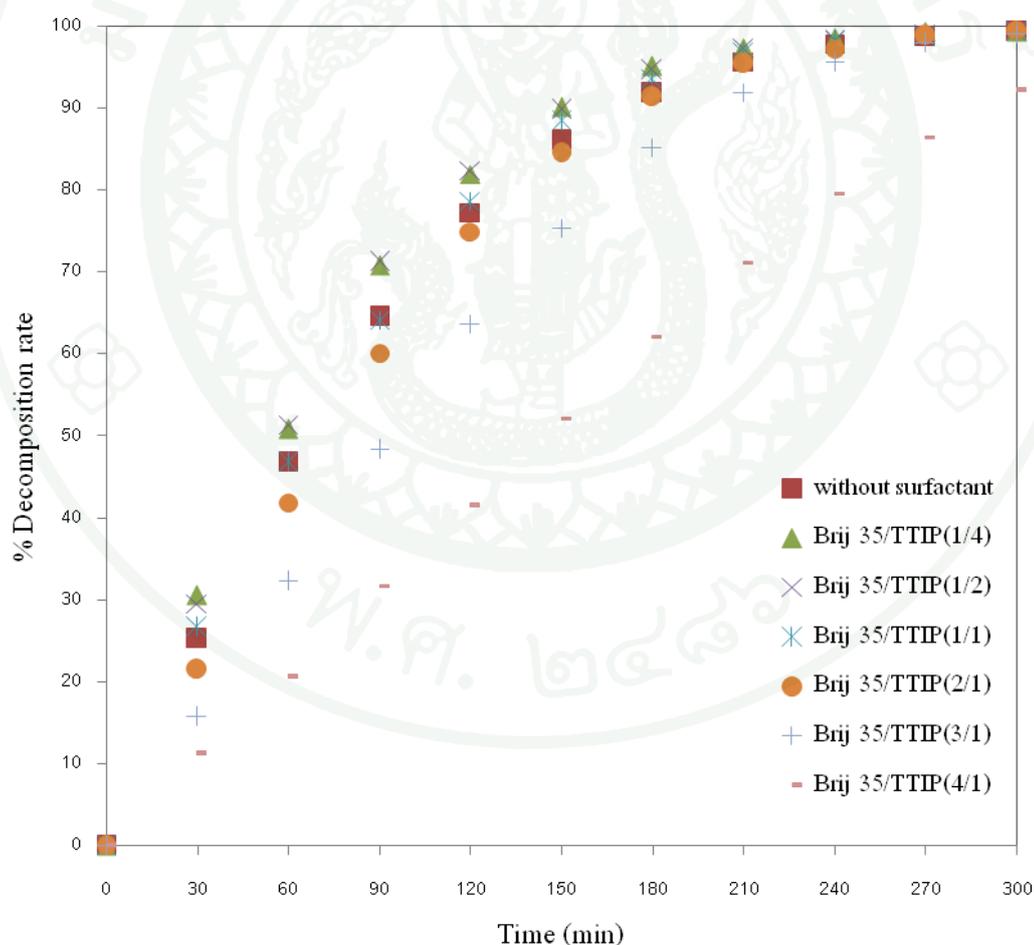
ภาพที่ 46 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอททิฟเซลล์โล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (4/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 9 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่ง
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80 / TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ

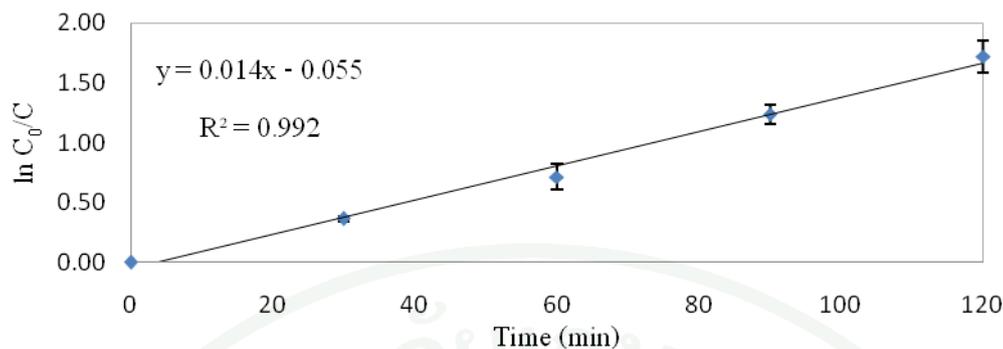
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	Photocatalytic decomposition rate (%)	k ($\times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$)	R ²	$t_{1/2}$ (min)
Tween 80 /TTIP (1/4)	84.49 ± 2.81	1.57	0.9929	44.14
Tween 80 /TTIP (1/2)	73.49 ± 5.07	1.11	0.9946	62.43
Tween 80 /TTIP (1/1)	69.80 ± 8.31	1.00	0.9941	69.30
Tween 80 /TTIP (2/1)	54.30 ± 5.74	0.65	0.9919	106.62
Tween 80 /TTIP (3/1)	40.33 ± 1.83	0.43	0.9972	161.16
Tween 80 / TTIP (4/1)	31.90 ± 2.32	0.32	0.9951	216.56

5.3.3 การย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว Brij 35

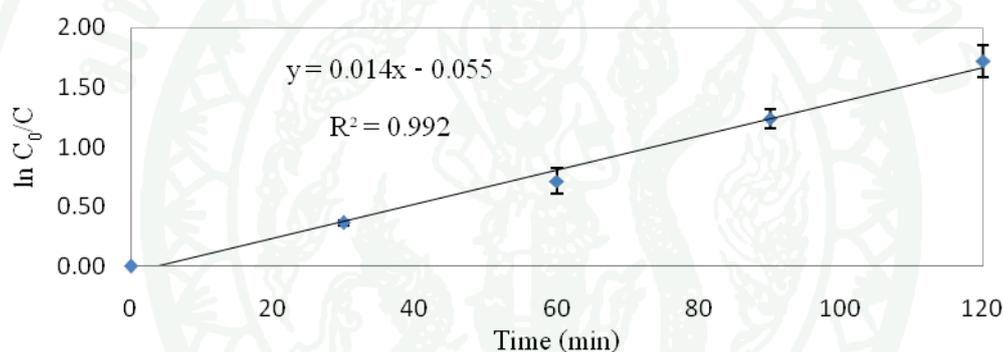
การย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35 / TTIP (1/4) และ Brij 35 / TTIP (1/2) มีประสิทธิภาพสูงสุด 81.97 % และ 82.4 % ตามลำดับ โดยมีค่า $t_{1/2}$ ประมาณ 48 นาที ในทำนองเดียวกันกับในกรณีของฟิล์มบางที่ปรับปรุงพื้นผิวโดย TritonX-100 และ Tween 80 เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 มากขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ลดต่ำลงมาอยู่ในช่วงประมาณ 41-78 % ดังแสดงในตารางที่ 10 และรูปที่ 47 ส่วนภาพที่ 48-53 แสดงการหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ



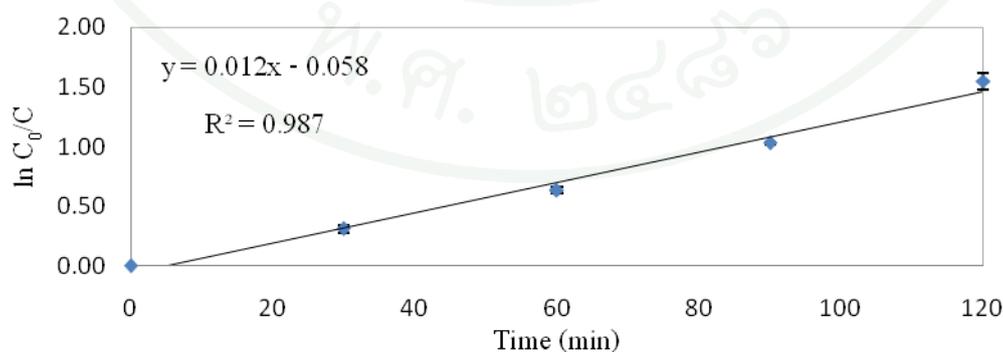
ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว Brij 35 ในอัตราส่วน โมลต่างๆ



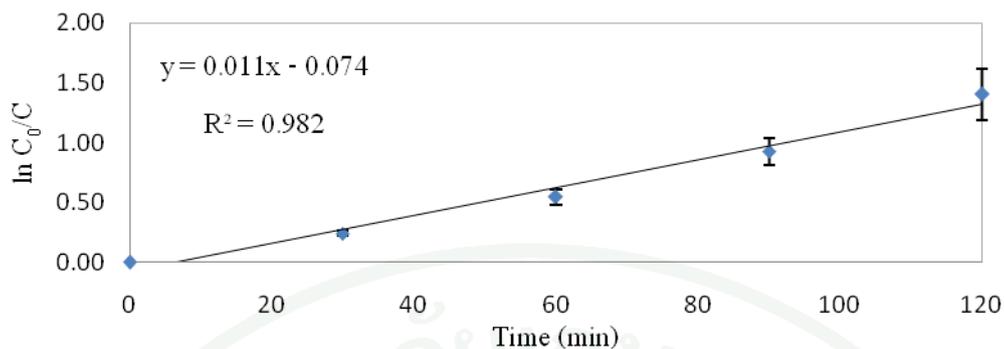
ภาพที่ 48 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



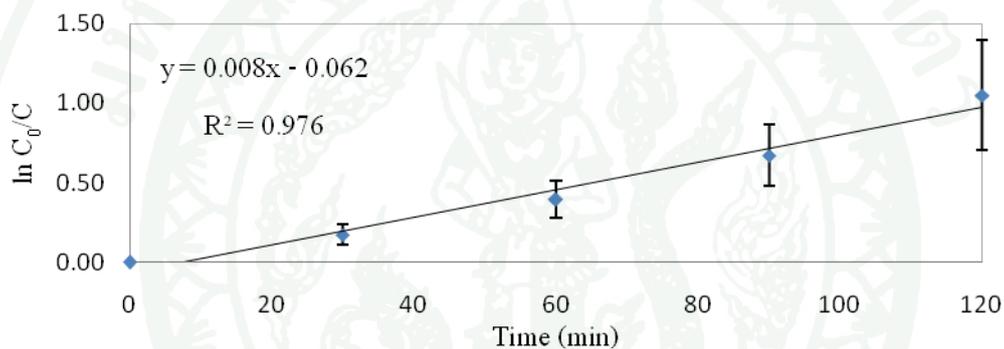
ภาพที่ 49 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



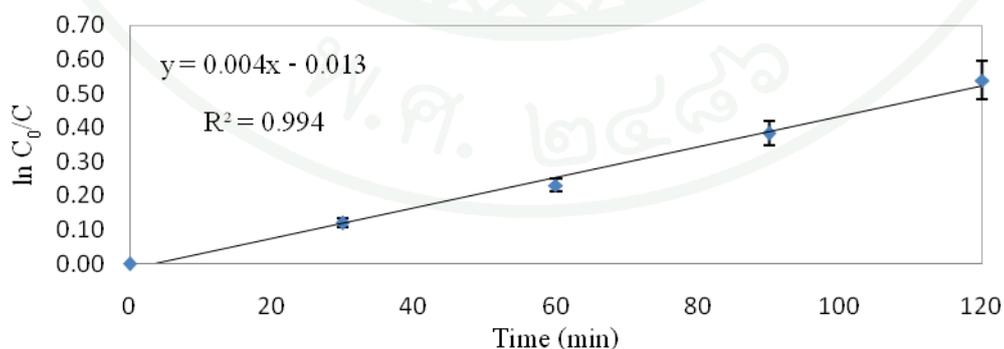
ภาพที่ 50 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสรีรแอกทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 51 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสตีรีแอคทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (2/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 52 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสตีรีแอคทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (3/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

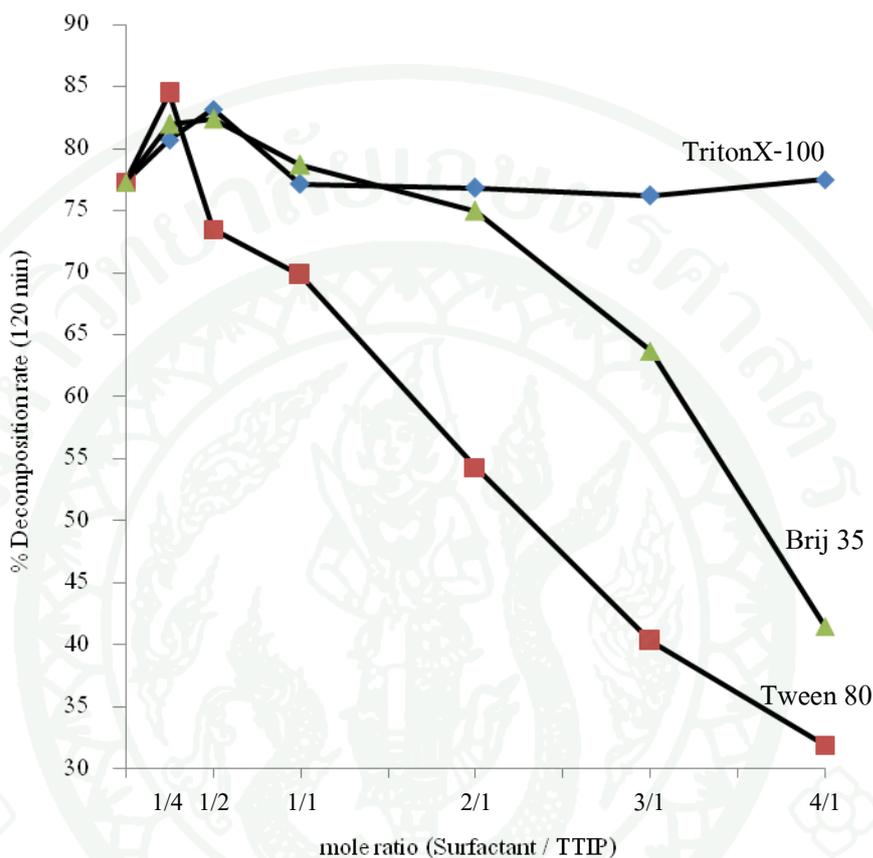


ภาพที่ 53 กราฟการหาค่าคงที่การย่อยสลายของสตีรีแอคทีฟเซลโล 17 เมื่อใช้ฟิล์มบางไทเทเนียม ไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (4/1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 10 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (Photocatalytic decomposition rate) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) และ ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ที่เวลา 120 นาที โดยใช้ตัวเร่ง
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35 / TTIP ในอัตราส่วนต่างๆ

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	Photocatalytic decomposition rate (%)	k ($\times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$)	R ²	$t_{1/2}$ (min)
Brij 35 /TTIP (1/4)	81.97 ± 2.45	1.43	0.9923	48.46
Brij 35 /TTIP (1/2)	82.41 ± 4.00	1.46	0.9920	47.47
Brij 35 /TTIP (1/1)	78.68 ± 1.43	1.27	0.9873	54.57
Brij 35 /TTIP (2/1)	74.97 ± 5.62	1.15	0.9837	60.26
Brij 35 /TTIP (3/1)	63.70 ± 11.47	0.84	0.9806	82.50
Brij 35 / TTIP (4/1)	41.53 ± 3.33	0.45	0.9943	154.00

5.3.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสียรีแอกทีฟเฮลโด 17 ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว

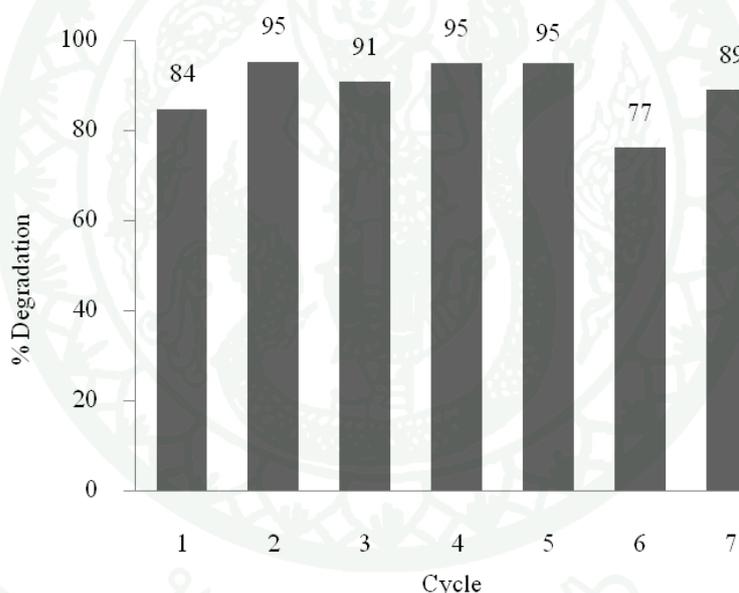


ภาพที่ 54 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (% Decomposition rate) ของสียรีแอกทีฟเฮลโด 17 ที่เวลา 120 นาที เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100, Tween 80 และ Brij 35 ในอัตราส่วนโมลต่างๆ

จากภาพที่ 54 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฮลโด 17 ที่เวลา 120 นาที เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว TritonX-100, Tween 80 และ Brij 35 ในปริมาณต่างๆ พบว่าการย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฮลโด 17 มีประสิทธิภาพสูง 80 – 84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวในสารละลายโซลเจลดต่ำ (Surfactant / TTIP = 1/4 และ 1/2)

5.4 กระบวนการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยเลือกใช้ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ในอัตราส่วนโมล ของ Tween 80 / TTIP เป็น 1/4 มาใช้ซ้ำ 7 ครั้ง โดยไม่ผ่านกระบวนการล้าง โดยใช้สีย้อมที่ฟลอสโล 17 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 ml ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ซ้ำแสดงดังภาพที่ 55 พบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำ โดยยังคงให้ประสิทธิภาพสูงในการใช้ซ้ำ 7 ครั้ง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการล้าง



ภาพที่ 55 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมที่ฟลอสโล 17 ที่เวลา 120 นาที ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/4) เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ 7 ครั้ง

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุน จากกระบวนการโซล-เจล โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น และเพิ่มประสิทธิภาพโดยเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการเตรียมโซล-เจลมีการเปลี่ยนแปลงสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด (TritonX-100 Tween 80 และ Brij 35) และเปลี่ยนแปลงปริมาณสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด (0.25 0.5 1.0 2.0 3.0 และ 4.0 โมล) สารละลายโซล-เจลที่เตรียมได้มีความเสถียรอยู่หลายอาทิตย์ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ได้จากการจุ่มเคลือบบนตัวรองรับ โปโรซิลิกาท แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นได้มีลักษณะแตกต่างกัน โดยฟิล์มเติมสารลดแรงตึงผิว TritonX-100 ในปริมาณต่างๆ มีลักษณะใส เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อปริมาณ TritonX-100 สูงขึ้นความขุ่นของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น และเกิดการหลุดร่วงของเนื้อฟิล์ม ฟิล์มสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีเกิดการหลุดร่วงของเนื้อฟิล์ม ส่วนฟิล์มที่เติม Brij 35 ทั้งหมดเกิดการหลุดร่วงของเนื้อฟิล์ม

ผลจากการตรวจสอบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิค เอกซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชัน ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโคปี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส ลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาด 25-32 นาโนเมตร และเริ่มดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่นประมาณ 365 นาโนเมตร ฟิล์มจากโซล-เจลที่ปรับปรุงโดยการเติมสารลดแรงตึงผิวจะมีความเป็นรูพรุนสูงและลดการรวมตัวของอนุภาคซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์มบาง ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวมีความหนาแน่นของอนุภาคสูงกว่าและความขรุขระต่ำกว่า

ผลจากการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 ฟิล์มที่เตรียมจาก โซล-เจลที่เติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณต่างๆมีประสิทธิภาพสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เติมในโซล-เจลสูงขึ้น โดยฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ปริมาณ 0.25 โมล มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถย่อยสลายสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 ได้ 84.49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 120 นาที และพบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการล้าง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความทนทานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งความทนทานทางเคมี เช่นความทนกรด และเบส เป็นต้น
2. ควรศึกษากลไกในการย่อยสลายของสียรีแอกทีฟเฮลโด 17
3. ควรศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้แสงธรรมชาติแทนแสงอัลตราไวโอเล็ต
4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยเปลี่ยนชนิดของน้ำเสียที่มีสีข้อมเพียงสีเดียวเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีผสมกันหลายสี เพื่อศึกษาว่าประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนอย่างไร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- สภา กิจงานุกิจ. 2549. การเตรียม และการวิเคราะห์แมกนีเซียมอลูมิเน ($MgAl_2O_4$) เซรามิก โดยผ่านกระบวนการโซล-เจล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Al-Ekabi, H., G. Edwards, W. Holden, A. Safarazadeh-Amiri and J. Story. 1991. **Chemical Oxidation**. Technomic Publishing, Lancaster.
- Balasubramanian, G., D.D. Dionysiou and M.T. Suidan. 2003. Titania powder modified sol-gel process for photocatalytic applications. **J. Mater. Sci.** 38: 823–831.
- Bernardi, M.I.B., E.J.H. Lee, P.N. Lisboa-Filho, E.R. Leite, E.Longo and J.A. Varela. 2001. TiO_2 thin film growth using the MOCVD method. **Mater. Res.** 4: 223-6
- Bouras, P., E. Stathatos, P. Lianos and C. Tsakiroglou. 2004. Photodegradation of basic blue by highly efficient nanocrystalline titania films. **Appl. Catal., B** 51: 275–281.
- Byrne, J.A., B.R. Eggins, N.M.D. Brown, B. McKinney and M. Rouse. 1997. Immobilisation of TiO_2 powder for the treatment of polluted water. **Appl. Catal., B** 17: 25-36.
- Domaradzki, J., A. Borkowska, D. Kaczmarek and E. Prociow. 2006. Transparent oxide semiconductors based on TiO_2 doped with V, Co and Pd elements. **J. Non-Cryst. Solids** 352: 2324-2327
- Choi, H., E. Stathatos and D.D. Dionysiou. 2006. Sol-gel preparation of mesoporous photocatalytic TiO_2 films and TiO_2/Al_2O_3 composite membranes for environmental applications. **Appl. Catal., B** 63: 60–67.
- Green Titan, Inc. 2004. **What is Photocatalyst**. Available Source: <http://www.greentitan.com/pco.htm>, October 5, 2011.

- Guo, B., Z. Liu, L. Hong, H. Jiang and J.Y. Lee. 2005. Photocatalytic effect of the sol-gel derived nanoporous TiO₂ transparent thin films. **Thin Solid Films**. 479: 310-315.
- Herrmann, J.M., C. Guillard and P. Pichat. 1993. Heterogeneous photocatalysis: an emerging technology for watertreatment. **Catal. Today**. 17: 7-20.
- Hoffmann, M.R., S.T. Martin, W. Choi and D.W. Bahnemann. 1995. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chem. Rev.** 95: 69-96.
- Ioannis, K. and A. Triantafyllos. 2003. Photocatalytic transformation of pesticides in aqueous titanium dioxide suspensions using artificial and solar light: intermediates and degradation pathways. **Appl. Catal., B** 42: 319-335.
- Ivanda, M., S. Music, S. Popovic and M. Gotic. 1999. XRD, Raman and FT-IR spectroscopic observations of nanosized TiO₂ synthesized by the sol-gel method based on an esterification reaction. **J. Mol. Struct.** 480: 645-649.
- Kim, D.J., S.H. Hahn, S.H. Oh and E.J. Kim. 2001. Influence of calcination temperature on structural and optical properties of TiO₂ thin films prepared by sol-gel dip coating. **Mater. Lett.** 57: 355-360.
- Kim, D.S. and S.Y. Kwak. 2007. The hydrothermal synthesis of mesoporous TiO₂ with high crystallinity, thermal stability, large surface area, and engaged photocatalytic activity. **Appl. Catal., A** 323: 110-118.
- Konstantinou, I.K., and T.A. Albanis. 2003. Photocatalytic transformation of pesticides in aqueous titanium dioxide suspensions using artificial and solar light: intermediates and degradation pathways. **Appl. Catal., B** 42: 319-335.

- Kwaguchi, H. 1994. Photocatalytic reaction rate on titanium dioxide concentration in aqueous suspension. **Environ. Technol.** 15: 183-186.
- Matthews, R.W. 1990. Purification of water with near-UV illumination suspensions of titanium dioxide. **Water Res.** 24: 653-660.
- Namura, K. 2002. **Minerals.** Crystal structure gallery. Available Source: <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>, October 10, 2011.
- Neppolian, B., S. R. Kanel, H.C. Choi, M.V. Shankar, B. Arabindoo and V. Murugesan. 2003. Photocatalytic degradation of reactive yellow 17 dye in aqueous solution in the presence of TiO₂ with cement binder. **Inter. J. Photoenergy.** 5: 45-49.
- _____, S. Sakthivel, B. Arabindoo, M. Palanichamy and V. Murugesan. 2001. Kinetics of photocatalytic degradation of reactive yellow 17 dye in aqueous solution using UV irradiation. **Sci. Health., A** 36: 203–213.
- Pätsi, M.E., J.A. Hautaniemi, H.M. Rahiala, T.O. Peltola and I.M.O. Kanganiemi. 1998. Bonding strengths of titania sol-gel derived coatings on titanium. **J. Sol-Gel Sci. Technol.** 11: 55-66.
- Pirkanniemi, K. and M. Sillanpää. 2002. Heterogeneous water phase catalysis as an environmental application. **Chemosphere.** 48: 1047-1060.
- Rupa, A.V., D. Manikandan, D. Divakar and T. Sivakumar. 2007. Effect of deposition of Ag on TiO₂ nanoparticles on the photodegradation of Reactive Yellow 17. **J. Hazard. Mater.** 147: 906-913.

Wang, T.M., S.K. Zheng, W.C. Hao and C. Wang. 2002. Studies on photocatalytic activity and transmittance spectra of TiO₂ thin films prepared by r.f. magnetron sputtering method. *Surf. Coat. Technol.* 155: 141-145.

Takeuchi, M., S. Sakai and M. Matsuoda. 2009. Preparation of the visible light responsive TiO₂ thin film photocatalysts by the RF magnetron sputtering deposition method. **Res. Chem. Intermed.** 35: 973-983.

Valtierra, J.M., C.F. Reyes, S. Calixto, P. Bosch and V.H. Lara. 2006. The influence of surfactants on the roughness of titania sol-gel films. **Mater. Charact.** 58: 233-242.

Wang, Y., Z.H. Jiang and F.J. Yang. 2006. Preparation and photocatalytic activity of mesoporous TiO₂ derived from hydrolysis condensation with TX-100 as template. **Mater. Sci. Eng., B** 128: 229-233



ภาคผนวก

ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วมของ
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดสอบการย่อยสลายของสีเมื่อไม่มีตัวเร่งเชิงแสง (Without catalyst)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.407	0.404	0.417	19.791	19.592	20.218	1.000	1.000	1.000	1.000	-3.116x10 ⁻⁸
30	0.412	0.408	0.417	19.990	19.825	20.248	1.010	1.012	1.001	1.008	-7.766x10 ⁻³
60	0.408	0.412	0.414	19.811	20.019	20.092	1.001	1.022	0.994	1.006	-5.499x10 ⁻³
90	0.412	0.410	0.413	19.995	19.879	20.049	1.010	1.015	0.992	1.006	-5.491x10 ⁻³
120	0.409	0.408	0.410	19.854	19.816	19.888	1.003	1.011	0.984	0.999	5.803x10 ⁻⁴
150	0.406	0.407	0.406	19.728	19.743	19.709	0.997	1.008	0.975	0.993	6.930x10 ⁻⁴
180	0.407	0.401	0.407	19.767	19.461	19.777	0.999	0.993	0.978	0.990	9.971x10 ⁻³
210	0.405	0.406	0.408	19.660	19.714	19.816	0.993	1.006	0.980	0.993	6.809x10 ⁻³
240	0.406	0.405	0.407	19.718	19.650	19.767	0.996	1.003	0.978	0.992	7.708x10 ⁻³
270	0.401	0.402	0.407	19.456	19.519	19.738	0.983	0.996	0.976	0.985	1.491x10 ⁻³
300	0.404	0.400	0.406	19.617	19.417	19.709	0.991	0.991	0.975	0.986	1.442x10 ⁻²

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ without surfactant

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.149	0.408	0.413	20.359	19.806	20.039	1.000	1.000	1.000	1.000	-5.634x10 ⁻⁸
30	0.304	0.310	0.314	14.733	15.044	15.223	0.724	0.760	0.760	0.748	2.908x10 ⁻¹
60	0.208	0.222	0.230	10.117	10.789	11.141	0.497	0.545	0.556	0.532	6.302x10 ⁻¹
90	0.132	0.152	0.155	6.383	7.383	7.534	0.314	0.373	0.379	0.354	1.038
120	0.077	0.109	0.096	3.714	5.282	4.636	0.182	0.267	0.231	0.227	1.484
150	0.049	0.066	0.058	2.374	3.184	2.806	0.117	0.161	0.140	0.139	1.972
180	0.025	0.043	0.033	1.199	2.102	1.587	0.059	0.106	0.079	0.081	2.508
210	0.012	0.024	0.017	0.578	1.175	0.830	0.028	0.059	0.014	0.043	3.146
240	0.005	0.013	0.009	0.233	0.607	0.413	0.011	0.031	0.021	0.021	3.868
270	0.003	0.007	0.005	0.126	0.350	0.223	0.006	0.018	0.011	0.012	4.451
300	0.002	0.003	0.003	0.107	0.141	0.141	0.005	0.007	0.007	0.006	5.042

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/4)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.416	0.420	0.409	20.209	20.374	19.830	1.000	1.000	1.000	1.000	1.430 x10 ⁻⁷
30	0.299	0.302	0.309	14.510	14.675	15.010	0.718	0.720	0.757	0.732	3.123 x10 ⁻¹
60	0.195	0.202	0.221	9.485	9.825	10.728	0.469	0.482	0.541	0.498	6.981 x10 ⁻¹
90	0.116	0.127	0.146	5.612	6.146	7.083	0.278	0.302	0.357	0.312	1.167
120	0.067	0.074	0.099	3.238	3.578	4.816	0.160	0.176	0.243	0.193	1.646
150	0.037	0.041	0.060	1.777	1.985	2.898	0.088	0.097	0.146	0.111	2.203
180	0.018	0.021	0.035	0.874	1.010	1.684	0.043	0.050	0.085	0.059	2.826
210	0.010	0.009	0.019	0.481	0.456	0.913	0.024	0.022	0.046	0.031	3.482
240	0.008	0.005	0.006	0.374	0.243	0.301	0.018	0.012	0.015	0.015	4.187
270	0.003	0.002	0.008	0.165	0.117	0.403	0.008	0.006	0.020	0.011	4.474
300	0.004	0.002	0.008	0.209	0.107	0.369	0.010	0.005	0.019	0.011	4.475

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/2)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.413	0.413	0.412	20.034	20.053	20.015	1.000	1.000	1.000	1.000	2916x10 ⁻⁸
30	0.289	0.298	0.286	14.019	14.485	13.893	0.700	0.722	0.694	0.705	3.490x10 ⁻¹
60	0.181	0.209	0.191	8.762	10.160	9.262	0.437	0.507	0.463	0.469	7.573x10 ⁻¹
90	0.103	0.136	0.120	5.000	6.592	5.825	0.250	0.329	0.291	0.290	1.239
120	0.053	0.082	0.073	2.592	3.995	3.534	0.129	0.199	0.177	0.168	1.781
150	0.029	0.050	0.045	1.422	2.422	2.180	0.071	0.121	0.109	0.100	2.300
180	0.012	0.030	0.025	0.597	1.456	1.228	0.030	0.073	0.061	0.055	2.908
210	0.007	0.015	0.010	0.359	0.714	0.500	0.018	0.036	0.025	0.026	3.643
240	0.004	0.006	0.004	0.180	0.286	0.199	0.009	0.014	0.010	0.011	4.504
270	0.002	0.002	0.002	0.112	0.073	0.102	0.006	0.004	0.005	0.005	5.346
300	0.003	0.002	0.001	0.155	0.087	0.058	0.008	0.004	0.003	0.005	5.297

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (1/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.412	0.415	0.412	20.010	20.131	20.005	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.801x10 ⁻⁸
30	0.289	0.327	0.301	14.044	15.879	14.592	0.702	0.789	0.729	0.740	3.011x10 ⁻¹
60	0.194	0.241	0.209	9.403	11.709	10.155	0.470	0.582	0.508	0.520	6.54 x10 ⁻¹
90	0.124	0.180	0.140	6.000	8.738	6.796	0.300	0.434	0.340	0.358	1.028
120	0.076	0.117	0.091	3.680	5.665	4.413	0.184	0.281	0.221	0.229	1.476
150	0.045	0.079	0.056	2.165	3.840	2.738	0.108	0.191	0.137	0.145	1.929
180	0.022	0.048	0.035	1.078	2.335	1.704	0.054	0.116	0.085	0.085	2.465
210	0.010	0.032	0.020	0.471	1.558	0.961	0.024	0.077	0.048	0.050	3.003
240	0.004	0.016	0.011	0.214	0.767	0.510	0.011	0.038	0.025	0.025	3.699
270	0.000	0.010	0.006	0.019	0.495	0.296	0.001	0.025	0.015	0.013	4.308
300	0.000	0.005	0.003	0.015	0.252	0.146	0.001	0.013	0.007	0.007	4.984

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (2/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.414	0.420	0.413	20.112	20.374	20.029	1.000	1.000	1.000	1.000	1.137x10 ⁻⁷
30	0.308	0.323	0.319	14.942	15.680	15.485	0.743	0.770	0.773	0.762	2.719x10 ⁻¹
60	0.222	0.224	0.237	10.782	10.883	11.519	0.536	0.534	0.575	0.548	6.006x10 ⁻¹
90	0.152	0.150	0.165	7.383	7.262	8.005	0.367	0.356	0.400	0.374	9.824x10 ⁻¹
120	0.096	0.083	0.109	4.680	4.034	5.282	0.233	0.198	0.264	0.231	1.463
150	0.060	0.053	0.070	2.898	2.587	3.408	0.144	0.127	0.170	0.148	1.917
180	0.035	0.026	0.044	1.689	1.277	2.146	0.084	0.063	0.107	0.085	2.470
210	0.019	0.016	0.026	0.903	0.762	1.248	0.045	0.037	0.062	0.048	3.032
240	0.009	0.007	0.014	0.451	0.340	0.675	0.022	0.017	0.034	0.024	3.718
270	0.004	0.005	0.009	0.199	0.262	0.432	0.010	0.013	0.022	0.015	4.215
300	0.003	0.003	0.004	0.126	0.165	0.170	0.006	0.008	0.008	0.008	4.877

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (3/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.411	0.411	0.420	19.927	19.966	20.396	1.000	1.000	1.000	1.000	-9.835x10 ⁻⁸
30	0.315	0.311	0.335	15.301	15.102	16.252	0.768	0.756	0.798	0.774	2.561x10 ⁻¹
60	0.222	0.202	0.254	10.786	9.782	12.316	0.541	0.490	0.605	0.545	6.065x10 ⁻¹
90	0.146	0.124	0.182	7.102	6.015	8.811	0.356	0.301	0.433	0.363	1.012
120	0.096	0.082	0.117	4.660	3.985	5.699	0.234	0.200	0.280	0.238	1.437
150	0.064	0.050	0.073	3.063	2.442	3.539	0.154	0.122	0.174	0.150	1.898
180	0.039	0.031	0.045	1.874	1.505	2.184	0.094	0.075	0.107	0.092	2.384
210	0.021	0.025	0.027	1.432	1.218	1.311	0.072	0.061	0.064	0.066	2.722
240	0.011	0.014	0.016	0.500	0.675	0.782	0.025	0.034	0.038	0.032	3.429
270	0.005	0.007	0.011	0.252	0.345	0.553	0.013	0.017	0.027	0.019	3.962
300	0.002	0.003	0.009	0.180	0.160	0.432	0.009	0.008	0.021	0.013	4.362

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ TritonX-100/TTIP (4/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.411	0.411	0.420	19.927	19.947	20.408	1.000	1.000	1.000	1.000	5.800x10 ⁻⁸
30	0.315	0.345	0.310	15.301	16.767	15.044	0.768	0.841	0.737	0.782	2.461x10 ⁻¹
60	0.222	0.246	0.216	10.786	11.961	10.471	0.541	0.600	0.513	0.551	5.954x10 ⁻¹
90	0.146	0.153	0.135	7.102	7.442	6.573	0.356	0.373	0.322	0.351	1.048
120	0.096	0.106	0.077	4.660	5.160	3.714	0.234	0.259	0.182	0.225	1.492
150	0.063	0.068	0.041	3.063	3.296	1.971	0.154	0.165	0.097	0.139	1.977
180	0.039	0.038	0.020	1.874	1.850	0.951	0.094	0.093	0.047	0.078	2.554
210	0.030	0.024	0.010	1.432	1.141	0.495	0.072	0.057	0.024	0.051	2.974
240	0.010	0.025	0.004	0.500	1.223	0.214	0.025	0.061	0.010	0.032	3.433
270	0.005	0.009	0.001	0.252	0.437	0.049	0.013	0.022	0.002	0.012	4.397
300	0.004	0.006	0.004	0.180	0.296	0.170	0.009	0.015	0.008	0.011	4.535

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/4)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.407	0.415	0.415	19.767	20.126	20.131	1.000	1.000	1.000	1.000	6.347x10 ⁻⁷
30	0.300	0.291	0.282	14.549	14.121	13.709	0.736	0.702	0.681	0.706	3.478 x10 ⁻¹
60	0.209	0.180	0.168	10.136	8.728	8.170	0.513	0.434	0.406	0.451	7.968 x10 ⁻¹
90	0.122	0.109	0.097	5.932	5.267	4.694	0.300	0.262	0.233	0.265	1.328
120	0.076	0.062	0.054	3.670	3.010	2.612	0.186	0.150	0.130	0.155	1.863
150	0.037	0.031	0.024	1.816	1.500	1.170	0.092	0.075	0.058	0.075	2.593
180	0.019	0.013	0.011	0.932	0.626	0.529	0.047	0.031	0.026	0.035	3.357
210	0.009	0.006	0.004	0.437	0.272	0.199	0.022	0.014	0.010	0.015	4.189
240	0.006	0.003	0.002	0.282	0.126	0.087	0.014	0.006	0.004	0.008	4.793
270	0.003	0.002	0.001	0.136	0.078	0.044	0.007	0.004	0.002	0.004	5.449
300	0.006	0.002	0.008	0.272	0.078	0.408	0.014	0.004	0.020	0.013	4.372

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/2)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.410	0.409	0.411	19.898	19.864	19.951	1.000	1.000	1.000	1.000	1.300x10 ⁻⁷
30	0.312	0.312	0.314	15.126	15.155	15.262	0.760	0.763	0.765	0.763	2.709 x10 ⁻¹
60	0.221	0.228	0.241	10.708	11.053	11.689	0.538	0.556	0.586	0.560	5.797 x10 ⁻¹
90	0.144	0.159	0.180	6.990	7.704	8.728	0.351	0.388	0.437	0.392	9.360 x10 ⁻¹
120	0.089	0.106	0.131	4.335	5.141	6.359	0.218	0.259	0.319	0.265	1.328
150	0.052	0.070	0.095	2.534	3.408	4.621	0.127	0.172	0.232	0.177	1.732
180	0.029	0.046	0.064	1.383	2.223	3.087	0.070	0.112	0.155	0.112	2.189
210	0.013	0.027	0.039	0.626	1.301	1.913	0.031	0.065	0.096	0.064	2.745
240	0.004	0.015	0.021	0.214	0.714	1.024	0.011	0.036	0.051	0.033	3.412
270	0.002	0.011	0.013	0.078	0.515	0.612	0.004	0.026	0.031	0.020	3.904
300	0.001	0.008	0.006	0.024	0.379	0.282	0.001	0.019	0.014	0.011	4.469

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (1/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.412	0.413	0.413	20.000	20.063	20.068	1.000	1.000	1.000	1.000	3.388x10 ⁻⁸
30	0.345	0.314	0.316	16.762	15.248	15.359	0.838	0.760	0.765	0.788	2.385x10 ⁻¹
60	0.277	0.229	0.203	13.456	11.097	11.170	0.673	0.553	0.557	0.594	5.206 x10 ⁻¹
90	0.222	0.153	0.159	10.762	7.422	7.738	0.538	0.370	0.386	0.431	8.412 x10 ⁻¹
120	0.164	0.103	0.107	7.956	5.005	5.189	0.398	0.249	0.259	0.302	1.197
150	0.123	0.067	0.069	5.990	3.233	3.345	0.300	0.161	0.167	0.209	1.565
180	0.087	0.041	0.042	4.238	2.010	2.029	0.212	0.100	0.101	0.138	1.982
210	0.047	0.026	0.024	2.267	1.267	1.160	0.113	0.063	0.058	0.078	2.550
240	0.026	0.016	0.012	1.267	0.757	0.563	0.063	0.038	0.028	0.043	3.145
270	0.016	0.014	0.006	0.786	0.689	0.282	0.063	0.034	0.014	0.029	3.532
300	0.011	0.007	0.005	0.519	0.359	0.218	0.026	0.018	0.011	0.018	4.003

ตารางผนวกที่ 12 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (2/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.412	0.415	0.412	19.985	20.126	19.985	1.000	1.000	1.000	1.000	-6.230x10 ⁻⁷
30	0.354	0.356	0.360	17.180	17.267	17.485	0.860	0.858	0.875	0.864	1.460 x10 ⁻¹
60	0.303	0.290	0.294	14.714	14.063	14.272	0.736	0.699	0.714	0.716	3.336 x10 ⁻¹
90	0.255	0.231	0.233	12.369	11.194	11.316	0.619	0.556	0.566	0.580	5.440 x10 ⁻¹
120	0.215	0.282	0.178	10.442	8.408	8.660	0.522	0.415	0.433	0.457	7.830 x10 ⁻¹
150	0.174	0.115	0.124	8.447	5.578	6.010	0.423	0.277	0.301	0.333	1.098
180	0.134	0.072	0.085	6.490	3.515	4.102	0.325	0.175	0.205	0.235	1.449
210	0.098	0.047	0.054	4.752	2.282	2.631	0.238	0.113	0.132	0.161	1.827
240	0.065	0.029	0.031	3.165	1.408	1.505	0.158	0.070	0.075	0.101	2.291
270	0.055	0.013	0.020	2.646	0.650	0.971	0.132	0.032	0.049	0.071	2.644
300	0.035	0.013	0.010	1.699	0.621	0.461	0.085	0.031	0.023	0.046	3.072

ตารางผนวกที่ 13 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (3/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.417	0.417	0.413	20.228	20.248	20.029	1.000	1.000	1.000	1.000	2.533x10 ⁻⁷
30	0.371	0.373	0.372	18.012	18.117	18.044	0.891	0.895	0.901	0.895	1.104 x10 ⁻¹
60	0.327	0.327	0.328	15.893	15.859	15.922	0.786	0.783	0.795	0.788	2.383 x10 ⁻¹
90	0.288	0.284	0.292	13.976	13.767	14.184	0.691	0.680	0.708	0.693	3.667 x10 ⁻¹
120	0.250	0.173	0.253	12.141	11.612	12.277	0.600	0.577	0.613	0.597	5.164 x10 ⁻¹
150	0.212	0.200	0.211	10.306	9.704	10.252	0.509	0.479	0.512	0.500	6.927 x10 ⁻¹
180	0.176	0.159	0.178	8.544	7.694	8.636	0.422	0.380	0.431	0.411	8.887 x10 ⁻¹
210	0.145	0.127	0.147	7.058	6.150	7.141	0.349	0.304	0.357	0.336	1.089
240	0.114	0.085	0.109	5.529	4.121	5.301	0.273	0.204	0.269	0.247	1.398
270	0.007	0.060	0.080	3.728	2.888	3.859	0.184	0.143	0.193	0.173	1.753
300	0.059	0.048	0.057	2.854	2.340	2.752	0.141	0.116	0.137	0.131	2.030

ตารางผนวกที่ 14 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Tween 80/TTIP (4/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.414	0.411	0.406	20.107	19.956	19.694	1.000	1.000	1.000	1.000	4.803x10 ⁻⁷
30	0.381	0.383	0.378	18.490	18.583	18.345	0.920	0.931	0.931	0.927	7.536 x10 ⁻²
60	0.345	0.346	0.347	16.767	16.786	16.854	0.834	0.841	0.856	0.844	1.701 x10 ⁻¹
90	0.308	0.312	0.316	14.942	15.131	15.350	0.743	0.758	0.779	0.760	2.741 x10 ⁻¹
120	0.272	0.239	0.284	13.180	13.699	13.806	0.655	0.686	0.701	0.681	3.842 x10 ⁻¹
150	0.240	0.277	0.250	11.665	13.466	12.146	0.580	0.675	0.617	0.624	4.718 x10 ⁻¹
180	0.212	0.224	0.222	10.291	10.864	10.791	0.512	0.544	0.548	0.535	6.260 x10 ⁻¹
210	0.175	0.195	0.195	8.485	9.451	9.447	0.422	0.474	0.480	0.458	7.799
240	0.148	0.173	0.165	7.204	8.413	8.015	0.358	0.422	0.407	0.396	9.274
270	0.115	0.141	0.137	5.573	6.840	6.641	0.277	0.343	0.337	0.319	1.142
300	0.096	0.116	0.107	4.655	5.621	5.204	0.232	0.282	0.264	0.259	1.350

ตารางผนวกที่ 15 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/4)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.404	0.412	0.413	19.621	20.005	20.029	1.000	1.000	1.000	1.000	6.829x10 ⁻⁷
30	0.288	0.283	0.283	13.956	13.733	13.723	0.711	0.686	0.685	0.694	3.548 x10 ⁻¹
60	0.223	0.192	0.188	10.845	9.330	9.117	0.553	0.466	0.455	0.491	7.105 x10 ⁻¹
90	0.128	0.116	0.114	6.233	5.617	5.529	0.318	0.281	0.276	0.291	1.233
120	0.084	0.072	0.066	4.068	3.481	3.194	0.207	0.174	0.159	0.180	1.713
150	0.048	0.039	0.034	2.350	1.869	1.655	0.120	0.093	0.083	0.099	2.317
180	0.027	0.018	0.015	1.301	0.869	0.718	0.066	0.043	0.036	0.049	3.025
210	0.014	0.011	0.007	0.670	0.519	0.359	0.034	0.026	0.018	0.026	3.649
240	0.007	0.006	0.004	0.320	0.267	0.199	0.016	0.013	0.010	0.013	4.327
270	0.004	0.001	0.002	0.184	0.058	0.073	0.009	0.003	0.004	0.005	5.237
300	0.004	0.002	0.003	0.180	0.073	0.141	0.009	0.004	0.007	0.007	5.020

ตารางผนวกที่ 16 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/2)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.416	0.413	0.416	20.204	20.058	20.189	1.000	1.000	1.000	1.000	-5.492x10 ⁻⁸
30	0.290	0.275	0.313	14.058	13.364	15.180	0.696	0.666	0.752	0.705	3.501x10 ⁻¹
60	0.204	0.182	0.219	9.913	8.845	10.650	0.491	0.441	0.528	0.486	7.208x10 ⁻¹
90	0.123	0.089	0.145	5.981	4.335	7.029	0.296	0.216	0.348	0.287	1.249
120	0.070	0.058	0.091	3.379	2.825	4.432	0.167	0.141	0.220	0.176	1.738
150	0.033	0.040	0.054	1.602	1.932	2.617	0.079	0.096	0.130	0.102	2.285
180	0.015	0.023	0.027	0.733	1.136	1.320	0.036	0.057	0.065	0.053	2.942
210	0.007	0.013	0.013	0.320	0.621	0.617	0.016	0.031	0.031	0.026	3.658
240	0.006	0.008	0.007	0.282	0.383	0.345	0.014	0.019	0.017	0.017	4.092
270	0.002	0.004	0.005	0.092	0.214	0.218	0.005	0.011	0.011	0.009	4.747
300	0.001	0.004	0.004	0.039	0.175	0.189	0.002	0.009	0.009	0.007	5.010

ตารางผนวกที่ 17 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (1/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.412	0.422	0.413	20.010	20.471	20.063	1.000	1.000	1.000	1.000	-4.058x10 ⁻⁹
30	0.307	0.298	0.310	14.879	14.447	15.049	0.744	0.706	0.750	0.733	3.105 x10 ⁻¹
60	0.224	0.217	0.222	10.883	10.553	10.777	0.544	0.516	0.537	0.532	6.307 x10 ⁻¹
90	0.146	0.153	0.149	7.063	7.413	7.223	0.353	0.362	0.360	0.358	1.026
120	0.083	0.097	0.086	4.044	4.694	4.180	0.202	0.229	0.208	0.213	1.545
150	0.041	0.063	0.041	1.985	3.039	1.981	0.099	0.148	0.099	0.115	2.159
180	0.018	0.043	0.019	0.874	2.073	0.913	0.044	0.101	0.045	0.063	2.757
210	0.008	0.023	0.008	0.369	1.117	0.374	0.018	0.055	0.019	0.031	3.489
240	0.003	0.014	0.004	0.160	0.684	0.184	0.008	0.033	0.009	0.017	4.082
270	0.001	0.007	0.006	0.063	0.354	0.306	0.003	0.017	0.015	0.012	4.431
300	0.001	0.004	0.001	0.068	0.194	0.068	0.003	0.009	0.003	0.005	5.217

ตารางผนวกที่ 18 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (2/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.415	0.418	0.408	20.165	20.296	19.825	1.000	1.000	1.000	1.000	3.557x10 ⁻⁸
30	0.333	0.322	0.319	16.184	15.646	15.481	0.803	0.771	0.781	0.785	2.424x10 ⁻¹
60	0.259	0.231	0.231	12.592	11.233	11.233	0.624	0.553	0.567	0.582	5.421x10 ⁻¹
90	0.188	0.159	0.149	9.121	7.704	7.223	0.452	0.380	0.364	0.399	9.194x10 ⁻¹
120	0.130	0.099	0.083	6.301	4.782	4.024	0.312	0.236	0.203	0.250	1.385
150	0.087	0.058	0.047	4.223	2.801	2.282	0.209	0.138	0.115	0.154	1.870
180	0.050	0.033	0.025	2.403	1.578	1.194	0.119	0.078	0.060	0.086	2.457
210	0.026	0.020	0.011	1.248	0.951	0.553	0.062	0.047	0.028	0.046	3.089
240	0.012	0.017	0.005	0.563	0.835	0.252	0.028	0.041	0.013	0.027	3.602
270	0.005	0.007	0.002	0.223	0.325	0.092	0.011	0.016	0.005	0.011	4.541
300	0.002	0.003	0.001	0.083	0.121	0.039	0.004	0.006	0.002	0.004	5.519

ตารางผนวกที่ 19 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (3/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.414	0.411	0.424	20.112	19.961	20.602	1.000	1.000	1.000	1.000	4.636x10 ⁻⁸
30	0.359	0.362	0.331	17.422	17.587	16.083	0.866	0.881	0.781	0.843	1.712x10 ⁻¹
60	0.285	0.308	0.253	13.816	14.932	12.296	0.687	0.748	0.597	0.677	3.897x10 ⁻¹
90	0.218	0.250	0.177	10.587	12.131	8.578	0.526	0.608	0.416	0.517	6.600x10 ⁻¹
120	0.160	0.191	0.101	7.757	9.277	4.917	0.386	0.465	0.239	0.363	1.013
150	0.106	0.140	0.060	5.155	6.786	2.908	0.256	0.340	0.141	0.246	1.403
180	0.061	0.093	0.030	2.947	4.524	1.437	0.147	0.227	0.070	0.148	1.913
210	0.031	0.053	0.015	1.524	2.587	0.738	0.076	0.130	0.036	0.080	2.521
240	0.016	0.030	0.007	0.757	1.471	0.359	0.038	0.074	0.017	0.043	3.148
270	0.006	0.017	0.003	0.301	0.811	0.131	0.015	0.041	0.006	0.021	3.880
300	0.003	0.008	0.001	0.131	0.374	0.053	0.007	0.019	0.003	0.009	4.680

ตารางผนวกที่ 20 ผลการทดสอบการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ Brij 35/TTIP (4/1)

Degrading time (min)	Abs at λ_{\max} 430 nm			Concentration (ppm)			Relative concentration (C/C ₀)				
	Abs ₁	Abs ₂	Abs ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁ /C ₀	C ₂ /C ₀	C ₃ /C ₀	(C/C ₀) _{ave}	-ln(C/C ₀)
ก่อนฉายแสง	0.419	0.415	0.418	20.345	20.160	20.291	1.000	1.000	1.000	1.000	5.498x10 ⁻⁷
30	0.367	0.373	0.372	17.806	18.102	18.063	0.875	0.898	0.890	0.888	1.190x10 ⁻¹
60	0.330	0.337	0.328	16.000	16.374	15.922	0.768	0.812	0.785	0.794	2.301x10 ⁻¹
90	0.278	0.295	0.282	13.476	14.316	13.709	0.662	0.710	0.676	0.683	3.817x10 ⁻¹
120	0.238	0.259	0.236	11.549	12.563	11.432	0.568	0.623	0.563	0.585	5.366x10 ⁻¹
150	0.189	0.224	0.186	9.150	10.879	9.034	0.450	0.540	0.445	0.478	7.377x10 ⁻¹
180	0.151	0.182	0.141	7.316	8.850	6.845	0.360	0.439	0.337	0.379	9.712x10 ⁻¹
210	0.114	0.145	0.102	5.534	7.034	4.927	0.272	0.349	0.243	0.288	1.245
240	0.081	0.110	0.064	3.927	5.340	3.117	0.193	0.265	0.154	0.204	1.590
270	0.054	0.078	0.037	2.621	3.786	1.806	0.129	0.188	0.089	0.135	2.001
300	0.032	0.048	0.018	1.568	2.311	0.854	0.077	0.115	0.042	0.078	2.552

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายราชัน เลิศพยัคฆรัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 มีนาคม 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(เคมี) มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตระดับปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

