



การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และ
เติมฟลูออรีนบนพื้นผิวสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

โดย

นางสาว จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และ
เติมฟลูออรีนบนพื้นผิวสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

โดย

นางสาว จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



APPLICATION OF COATED TITANIUM DIOXIDE ON ACTIVATED
CARBON UNDER SURFACE FLUORINATION FOR
WASTEWATER TREATMENT

BY

MISS JANJIRA SIVAPATARNKUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE (PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2015

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSIT

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาว จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และ
เติมฟลูออรีนบนพื้นผิวสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

เมื่อ วันที่ 20 เมษายน พ.ศ.2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. กมล เอี่ยมพนากิจ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล เอี่ยมพนากิจ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. สายัณห์ ผุควัฒน์

(อาจารย์ ดร.สายัณห์ ผุควัฒน์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ

(อาจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. นิรันดร์ วิทิตอนันต์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์)

คณบดี

ดร. ปกรณ์ เสริมสุข

(รองศาสตราจารย์ ปกรณ์ เสริมสุข)

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์
และเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

ชื่อผู้เขียน

นางสาว จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.สายัณห์ ผุ้ตวัฒน์

ปีการศึกษา

2558

บทคัดย่อ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เตรียมจากเทคนิคโซล-เจลและเกรดทางการค้าที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและแบบรูไทล์ TiO_2 เติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิว (F-TiO_2) ทำโดยการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2 ลงบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon : AC) ซึ่งในการเตรียม TiO_2 เคลือบลงบน AC (TiO_2/AC) และ F-TiO_2 เคลือบลงบน AC (F-TiO_2) จะศึกษาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium tetra-isopropoxide : TTIP) ต่อ 2-โพรพานอล (2-propanal : 2PP) ของ 1:5 1:15 และ 1:30 และปรับค่า pH ด้วย HCl เท่ากับ 2 ผลของจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบของ 1 3 และ 5 รอบ และเวลาในการจุ่มเคลือบของ 1 5 และ 10 min. พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ TTIP:2-PP เท่ากับ 1:30 pH เท่ากับ 2 จุ่มเคลือบลงบน AC จำนวน 1 รอบและเวลาจุ่มเคลือบ 10 min. โดยหลังจากจุ่มเคลือบจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 hr. โดยเงื่อนไขในการเคลือบมีผลต่อขนาดของเกรน โครงสร้างระดับจุลภาค ลักษณะทางพื้นผิว ความหนา การกระจายตัวและความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง ซึ่ง TiO_2 และ TiO_2/AC มีเกรนลักษณะกลม ส่วน F-TiO_2 มีการก่อตัวในลักษณะเส้นใยนาโน ในการทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงในการจางสีเมทิลีนบลู (Methylene Blue : MB) และการจางสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่า ใช้ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ 10 g ต่อปริมาณสารละลาย MB 150 ml สามารถจางสีของ MB จนใสไม่มีสีได้ในเวลาเพียง 5 min. เมื่อนำ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ 500 g ต่อ 1 ใบพัด มาประกอบร่วมกับกังหันน้ำซึ่งใช้ใบพัดทั้งหมด 24 ใบ มาบำบัดน้ำเสียจาก

โรงงานอุตสาหกรรมบรรจุในอ่างปริมาตร 30 L พบว่าภายใต้การฉายแสง UV ที่เวลา 30 hr. มีความสามารถในการจางสีได้ดีกว่าโดยใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่ากังหันที่ประกอบไปด้วยใบพัดที่เคลือบ TiO_2 และกำจัดสารอินทรีย์ดีกว่าที่ระบบโรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันโดยใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่า ตัวอย่างที่ให้ผลการจางสีที่ดีที่สุดคือ AC แบบผสมผสานกับ F- TiO_2 โดยให้ค่า $\tau = 1.086$

คำสำคัญ : TiO_2 F- TiO_2 การเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิว ถ่านกัมมันต์ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



Thesis Title	Application of Coated Titanium Dioxide on Activated Carbon under Surface Fluorination for Wastewater Treatment
Author	Miss Janjira Sivapatarnkun
Degree	Master Degree of Science (Physics)
Major Field/Faculty/University	Department of Physics Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Dr. Sayan Pudwat
Academic Years	2015

ABSTRACT

Titanium dioxide (TiO_2) were prepared by Sol-Gel technique and commercial grade with anatase and rutile phase. F- TiO_2 were prepared by surface fluorination under immersion in NaF solution. In addition, TiO_2 and F- TiO_2 were coated on activated carbon (AC) that were prepared by Sol-Gel method under condition of the titanium tetraisopropoxide (TTIP) to 2-propanol (2-PP) ratio of 1:5 1:15 and 1:30 and used hydrochloric acid (HCl) for adjusting the pH of 2, number of coating of 1 3 and 5 cycles and coating time of 1 5 and 10 min. After coating, the samples were annealed at temperature of 400 °C. The optimum condition sample was dipped into the former sol-gel of 1 cycle with 10 min prepared time under TTIP: 2-PP ratio of 1:30 and pH of 2. The effect of prepared condition on grain size, microstructure, surface morphology, thickness, distribution and photocatalytic activity were investigated. Surface morphology of TiO_2 and TiO_2/AC formed grain as knobby shape while F- TiO_2/AC formed nano-fiber. Photocatalytic Activity that observed by MB-decolorization with various condition of F- TiO_2/AC . Under the sample to MB solution (0.05 mmol) ratio of 10g per 150 ml, the MB solution changed to be the colorless solution after treated time of 5 min. F- TiO_2/AC of 500 g per 1 paddle that used to produced of 24 paddles of water wheel for treatment wastewater of 30 L. Under UV irradiation time

of 30 hr, F-TiO₂/AC efficiency was better than TiO₂ coated paddles of water wheel and decolorization were better than efficiency under present treatment-system of textile industry. The powder of AC with F-TiO₂ showed the greatest decolorization with the τ of 1.086.

Keywords: TiO₂, F-TiO₂, Activated carbon, Surface Fluorination, Photocatalytic Activity.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จตามความหวังของผู้เขียนได้ เนื่องมาจากความเมตตากรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาที่มีพระคุณยิ่งขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สายัณห์ ผุฒวัฒน์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาและเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำทางวิชาการ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล เอี่ยมพนากิจ อาจารย์ ดร.ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและให้แนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ขนิษฐา ทหัยสมิทธิ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชา สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยาที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังเอื้อเฟื้อเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และสถานที่ทำงาน วิทยานิพนธ์และขอบคุณนางสาว รุ่งทิพย์ ขาดิสวัสดิ์เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำภาควิชาฟิสิกส์ที่คอยติดต่อประสานงานให้ความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนผู้ช่วยนักวิจัยในการทำงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2556 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวที่สนับสนุนด้านการเรียนและคอยให้กำลังใจที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องน้องพี่ผู้เคยร่วมงานที่เข้าใจและช่วยเหลือผู้เขียนในการเรียนและการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านและมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งปวงให้แก่ผู้เขียน ประโยชน์ใดอันใดที่ได้จากการศึกษารั้งนี้ผู้เขียนขอมอบแต่บิดามารดาครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมถึงผู้ที่นำผลการศึกษาไปต่อยอดพัฒนาให้เกิดประโยชน์แก่สาธารณชนต่อไป

นางสาว จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

2558

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(12)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	6
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	8
2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO ₂	11
2.4 กระบวนการยัดเกาะที่ผิวหรือกระบวนการดูดซับที่ผิว	13
2.5 กลไกการดูดซับ	14
2.6 ถ่านกัมมันต์	14
2.6.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์	15
2.7 เมทิลีนบลู (methylene blue)	17
2.8 กระบวนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคโซล-เจลและ	
กระบวนการเคลือบแบบจุ่มเคลือบ	17
2.8.1 การเกิดเจล	20
2.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล	20
2.8.3 การเตรียมโซล-เจล	21
2.8.4 การเคลือบแบบจุ่มเคลือบ	22
2.8.5 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating)	24

2.9 การเติมฟลูออรีนบนพื้นผิว TiO_2 (fluorination on surface of TiO_2)	25
2.10 การทบทวนวรรณกรรมสารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	25
2.10.1 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2 โดยเทคนิคโซล-เจล	26
2.10.2 การวิเคราะห์ผิวเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2	29
2.10.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย	30
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	
3.1 การเตรียม TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	32
3.2 การตรวจวัดและการวิเคราะห์	32
3.3 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ	34
3.3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ในการเตรียมผิวเคลือบ และการตรวจสอบ	34
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียม	35
3.4 การเตรียมตัวอย่าง	36
3.4.1 การเตรียมโซล-เจล	37
3.4.2 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2 จากโซล-เจลบน AC และแผ่นสแตนเลส	38
3.4.3 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2 เกรดทางการค้า ลงบน AC	41
3.4.4 การเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2 และ TiO_2/AC	42
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะและความสามารถของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	43
3.5.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของ TiO_2 F-TiO_2 TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	43
3.5.2 ยูวี-วิสซิเบิล สเปกโตรสโคปี	43
3.5.3 การศึกษาความสามารถของกระบวนการเร่ง	

ปฏิกิริยาแสงของ TiO_2 F- TiO_2 TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC	44
3.6 การออกแบบและสร้างกังหันน้ำ	45
3.7 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	48
4.1 การศึกษา TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC	48
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC	58
4.1.2 ความสามารถในการจางสี MB ของ TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC	59
4.1.3 ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมของ TiO_2 และ F- TiO_2/AC	63
4.1.4 ความสามารถในการจางสี MB ของ TiO_2 เกรดทางการค้าและ AC แบบผง	69
4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอของกังหันน้ำ TiO_2 และ F- TiO_2/AC	73
4.2.1 คุณลักษณะของน้ำเสีย	74
4.2.2 การบำบัดน้ำด้วยกังหันที่มีส่วนประกอบ ของ TiO_2 และ F- TiO_2/AC	75
4.2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกังหันที่เตรียม จากการเคลือบ TiO_2 และแผ่นไบพัต F- TiO_2/AC	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการทดลอง	80
5.1.1 การเตรียม TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC	80
5.1.2 การออกแบบกังหันน้ำ	81
5.1.3 การเตรียมไบพัตกังหันน้ำ	82
5.1.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจาก	

โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	
ประวัติผู้เขียน	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
2.1 สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของ TiO_2 เฟสอนาเทส	9
2.2 สมบัติทางกายภาพของ TiO_2 เฟสรูไทล์	10
2.3 สมบัติทางกายภาพของ TiO_2 เฟสบุรคไคท์	10
2.4 สมบัติของสารกึ่งตัวนำ	11
2.5 หมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการโซล-เจล	19
3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ในการเตรียมผิวเคลือบและ การตรวจสอบ	34
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่าง	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะ	35
4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดรูพรุน ขนาดอนุภาค และขนาดเส้นใย ค่าคงที่เวลา (τ) ของ AC TiO_2 /AC และ F- TiO_2 /AC ตามเงื่อนไขอัตราส่วนของ TTIP:2PP	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยด้วยแสงของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของ TiO_2	8
2.3 การดูดซับทางกายภาพ	14
2.4 แบบจำลองโครงสร้างผสมของถ่านกัมมันต์และการดูดซับ สารอินทรีย์	16
2.5 แบบจำลองกลไกการย่อยสลายสารสีโดย TiO_2 บนรูพรุน ของ AC	17
2.6 โครงสร้างเมทิลลีนบลู	17
2.7 การเปลี่ยนสถานะจาก“โซล”กลายเป็น“เจล”	
2.8 การโตของโพลิเมอร์และการเกิดเจล	
(a) สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	
(b) สภาวะที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	21
2.9 กระบวนการเตรียมโซล-เจล	22
2.10 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบกะ	
(a) Immersion (b) Start Up	
(c) Deposition and Drainage	
(d) Evaporation (e) Drainage	23
2.11 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง	24
3.1 เงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาการย่อยสลายของ MB	33
3.2 เงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างสำหรับการบำบัดน้ำเสีย MB	33
3.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV 1100	36
3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง FE-SEM	36
3.5 ขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล	37
3.6 การเคลือบผิวแบบเคลือบจุ่ม TiO_2/AC	38
3.7 ขั้นตอนการเตรียมผิวเคลือบ TiO_2/AC	39
3.8 การเคลือบผิวแบบเคลือบจุ่ม TiO_2/AC Powder	40

3.9 การเคลือบผิวแบบเคลือบ TiO_2 เกรดทางการค้า/AC	41
3.10 ขั้นตอนการเติมฟลูออรีนลงบน TiO_2/AC เพื่อสร้างตัวอย่าง $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	42
3.11 กังหันน้ำและการติดตั้ง	
(a) กังหันน้ำชนิดเคลือบ TiO_2	
(b) กังหันน้ำที่ประกอบด้วยใบพัด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	
(c) การติดตั้งสำหรับบำบัดน้ำเสียของ AC	45
3.12 การประกอบกังหันน้ำที่ประกอบด้วยใบพัด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	46
3.13 น้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอจากโรงงานจสสธีย จำกัด	47
4.1 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่าง ลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่กำลังขยาย 5,000 และ 100,000 เท่า จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบ เวลาในการจุ่มเคลือบที่ 10 min. ค่า pH ในตัวอย่าง F-TiO_2 คือ 2	50
4.2 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่าง ลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 จำนวนรอบในการ เคลือบ 1 รอบเวลาในการจุ่มเคลือบที่ 1 5 และ 10 min. ตามลำดับ ค่า pH ในตัวอย่าง F-TiO_2 คือ 2	51
4.3 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่าง ลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ที่เวลาในการเคลือบ 1 min. จำนวน รอบในการเคลือบที่ 1 3 และ 5 รอบ ค่า pH ในตัวอย่าง F-TiO_2 คือ 2	52
4.4 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM ที่กำลังขยาย 5,000 และ 100,000 เท่า เปรียบเทียบความแตกต่างลักษณะพื้นผิว ของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่เตรียมด้วยค่า pH ที่แตกต่างกัน คือที่ pH=2 และ pH= 4 ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบเวลาในการเคลือบ 10 min.	53
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นตัวเร่ง	

- ปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30
เวลาฉายแสง UVA ที่ 5 min.เปรียบเทียบกับ Pure MB
และ AC 54
- 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี TiO_2/AC และ
F- TiO_2/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง ที่อัตราส่วน
TTIP:2PP 1:30 เวลาฉายแสง UVA ที่ 5 min.
เปรียบเทียบกับ Pure MB และ AC 55
- 4.7 ภาพถ่ายสารละลาย MB เปรียบเทียบการจางสีระหว่าง
 TiO_2/AC (1:5) TiO_2/AC (1:30) และ F- TiO_2/AC (1:30)
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาในการฉายแสงต่างกัน
คือ 1 3 และ 5 min. 56
- 4.8 การเปรียบเทียบการดูดกลืนที่เวลาต่างๆของ MB หลัง
การฉายแสงตลอดช่วงเวลา 5 min ภายใต้การเร่งปฏิกิริยา
ด้วยแสงของ TiO_2/AC ที่อัตราส่วน TTIP: 2PP 1:5 1:15
และ 1:30 เปรียบเทียบ กับ AC 57
- 4.9 การเปรียบเทียบการดูดกลืนที่เวลาต่างๆของ MB หลังการ
ฉายแสงตลอดช่วงเวลา 5 min ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง
ของ F- TiO_2/AC ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30
เปรียบเทียบกับ AC 58
- 4.10 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสงช่วงเวลา
5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ F- TiO_2/AC
เมื่อเปลี่ยนค่าเวลาในการจุ่มเคลือบที่ 1 5 และ 10 min.
ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ค่า pH = 2 เปรียบเทียบกับ AC 60
- 4.11 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสงช่วงเวลา
5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ F- TiO_2/AC
เมื่อเปลี่ยนจำนวนรอบในการเคลือบ ที่ 1 3 และ 5 รอบ
ค่า pH = 2 เปรียบเทียบกับ AC 61

- 4.12 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสง
 ช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ
 F-TiO₂/AC เมื่อเปลี่ยนค่า pH = 2 และ pH = 4
 ที่เวลาในการจุ่มเคลือบ 10 min. จำนวนรอบในการเคลือบ
 1 รอบ ที่อัตราส่วน TTIP: 2PP 1:30 เปรียบเทียบกับ AC 62
- 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี TiO₂/AC เป็นตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาด้วยแสงที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30
 เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลังถูกฉายแสง
 UV (a) ที่เวลาฉายแสง 1 hr. (b) ที่เวลาฉายแสง 6 hr. 64
- 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี F-TiO₂/AC เป็นตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาด้วยแสงที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30
 ที่เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลังถูก
 ฉายแสง (a) ที่เวลาฉายแสง 1 hr. (b) ที่เวลาฉายแสง 6 hr. 65
- 4.15 ภาพถ่าย (a) น้ำเสียจริงจากโรงงาน
 ภาพถ่าย (b) น้ำเสียที่บำบัดด้วย F-TiO₂/AC เป็นเวลา 6 hr.
- 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี F-TiO₂/AC เป็นตัวเร่ง
 ปฏิกิริยาด้วยแสงที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ที่เวลาฉายแสง
 UV ที่เวลาต่างๆตลอด 6 hr. เปรียบเทียบกับ Pure
 Wastewater และ AC
- 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสียเปรียบเทียบกับ TiO₂/AC และ
 F-TiO₂/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP
 1:30 เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลัง
 ถูกฉายแสง UV (a) 1 hr. (b) 6 hr. 67
- 4.18 ความเข้มข้นของ MB หลังการฉายแสงภายใต้การเร่งปฏิกิริยา
 ด้วยแสงของ AC Bulk AC Powder Rutile/AC Bulk
 F-Rutile/AC Bulk Anatase/AC Bulk F-Anatase/AC
 Bulk TiO₂ /AC Bulk F-TiO₂ /AC Bulk Rutile/AC
 Powder F-Rutile/AC Powder Anatase/AC Powder
 F-Anatase/AC Powder TiO₂ /AC Powder และ
 F-TiO₂ /AC Powder ที่เวลาฉายแสงต่างๆ

- a) เปรียบเทียบ TiO_2 /AC Bulk และ F- TiO_2 /AC Bulk ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.
- b) เปรียบเทียบ AC Bulk และ AC Powder ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.
- c) เปรียบเทียบ TiO_2 เกรดทางการค้าและ TiO_2 ที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจลร่วมกับ AC Bulk และ AC Powder ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.
- d) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี TiO_2 /AC Bulk TiO_2 /AC Powder F- TiO_2 /AC Bulk F- TiO_2 /AC Powder เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.
- e) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี Rutile/AC Bulk F-Rutile/AC Bulk Anatase/AC Bulk F-Anatase/AC Bulk TiO_2 /AC Bulk และ F- TiO_2 /AC Bulk เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.
- f) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี Rutile/AC Powder F-Rutile/AC Powder Anatase/AC Powder F-Anatase/AC Powder TiO_2 /AC Powder และ F- TiO_2 /AC Powder เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min. 68
- 4.19 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานจสจล จำกัด 69
- 4.20 ลักษณะน้ำเสียจากระบบหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอของโรงงานจสจล จำกัด 72
- 4.21 กังหันน้ำและการติดตั้ง
- (a) กังหันน้ำชนิดเคลือบ TiO_2
- (b) กังหันน้ำที่ประกอบด้วยใบพัด F- TiO_2 /AC
- (c) การติดตั้งสำหรับบำบัดน้ำเสีย 74

- 4.22 ภาพถ่ายหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยกังหันน้ำที่ใบพัดมี
ส่วนประกอบของ TiO_2 และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่เวลาต่างๆ
หลังจากผ่านการบำบัดเป็นเวลาทั้งหมด 30 hr. 76
- 4.23 ภาพถ่ายหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยกังหันน้ำที่ใบพัดมี
ส่วนประกอบของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสีย
กับน้ำเสียขาออกจากโรงงานที่เวลา 24 hr. 77



รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์
F-TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว
AC	ถ่านกัมมันต์
AC Bulk	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด
AC Powder	ถ่านกัมมันต์แบบผง
TiO ₂ /AC	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์
F-TiO ₂ /AC	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์และผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว
AC Bulk TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์แบบเม็ด
AC Bulk F-TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์แบบเม็ดและผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว
AC Powder TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์แบบผง
AC Powder F-TiO ₂	ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบถ่านกัมมันต์แบบผงและผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว
AC Bulk Rutile	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ 100%
AC Bulk F-Rutile	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ 100% และผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว
AC Bulk Anatase	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส 100%
AC Bulk F-Anatase	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส 100% และผ่านการเจือฟลูออรีนที่ผิว

AC Powder Rutile	ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ 100%
AC Powder F-Rutile	ถ่านกัมมันต์แบบผงผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ 100% และผ่านการ เจือฟลูออรีนที่ผิว
AC Powder Anatase	ถ่านกัมมันต์แบบผงผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส 100%
AC Powder F-Anatase	ถ่านกัมมันต์แบบผงผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส 100% และผ่านการ เจือฟลูออรีนที่ผิว
2pp (2-propanal)	2-โพรพานอล
NaF	โซเดียมฟลูออไรด์
HCl	กรดไฮโดรคลอริก
Photocatalysis process	กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
pH	ความเป็นกรด – เบส
MB (Methylene blue)	เมทิลีนบลู
FE-SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TTIP (Titanium tetraisopropoxide)	ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์
UV (Ultra violet)	แสงเหนือม่วง
UV-Vis	เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคป
Dye ^{•+}	สีย้อมในสถานะถูกกระตุ้นด้วยแสง
e ⁻	อิเล็กตรอน
h ⁺	โฮล
F ⁻	ฟลูออไรด์ไอออน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) นิยมนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจาก TiO_2 ซึ่งเมื่ออยู่ในบรรยากาศของน้ำและแสงอัลตราไวโอเลต (UV) แม้ในความเข้มข้นภายใต้แสงอาทิตย์จะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าสารเคมีตัวอื่น นอกจากนี้ TiO_2 มีสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อีกทั้งเป็นวัสดุที่ไม่มีพิษและมีความเสถียรสูง สมบัติที่กำลังนิยมนำมาศึกษาเป็นอย่างมากคือ สมบัติทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning property) ซึ่งประกอบด้วยสมบัติ 2 อย่าง ได้แก่ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalytic activity) และสภาพชอบน้ำเหนี่ยวนำด้วยแสง (photoinduced hydrophilicity) ซึ่งสมบัติเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เช่น การฟอกอากาศ กระจกอาคาร และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น อธิบายโดยสังเขปได้ว่า เมื่อวัสดุที่ถูกเคลือบด้วย TiO_2 อยู่ภายใต้แสงดวงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟที่ให้แสง UV อ่อนๆ ทำให้วัสดุที่ถูกเคลือบสามารถทำความสะอาดตัวเองได้หมายถึงวัสดุสามารถทำลายเชื้อที่ก่อให้เกิดโรคได้และย่อยสลายคลาบสกปรกหรือสารอินทรีย์ที่มาจับเกาะให้แตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงจนและในที่สุดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะน้ำเสียที่ถูกผลิตขึ้นโดยโรงงานอุตสาหกรรมและครัวเรือนสร้างปัญหาอย่างมากต่อคุณภาพชีวิต กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลากหลายวิธีการแต่วิธีการที่มีประสิทธิภาพและกำลังได้รับความนิยมในการวิจัย คือ กระบวนการดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon : AC) เนื่องจาก AC มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการดูดซับสูง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลของสีย้อมเกาะติดบนพื้นผิวของ AC มากขึ้น จึงจำเป็นต้องกำจัดโมเลกุลของสีย้อมออกจากผิวของ AC ด้วยวิธีการเผาแต่จะทำให้ต้นทุนในการนำ AC กลับมาใช้ใหม่สูงขึ้นอีกทั้งยังอาจทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ AC ลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงเริ่มมีงานวิจัย TiO_2 มาร่วมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการเร่งของปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้แสง UV และเกิดที่ผิว TiO_2 เมื่อมีการฉายแสง UV ในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับช่องว่างพลังงาน (energy gap : E_g) บน TiO_2 จะทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน (e^-) – โฮล (h^+) โดย e^- บริเวณแถบวาเลนซ์ (valence band) ถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นและเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังแถบคอนดักชัน (conduction band) และเกิด h^+ ซึ่ง

เป็นช่องว่างที่ไม่มี e^- ที่แถบวาเลนซ์ h^+ จะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl : OH^-) เพื่อทำให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ ($OH^\bullet$) ที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียถูกสลายตัวเป็นโมเลกุลเล็กลง ในขณะที่ e^- สามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักบางชนิดที่ละลายอยู่ในน้ำเสียได้ด้วยโดยการรักษาความสมดุลย์ทางไฟฟ้า (electro neutrality) การผสมผสานระหว่าง TiO_2 และ AC จึงควรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในการที่จะกำจัดสารอินทรีย์มากกว่าสาร TiO_2 เพียงอย่างเดียว โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า AC จะมีส่วนช่วยอย่างมากในการดูดซับสารอินทรีย์จึงช่วยให้ TiO_2 ทำงานดีขึ้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นจึงเหมาะแก่การนำมาย่อยสลายสารเจือปนในน้ำเสีย ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ลงบน AC (TiO_2/AC) ซึ่งเป็นตัวรองรับที่มีความสามารถในการดูดซับสูงจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพราะมีทั้งการดูดซับสารอินทรีย์และย่อยสลายอีกทั้งตัวดูดซับนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกด้วย [1,2]

เพื่อที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์และการเพิ่มอัตราการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิว (surface fluorination) ของ TiO_2 ($F-TiO_2$) เนื่องจากฟลูออรีนนี้นั้นมีสมบัติที่สามารถรับและจ่าย e^- ได้ดี ส่งผลที่สำคัญคือเกิด $OH^\bullet$ มากกว่า TiO_2 ที่ไม่ได้เติมฟลูออรีน หลักการนี้จึงเป็นกระบวนการที่ช่วยในการเพิ่มอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์มากขึ้น [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการประยุกต์ใช้ AC เคลือบ TiO_2 และเติมฟลูออรีนบนพื้นผิว ($F-TiO_2/AC$) พัฒนาการเคลือบ AC ด้วย TiO_2 ที่เตรียมจากวิธีโซลเจล (sol-gel method) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วน TTIP:2PP จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ เวลาในการจุ่มเคลือบ และ ค่า pH ของสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) โดยศึกษาวิเคราะห์สมบัติลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ทดสอบกระบวนการดูดซับและประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างต้นแบบกักหน้ำที่มีการออกแบบการใช้งานร่วมกับ $F-TiO_2/AC$ ในระดับ Lab Scale เพื่อนำมาทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อพัฒนาไปใช้งานจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของ TiO_2 โดยศึกษา 2 เกรดคือ TiO_2 เกรดทางการค้าและ TiO_2 ที่เกิดจากการเตรียมโดยวิธีโซล-เจลร่วมกับ AC

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินแสงของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

1.2.4 เพื่อพัฒนาและสร้างองค์ความรู้สำหรับการเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2 ลงบน AC เพื่อนำไปประยุกต์ทำกั้นน้ำสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้เทคโนโลยีการเคลือบแบบจุ่ม (dipped coating) โดยเทคนิคโซล-เจล

1.2.5 ออกแบบและสร้างกั้นน้ำที่มี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ และ TiO_2/AC เป็นองค์ประกอบของกั้นน้ำ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สังเคราะห์ TiO_2 ด้วยเทคนิคโซล-เจล

1.3.2 เตรียม $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

1.3.3 ศึกษาลักษณะสัญญาณของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field emission scanning electron microscope: FESEM)

1.3.4 ทดสอบการสลายตัวเชิงแสงของเมทิลีนบลู (methylene blue: MB) ของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคป (UV-VIS spectroscopy: UV-VIS)

1.3.5 สร้างและออกแบบกั้นน้ำระดับ Lab scale เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สร้างองค์ความรู้ในการเคลือบ TiO_2 ลงบน AC เพื่อการประยุกต์ใช้เป็น Photocatalytic Surface สำหรับบำบัดน้ำเสียและการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือเพิ่มอัตราการเร่งปฏิกิริยาดำเนินแสง เพื่อข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงและการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.4.2 สร้างกั้นน้ำบำบัดน้ำเสียระดับ Lab scale ที่ใช้งานร่วมกับ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1.4.3 นำความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยมาเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1

ขั้นตอนและระยะเวลาในการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ปี 2556			
	ม.ค-มี.ค	เม.ย-มิ.ย	ก.ค-ก.ย	ต.ค-ธ.ค
1. ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง				
การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ				
2. ศึกษาการเตรียม TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ซึ่งมีเกรตทางการค้าและที่เกิดจากการเตรียมโดย Sol-Gel Process ที่เงื่อนไขต่างๆ				
3. เตรียม TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่เงื่อนไขต่างๆ				

แผนการดำเนินงาน	ปี 2557			
	ม.ค-มี.ค	เม.ย-มิ.ย	ก.ค-ก.ย	ต.ค-ธ.ค
4. นำ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงกับ MB ที่เงื่อนไขต่างๆ				
5. นำ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอที่เงื่อนไขต่างๆ				
6. วิเคราะห์สมบัติต่างๆของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่ได้จากการเตรียม - โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม - Photocatalytic Activity				
7. สรุปเงื่อนไขการเตรียม $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$				
แผนการดำเนินงาน	ปี 2558			
	ม.ค-มี.ค	เม.ย-มิ.ย	ก.ค-ก.ย	ต.ค-ธ.ค
การดำเนินงานในห้องปฏิบัติการ				
8. ออกแบบและสร้างกังหันน้ำที่มี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นองค์ประกอบของกังหัน				

แผนการดำเนินงาน	ปี 2558			
	ม.ค-มี.ค	เม.ย-มิ.ย	ก.ค-ก.ย	ต.ค-ธ.ค
9. นำกัณฑ์มาทดสอบประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมสิ่งทอ	→			
10. สรุปผลการทดลองและจัดทำ รายงาน	→			

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

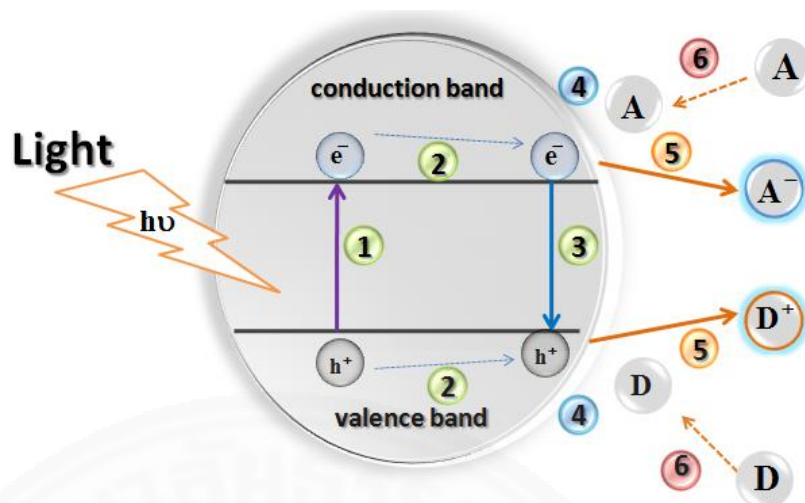
ในงานวิจัยนี้มีข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการดำเนินการวิจัยได้แก่ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กระบวนการยึดเกาะที่ผิวหรือกระบวนการดูดซับที่ผิว และข้อมูลพื้นฐานในการตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalysis) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ซึ่งทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งตัวมันเองต้องใช้แสงเข้าร่วมในการเร่งปฏิกิริยา โดยจะเกิดการกระตุ้นได้เมื่อมีการดูดกลืนแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบสถานะต่าง (heterogeneous photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการย่อยสลายซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นการเร่งปฏิกิริยาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยการกระตุ้นจากแสงซึ่งปฏิกิริยาเกิดบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำจะไปเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้เกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบสถานะต่างจะเกิดขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำสามารถสรุปได้ 5 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.1 คือ

- (1) สารกึ่งตัวนำดูดกลืนแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงาน ทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล $e^- - h^+$ ขึ้น โดยที่ e^- จะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่แถบนำและ h^+ อยู่ที่แถบวาเลนซ์
- (2) คู่อิเล็กตรอน-โฮล ถูกนำสู่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่ผิวเนื่องจากพลังงานที่ได้รับ
- (3) คู่อิเล็กตรอน-โฮล บางส่วนกลับมารวมกันใหม่อีกครั้ง (recombination)
- (4) คู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ผิวดูดจับกับโมเลกุลที่เข้ามาทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน - ปฏิกิริยารีดักชัน
- (5) ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่จะช่วยในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหรือเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [3]



ภาพที่ 2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ

สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดสารที่เจือปนอยู่ในน้ำและในอากาศซึ่งกระบวนการประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือกระบวนการยิดเกาะที่ผิวหรือกระบวนการดูดซับที่ผิวและกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ E_g ของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการสร้างคู่ $e^- - h^+$ ดังสมการ [4]



ซึ่งคู่ $e^- - h^+$ มีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดย e^- ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารอินทรีย์



และ h^+ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไอออนต่างๆ

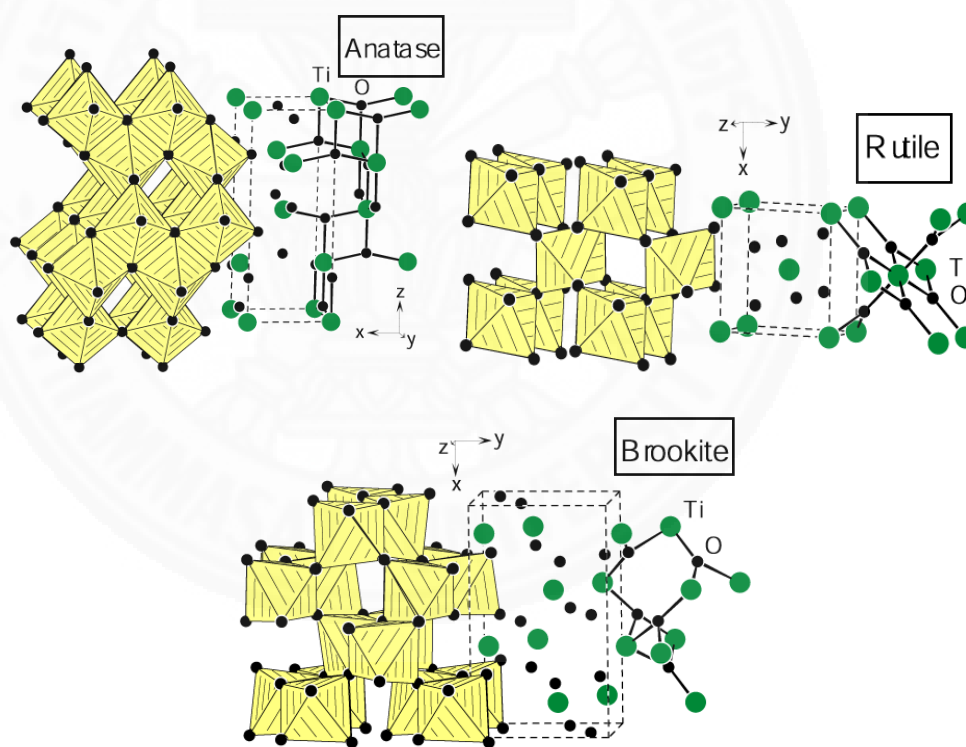


เมื่อ A และ D คือตัวรับ e^- และตัวให้ e^- ตามลำดับ

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ประเภท n-type และเป็นสารเร่งปฏิกิริยาดำแสง TiO_2 ได้ถูกค้นพบก่อนหน้านี้มาหลายทศวรรษ ซึ่งนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง อาหาร และสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น เนื่องจาก TiO_2 ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่ปลอดภัยไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็งและสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่า TiO_2 ไม่ใช่สารพิษ โครงสร้างผลึกพื้นฐานของ TiO_2 สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบดังนี้

1. อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกเตตระโกนอล (tetragonal)
2. รูไทต์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกเตตระโกนอล (tetragonal)
3. บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของ TiO_2 [5]

TiO_2 มีช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกอนาเทส รูไทต์และบรูคไคท์มีค่าเท่ากับ 3.2 eV 3.0 และ ~3.2 eV ตามลำดับ โดย TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส จะมีความสามารถในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทต์ [6] เนื่องจากการกลับมารวมตัวกันใหม่

ของคู่ $e^- - h^+$ เกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทต์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทต์มีค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทต์เป็นที่นิยมนำมาศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทต์ [7] แต่อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรอีกหลายอย่างส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของ TiO_2 ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึก TiO_2 ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์ยังไม่มีการศึกษากันมากนัก สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของ TiO_2 ทั้งสามเฟสแสดงดังตารางที่ 2.1 - 2.3

ตารางที่ 2.1

สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของ TiO_2 เฟสอนาเทส [8]

Material name			Anatase			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			3.7842 (13)	3.7842 (13)	9.5146 (15)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			136.3			
D _x (g/cm ³)			3.89			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	4a	1	0	0	0	0.390 (63)
O	8e	1	0	0	0.2081 (2)	0.613 (90)

ตารางที่ 2.2

สมบัติทางกายภาพของ TiO_2 เฟสรูไทล์ [8]

Material name			Rutile			
Composition			TiO ₂			
System			Tetragonal			
Temperature (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			4.593 (2)	4.593 (2)	2.959 (2)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			62.42			
D _x (g/cm ³)			4.25			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	2a	1	0	0	0	0.42 (6)
O	4e	1	0.3051 (7)	0.3051 (7)	0	0.6 (6)

ตารางที่ 2.3

สมบัติทางกายภาพของ TiO_2 เฟสบรูคไคท์ [8]

Material name			Brooklite			
Composition			TiO ₂			
System			Orthorhombic			
Temperature (°C)			25			
a(Å), b(Å), c(Å)			9.174 (2)	5.449 (2)	5.138 (2)	
α(deg), β(deg), γ(deg)			90	90	90	
Unit cell volume (Å ³)			257			
D _x (g/cm ³)			4.13			
Atom	Site	G	x/a	y/b	z/c	B (Å ²)
Ti	8c	1	0.1289 (1)	0.0972 (1)	0.8628 (1)	0.37 (3)
O1	8c	1	0.0095 (4)	0.0095 (5)	0.1835 (5)	0.46 (6)
O2	8c	1	0.2314 (4)	0.1110 (4)	0.5366 (6)	0.53 (7)

นอกจาก TiO_2 ยังมีสารกึ่งตัวนำอื่นๆที่อาจนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

สมบัติของสารกึ่งตัวนำ [9]

วัสดุ	พลังงานแถบช่องว่าง (eV)	ความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับพลังงานแถบช่องว่าง (nm)
BaTiO_3	3.3	375
CdO	2.1	590
CdS	2.5	497
CdSe	1.7	730
Fe_2O_3	2.2	565
GaAs	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO_2	3.9	318
SrTiO_3	3.4	365
TiO_2	3.2	390
WO_3	2.8	443
ZnO	3.2	390
Zns	3.7	336

2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนิยมใช้สาร TiO_2 ขนาดอนุภาคระดับนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำและมีความเสถียรสูง โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 จะทำงานได้ภายใต้การกระตุ้นของแสงในช่วงแสง UV กล่าวคือ E_g ของสารกึ่งตัวนำ TiO_2 คำนวณหาได้จาก

$E = h\nu$ โดยที่ E คือพลังงานของโฟตอน (อนุภาคของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) เท่ากับค่าคงที่ของ

พลังค์ (Planck's constant) มีค่าประมาณ $6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ และความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

$\nu = \frac{c}{\lambda}$ โดยที่ c คือ อัตราเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าประมาณ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ และ λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

จะได้ $E = h \frac{c}{\lambda}$

$$E = \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{\lambda (\text{nm})}$$

$$E = \frac{19.875 \times 10^{-26} (\text{J} \cdot \text{s})}{\lambda (\text{nm})}$$

โดยที่ $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

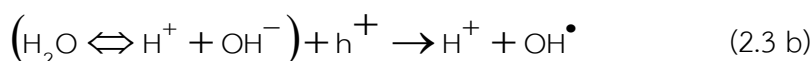
$$\text{ดังนั้น} \quad E_g = \frac{1240 (\text{eV} \cdot \text{nm})}{\lambda (\text{nm})} \quad (2.2)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของแสงและ E_g ของ TiO_2 ในเฟสอนาเทสและรูไทล์มีค่า 3.26 และ 3.05 eV ตามลำดับ เมื่อแสงในช่วง UV ตกกระทบ TiO_2 ซึ่งเป็นช่วงแสงที่มีพลังงานเหมาะสมที่จะไปกระตุ้นให้ e^- ไปอยู่ยังแถบการนำและเกิด h^+ ในแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสิ่งแวดล้อม ในกรณีทั่วไปสำหรับบรรยากาศปกติเมื่อมีแสงเข้าตกกระทบผลึกปฏิกิริยาที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 กับสภาพแวดล้อมที่มีน้ำและออกซิเจนจะเป็นไปตามสมการดังนี้ [10]

เมื่อแสงกระตุ้น TiO_2 จะเกิดปฏิกิริยาส่งตัว $e^- - h^+$



โซลที่เกิดขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น $\text{OH}^\bullet$



อิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\text{O}_2^{\bullet-}$)



$\text{O}_2^{\bullet-}$ ทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{HO}_2^{\bullet}$)



เมื่อ $\text{HO}_2^{\bullet}$ ทำปฏิกิริยากับ $\text{HO}_2^{\bullet}$ จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2)



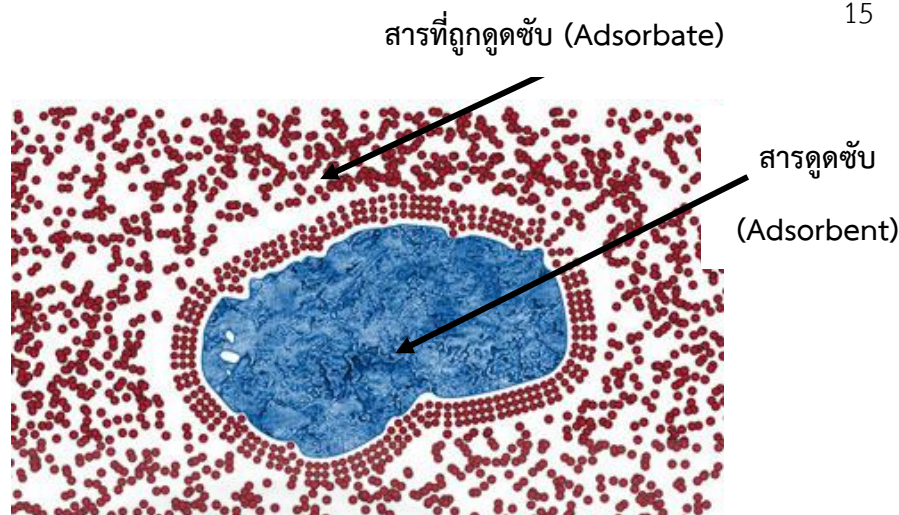
และ $\text{HO}_2^{\bullet}$ ทำปฏิกิริยากับ e^- จะเกิดผลิตภัณฑ์เป็น $\text{OH}^{\bullet}$



โดยทุกระบวนการจะสร้าง $\text{OH}^{\bullet}$ และ $\text{O}_2^{\bullet-}$ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันทั้งสองนี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำต่อไป

2.4 กระบวนการยึดเกาะที่ผิวหรือกระบวนการดูดซับที่ผิว

การดูดซับเป็นความสามารถของสารดูดซับ (adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (adsorbate) ที่อยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 สถานะเช่น ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง และของเหลวกับของเหลวหรือของเหลวกับของแข็ง ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดแบบหลายชั้น (multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้นแต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) ซึ่งแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงยึดที่อ่อนมากและเกิดขึ้นเฉพาะโมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นค่าของแรงแวนเดอร์วาลส์จึงขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโมเลกุลซึ่งมีผลมาจากรูปร่างและขนาดของโมเลกุล ซึ่งการเกิดแวนเดอร์วาลส์สามารถอธิบายด้วยฟิสิกส์ควอนตัมซึ่งกล่าวว่าอะตอมทุกชนิดมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในหลายระดับวงโคจรมีตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงอยู่ทุกขณะซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์แบบชั่วคราวขึ้นสามารถเหนี่ยวนำอะตอมใกล้เคียงให้เกิดไดโพลโมเมนต์ได้และดึงดูดกัน ในที่สุด ซึ่งเป็นการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนจึงเกิดกระบวนการผันกลับได้ง่าย การผันกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การดูดซับทางกายภาพ [11]

2.5 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลวการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะติดต่อกันดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (intraparticle diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับการเกาะติดในระยะที่ 3 จะเกาะติดบนผิวด้วยการดูดซับทางกายภาพ

2.6 ถ่านกัมมันต์

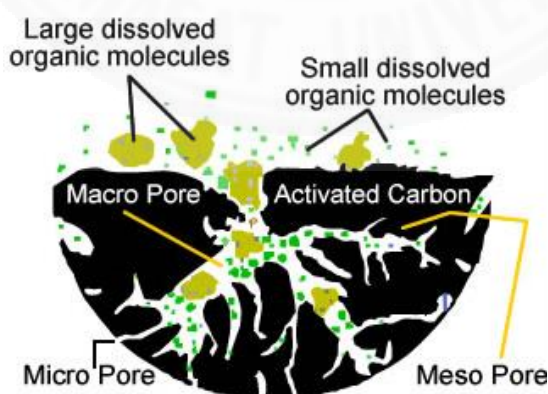
ถ่านกัมมันต์ (AC) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ชนิดหนึ่ง แต่ถูกผลิตขึ้นมาเป็นพิเศษโดยกระบวนการก่อกัมมันต์ (activation) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ AC แตกต่างจากถ่านชนิดอื่น เช่น ถ่านลิกไนต์ ถ่านไม้ และแกรไฟต์ เป็นต้น AC มีความสามารถในการดูดซับสูงอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง ผิวโครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous structure) และมีความไวในการดูดซับสูงโดยที่รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 Å ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูงและมีความจุในการดูดซับ (adsorption capacity) สูงด้วยเช่นกัน การวัดพื้นที่ผิวของ AC ทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูก AC ดูดซับไว้วิธีวัดสมรรถนะของ AC อาจกระทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number)

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของ AC [12] โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (size and surface area) ลักษณะของสารดูดซับค่าความเป็นกรดเบสอุณหภูมิและเวลาในการสัมผัสซึ่งชนิดของ AC ที่ใช้ในการทดลองคือ ชนิดเม็ด I600

2.6.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของ AC จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของ AC อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูพรุนนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอนบางรูพรุนมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่งบางครั้งเป็นรูปตัววี ชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนสามารถจัดจำแนกประเภทของรูพรุนตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ดังนี้ ไมโครพอร์ (micropore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีหรือ Half-width เล็กกว่า 2 nm ($< 20 \text{ \AA}$) เมโซพอร์ (mesopore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีอยู่ในช่วง 2-50 nm (20-500 $\text{\AA}$) แมโครพอร์ (macropore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีใหญ่กว่า 50 nm ($> 500 \text{ \AA}$) [12]

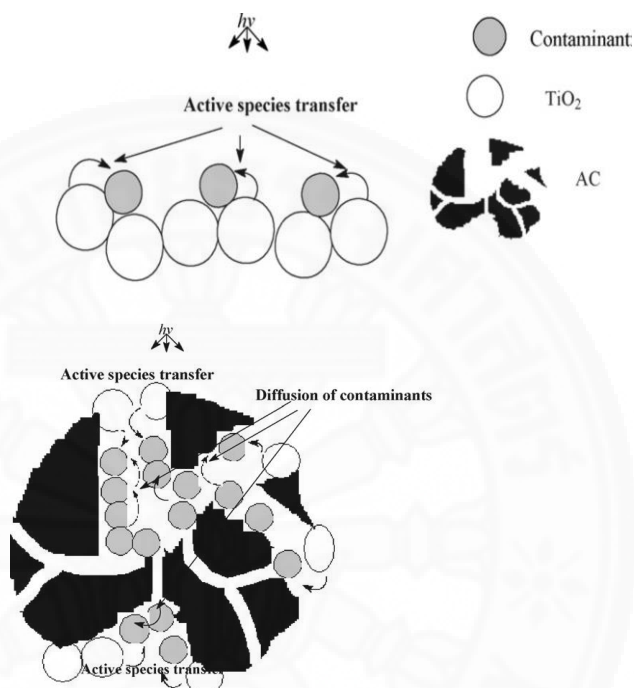
ไมโครพอร์มีความสำคัญอย่างมากในการดูดซับเนื่องจากพื้นที่การดูดซับมากที่สุดทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้น รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่าการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น โครงสร้าง AC ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจายโครงสร้างที่มีแมโครพอร์ มีโซพอร์และไมโครพอร์เรียกว่าโครงสร้างผสม (mixed structure type) ดังภาพที่ 2.4 พบว่าแมโครพอร์เป็นทางเปิดหลักสู่ผิวภายนอกอนุภาคมีโซพอร์เป็นกิ่งออกมาจากแมโครพอร์อีกทีหนึ่ง



ภาพที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างผสมของ AC และการดูดซับสารอินทรีย์ [13]

ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียโดยการดูดซับเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี จึงไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างของสารปนเปื้อนแต่เป็นการย้ายสารปนเปื้อนจากสถานะ

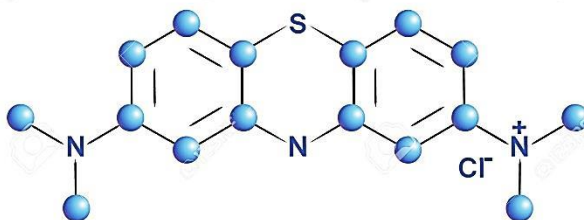
สารละลายเข้าไปในของแข็งเพื่อง่ายในการกำจัดสารปนเปื้อนเท่านั้น ดังนั้นการนำ TiO_2 ที่มีสมบัติการกระตุ้นด้วยแสง (photocatalysis) เมื่อ TiO_2 ถูกแสงทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ และสีที่ละลายอยู่สลายตัว ซึ่งในการประยุกต์ใช้สมบัติการดูดซับของ AC ร่วมกับการกระตุ้นด้วยแสงของ TiO_2 ช่วยทำให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ภาพที่ 2.5 การกลไกของการประยุกต์ใช้ TiO_2 เคลือบบน AC [13]



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองกลไกการย่อยสลายสารสีโดย TiO_2 บนรูพรุนของ AC [13]

2.7 เมทิลีนบลู (methylene blue)

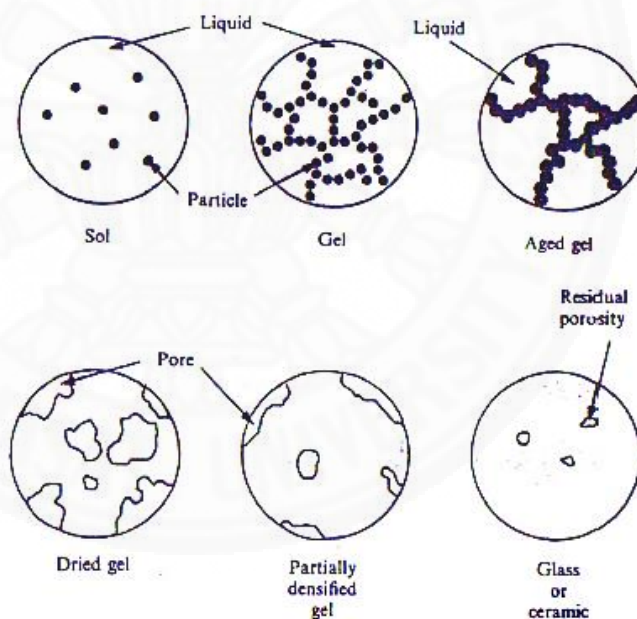
เมทิลีนบลู (MB) เป็นสีเบสิก (basic dye) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งเรียกสีประเภทนี้ว่าสีแคทไอออนิก (cationic dyes) เมื่อมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดมลพิษ นอกจากนี้พิษของ MB อาจทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำและบริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ [14]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้าง MB [14]

2.8 กระบวนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคโซล-เจล และกระบวนการเคลือบแบบจุ่มเคลือบ

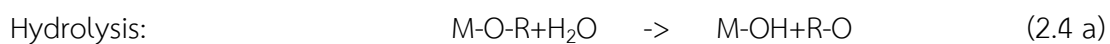
กระบวนการโซล - เจลเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้เตรียมสารเคลือบเพื่อเตรียมชั้นเคลือบ ซึ่งกระบวนการโซล - เจล เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยไปเป็นของแข็งกึ่งเหลวที่เรียกว่า “เจล”



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนสถานะจาก“โซล”กลายเป็น“เจล” [15]

ปฏิกิริยาในกระบวนการโซล - เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นเป็นน้ำ (water condensation) และการควบแน่นเป็นแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ดังสมการด้านล่าง มีปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็น

ต่างของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำกับโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้จะทำให้ โซล - เจล ที่ได้มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน



เมื่อ M แทนโลหะได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ แทนกลุ่มอัลคอกซิล (alkoxyl Group)

สำหรับการเตรียม TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจลเป็นหนึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูก สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และ วัสดุก้อนซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป

การเตรียมอนุภาค TiO_2 ด้วยวิธีโซล-เจล มีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.5 a) และการควบแน่น (สมการที่ 2.5 b และ 2.5 c) ของโลหะอัลคอกไซด์ ซึ่งเกิดการพอลิเมอร์ตัวเกิดเป็นโครงตาข่ายที่เรียกว่า เจล [15]



เมื่อ R คือหมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงหมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้กันมาก เช่น โลหะอัลคอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีและเป็นสารอินทรีย์ที่มักจะมีพันธะกับอะตอมของโลหะ

ตารางที่ 2.5

หมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการโซล-เจล [15]

Alkyl		Alkyl	
Methyl	• CH_3	Methoxy	• OCH_3
Ethyl	• CH_2CH_3	Ethoxy	• OCH_2CH_3
n-propyl	• $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	n-propoxy	• $\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$
n-butyl	• $(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	n-butoxy	• $\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$

Sec-butyl	$H_3C(\bullet C)HCH_2CH_3$	Sec-butoxy	$H_3C(\bullet O)HCH_2CH_3$
iso-butyl	$\bullet CH_2CH(CH_3)_2$	iso-butoxy	$\bullet OCH_2CH(CH_3)_2$
Teet-butyl	$\bullet C(CH_3)_3$	Teet-butoxy	$\bullet OC(CH_3)_3$
Other			
Acetalacetone	$H_3COC(\bullet O)CH(O\bullet)COCH_3$		
Acetate	$\bullet OOCCH_3$		

ทั้งนี้โมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบางส่วนจะทำให้โมเลกุลจำนวน 2 โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันได้โดยปฏิกิริยาควบแน่นเป็นน้ำและแอลกอฮอล์ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องทำให้ได้โมเลกุลที่ประกอบด้วยโลหะที่ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ โดยเรียกระบวนการนี้ว่า “การเกิดโพลิเมอร์ (polymerization)” โดยที่โพลิเมอร์จะเกิดจากการที่โมโนเมอร์จำนวนมากที่เกิดการสร้างพันธะอย่างน้อย 2 พันธะ ซึ่งจำนวนพันธะที่โมโนเมอร์ สามารถรวมตัวได้เรียกว่า ฟังก์ชันนัลลิตี้ (f) ถ้า f=2 หรือเรียกว่าเป็นไบฟังก์ชันนัลโมโนเมอร์ โดยจะสร้างพันธะกับสองหน่วยข้างเคียงได้โมเลกุลที่มีโครงสร้าง 2 มิติ แต่ถ้าโมโนเมอร์มีพันธะที่เกิดแอคทีฟ 3 พันธะ จะสร้างโมเลกุลที่มีโครงสร้าง 3 มิติ สามารถนำไปสู่การเป็นกิ่งแขนง (branching) ต่อเนื่องกันเป็นโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะเช่น ปริมาณน้ำลดลง จะทำให้เกิดการควบแน่นน้อยลงส่งผลให้เกิดกิ่งแขนงลดลง ถ้าโมโนเมอร์สามารถเกิดพันธะได้มากกว่า 2 พันธะจะสามารถรวมตัวได้โมเลกุลใหญ่ที่มีขนาดไม่จำกัดและมีขนาดใหญ่มาก คือสามารถเห็นด้วยตาเปล่าแพร่กระจายไปทั่วทั้งสารละลายซึ่งจะเรียกว่าการเกิดเจล

2.8.1 การเกิดเจล

โดยทั่วไปเจลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวระหว่างโครงสร้างของแข็งและของเหลวถ้าของเหลวประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่า แอควาเจล (aquagel) หรือไฮโดรเจล (hydrogel) แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า อัลคิลเจล (alcogel) การเกิดเจลในกระบวนการ โซล-เจล อาจเกิดจากการระเหยอย่างรวดเร็วของตัวทำละลายซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ฟิล์มหรือไฟเบอร์ โดยโครงร่างแหของเจลจะเคลื่อนย้ายต่อไปยังตำแหน่งต่างๆ จนเกิดการควบแน่นต่อไปเรื่อยๆ เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงเกิดเป็นเจล หลังจากการเกิดเจลแล้วจะเกิดการบ่มสาร (aging) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติหลังจากการเกิดเจล ซึ่งการบ่มสารอาจรวมไปถึงกระบวนการควบแน่นและการละลายตัวและการตกตะกอนใหม่ของโมโนเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ การหดตัวของเจล (shrinkage) อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการสังเคราะห์หรือการระเหยของของเหลวในระหว่างการอบแห้ง ทำโดยการระเหยภายใต้สภาวะปกติจะทำให้เกิดการหดตัว

ของโครงสร้างเจล ซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแห้งที่สภาวะปกติเรียกว่า ซีโรเจล (xerogel) แต่ถ้านำเจลไปอบแห้งในเครื่องอบไอน้ำความร้อนสูงภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ซึ่งไม่มีชั้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอน้ำ ดังนั้นจึงไม่มีแรงดันคาปิลารี (capillary pressure) ทำให้เกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อยของเจล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งเรียกว่า แอโรเจล (aerogel)

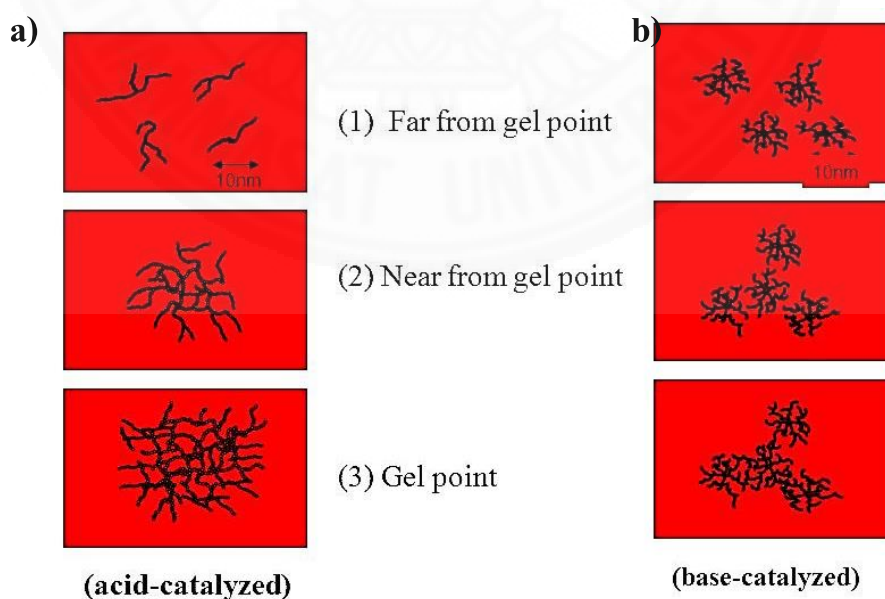
2.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในกระบวนการ โซล – เจล แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.8.2.1 สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในสภาวะนี้อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเร็วกว่าปฏิกิริยาควบแน่น ซึ่งกระบวนการทั้งสองอย่างนำไปสู่การขยายตัวของโพลิเมอร์สายโซ่ตรงและสายโซ่กิ่ง การเกิดพันธะข้ามระหว่างสายโซ่ และกรดนี้จะเป็นตัวช่วยทำให้อนุภาคของโลหะอัลคอกไซด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกรดที่เลือกมาทำปฏิกิริยานั้นมีหลายชนิดเช่นกัน เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดไนตริก เป็นต้น

2.8.2.2 สภาวะที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาการควบแน่นจะทำให้เกิดกลุ่มของโพลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่ตรงและเจลจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโพลิเมอร์ ทั้งนี้กรดและเบสจะส่งผลต่อการเกิดเจลและการเชื่อมต่อกันของกลุ่มโพลิเมอร์ที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.8

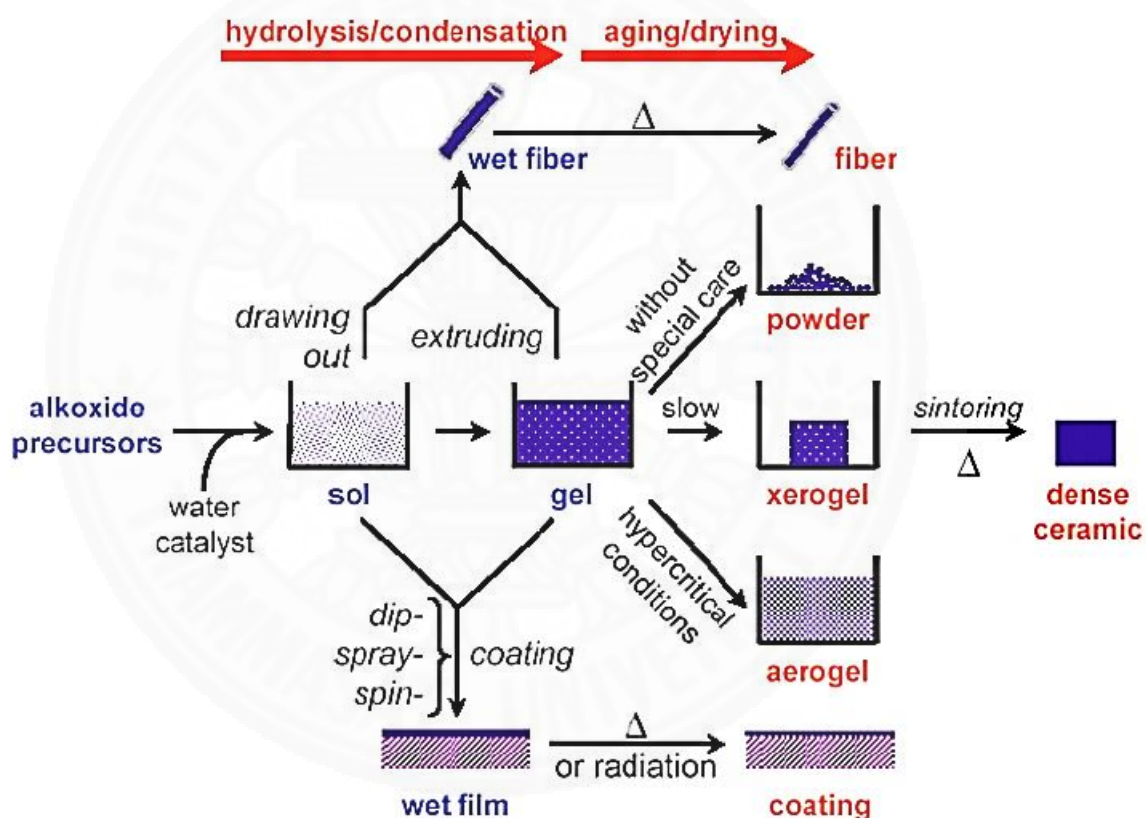


ภาพที่ 2.8 การโตของโพลิเมอร์และการเกิดเจล (a) สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(b) สภาวะที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

2.8.3 การเตรียมโซล - เจล

ขั้นตอนแรกของการเตรียมโซล-เจล คือผสมสารตั้งต้น (precursor) กับน้ำหรือแอลกอฮอล์สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะหรือกึ่งโลหะบางชนิดที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น อะลูมินา (aluminates) ไททาเนต (titanate) เป็นต้น แล้วเกิดปฏิกิริยาควบแน่นรวมตัวกันเป็นโครงข่ายอยู่ในสถานะที่เรียกว่าเจล ในกระบวนการผลิตทั้งสถานะโซลหรือเจลเมื่อเข้าสู่สภาวะทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย (fiber) ผง (powder) หรือฟิล์มเคลือบ (coating films) บนวัสดุรองรับ ซึ่งสรุปกระบวนการได้ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กระบวนการเตรียมโซล-เจล [17]

2.8.4 การเคลือบแบบจุ่มเคลือบ

วิธีการเคลือบผิวมีอยู่ 2 แบบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป คือการจุ่มเคลือบแบบกะ (batch dip coating) และการจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (continuous dip coating)

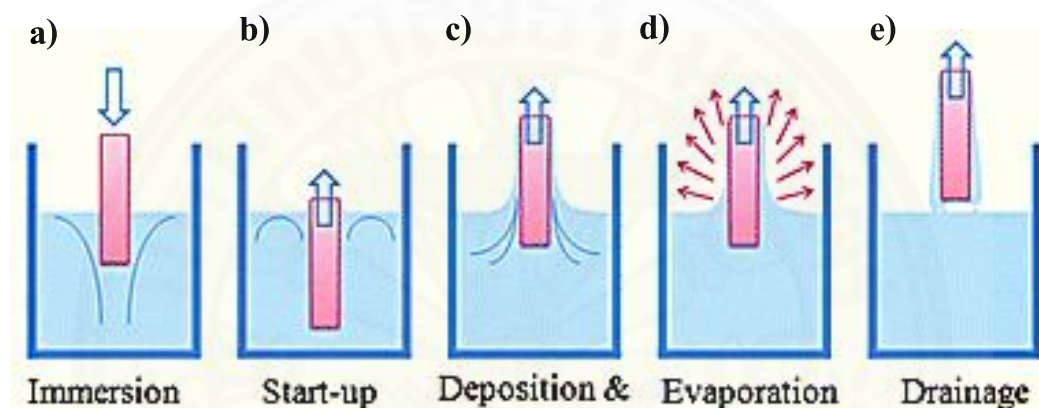
2.8.4.1 การจุ่มเคลือบแบบกะ (batch dip coating)

ในการจุ่มเคลือบแบบนี้สามารถแบ่งขั้นตอนในขณะเคลือบได้ 5 ขั้นตอน

ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (a) ถึง (e) ดังนี้

- a) ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (immersion)
- b) ขั้นตอนการเริ่มต้นดึงชิ้นงานขึ้น (start up)
- c) ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (deposition and drainage)
- d) ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (evaporation)
- e) ขั้นตอนที่สารละลายไหลแยกออกจากชิ้นงาน (drainage)

สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่ายเช่น แอลกอฮอล์ ขั้นตอนการระเหยมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับขั้นตอน (b) (c) และ (d)



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบแบบกะ (a) Immersion (b) Start Up (c) Deposition and Drainage (d) Evaporation (e) Drainage [18]

2.8.4.2 การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่อง (continuous dip coating)

การจุ่มเคลือบแบบต่อเนื่องแตกต่างกับการจุ่มเคลือบแบบกะตรงที่จะไม่มีการแยกขั้นตอนที่ (b) และ (e) ของการจุ่มเคลือบแบบกะออกจากกันแต่จะแยกขั้นตอนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายจากขั้นตอนอื่นโดยชิ้นงานจะถูกดึงผ่านสารละลาย และทำให้เกิดขอบเขตของของเหลวที่บริเวณระหว่างชั้นของสารละลายที่เกาะชิ้นงานกับผิวหน้าของสารละลายในอ่างเคลือบ ชั้นขอบเขตนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือชั้นขอบเขตด้านในและชั้นขอบเขตด้านนอกชั้นขอบเขตด้านในจะเกาะติดอยู่กับชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปบนชิ้นงาน ส่วนขอบเขตชั้นนอกจะเคลื่อนที่กลับลงมา ความหนาของชั้นที่เคลือบอยู่บนชิ้นงานนั้นจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของจุดที่แบ่งระหว่างชั้นขอบเขตด้านนอกและชั้นขอบเขตด้านใน โดยที่บริเวณเหล่านี้จะมีแรงกระทำอยู่ 5 แรงคือ

- 1) แรงดึงที่เกิดจากความหนืดที่ดึงของเหลวขึ้นเมื่อชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน

2) แรงโน้มถ่วง

3) แรงลัพท์ที่เกิดจากผลรวมของแรงในบริเวณที่เป็นรอยต่อของชั้นตัวอย่างที่เกาะบนชิ้นงานกับสารละลายในอ่างเคลือบซึ่งมีผิวหน้าเว้าเข้า (concavely curve meniscus)

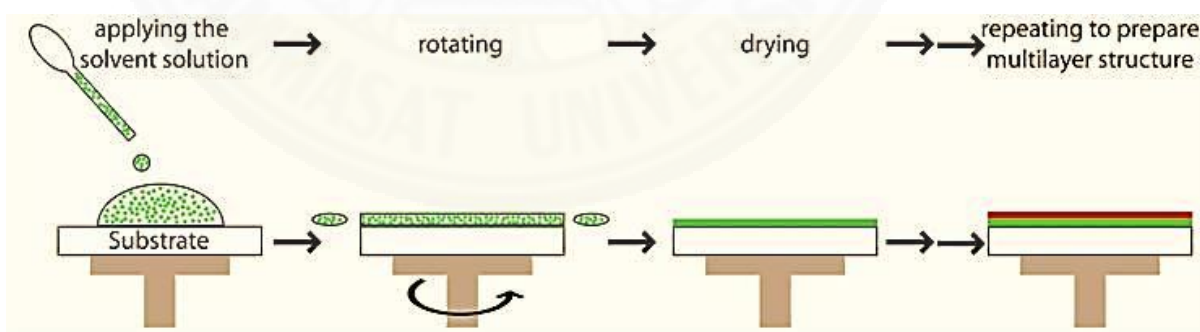
4) แรงเฉื่อยของชั้นขอบเขตของของเหลวในบริเวณที่ของเหลวเกาะกับชิ้นงาน

5) แรงที่เกิดจากความดันไม่สม่ำเสมอ วิธีการเคลือบด้วยโซล-เจล นั้นการระเหยมักจะขึ้นอยู่กับ การแข็งตัวของฟิล์มที่เคลือบ

โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดของอัตราการระเหยนั่น คืออัตราการแพร่ของไอที่แพร่ออกจากผิวหน้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนที่ของก๊าซ ที่ชั้นขอบเขตบางๆที่อยู่ติดกับผิวหน้า เนื่องจากการพามวลที่เกิดจากเคลื่อนที่ของก๊าซเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้การแพร่เพิ่มขึ้นได้อย่างมาก

2.8.5 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating)

การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการเคลือบอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ โดยการหยดสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุฐานและเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ความเร่งสู่ศูนย์กลางทำให้สารเคลือบกระจายไปทั่วแผ่นรอง สุดท้ายจะเกิดชั้นบางเคลือบบนวัสดุฐาน แสดงดังภาพที่ 2.11 ความหนาและสมบัติอื่นๆจะขึ้นอยู่กับสมบัติของสารเคลือบ เช่น ความหนืด อัตราทำให้แห้ง (rate of drying) เพอร์เซ็นต์ของแห้งและแรงตึงผิว (surface tension) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาในกระบวนการหมุนเหวี่ยง คือความเร็วของการหมุน เวลาในการหมุน ปริมาณของสารเคลือบ



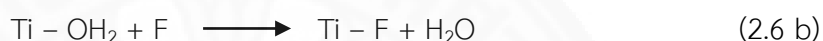
ภาพที่ 2.11 การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง [19]

2.9 การเติมฟลูออรีนบนพื้นผิว TiO_2 (fluorination on surface of TiO_2)

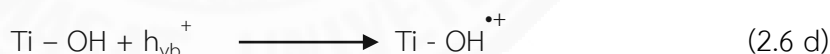
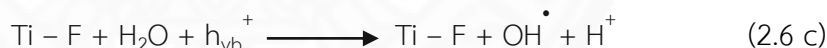
กระบวนการเติมฟลูออรีนที่ผิว (surface fluorination) ของ TiO_2 เป็นหลักการสำหรับปรับปรุงพื้นผิว โดยอาศัยอันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตของประจุบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 กับสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการเติมฟลูออรีนไอออนไปบนผิวของ TiO_2 โดยที่กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้โดยการแลกเปลี่ยนระหว่างหมู่ OH ที่ผิวของ TiO_2 กับฟลูออไรด์ไอออนดังสมการที่ (2.6 a) และ (2.6 b)



หรือ กรณีที่ผิวของ TiO_2 มีการดูดซับโมเลกุลน้ำสามารถเขียนสมการได้เป็น



ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว ฟลูออไรด์ไอออนจะถูกดูดซับที่ผิวของ TiO_2 ได้ดีในสภาพที่เป็นกรดมีค่า $\text{pH} = 3$ โดยมีงานวิจัยได้ศึกษาผลของการเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวของ TiO_2 เพื่อเพิ่มความสามารถของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์แคโทดไอออนิก ซึ่งในที่นี้ได้ใช้เมทิลีนบลู เป็นตัวทดสอบ พบว่าการเติมฟลูออรีนสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ถึง 2.5 เท่า เนื่องจากฟลูออรีนนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถรับและจ่าย e^- ได้ดี ส่งผลให้เกิดจำนวน h^+ บนพื้นผิว TiO_2 มากขึ้น ซึ่งเมื่อ h^+ ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิด $\text{OH}^\bullet$ มากกว่า TiO_2 ที่ไม่ได้เติมฟลูออรีน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวได้อธิบายไว้ดังสมการที่ (2.6 c) และ (2.6 d) [20]



อย่างไรก็ตามผลของโครงสร้างเฟสของ TiO_2 และขนาดผลึกยังเป็นตัวแปรสำคัญต่อการดูดซับของฟลูออไรด์และการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ TiO_2 ภายใต้แสงในช่วง UV อีกด้วย

2.10 การทบทวนวรรณกรรมสารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

TiO₂ เป็นชั้นเคลือบที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง และ TiO₂ ที่มีเฟสอนาเทส (anatase phase) จะมีสมบัติ Photocatalytic activity ที่ดี ในปี 1992 Heller และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงกระจกให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ สำหรับใช้ในอาคารเมื่อแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ออกมาจากไฟในอาคารในการกระตุ้นให้ TiO₂ ทำงาน และในปี 1998 Sunada และคณะ [22] ได้นำกระจกที่เคลือบ TiO₂ ไปทดสอบความสามารถในการทำมาสะอาดตัวเองด้วยการนำไปฆ่าเชื้อ Escherichia coli (E. coli) บนกระจกที่มีการฉายแสงธรรมชาติ โดยการศึกษา TiO₂ แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนของการเตรียมและส่วนการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมในส่วนของการเตรียมและการวิเคราะห์ต่อไป

2.10.1 การเตรียมผิวเคลือบ TiO₂ และ F-TiO₂ โดยเทคนิค Sol-gel

การสังเคราะห์ TiO₂ โดยใช้สารตั้งต้นได้หลายชนิดเช่น ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ไทเทเนียม (IV) ไอโซโพรพานอลและใช้ 2-โพรพานอล เป็นตัวทำละลาย เตตระบิวทิลออกโทไททานเนท-เอทานอล-น้ำ-ไดเอทานอลาไมน์และไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์-ไอโซโพรพานอล-ไฮโดรคลอริก สามารถสร้าง Sol-gel และเคลือบลงบนวัสดุโดยที่หลังจากเคลือบแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 300-500°C จึงแสดงเฟสอนาเทส และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะแสดงเฟสรูไทล์ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งการอบที่เป็นผลึกในเฟสตามที่ต้องการเหมาะต่อการนำไปเคลือบและสร้างชั้นฟิล์มเคลือบลงบนวัสดุรองเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวสูง ความหนาจะมีความสำคัญต่อโครงสร้างผลึก และมีสมบัติความเป็น Photocatalytic activity ซึ่งมีการศึกษาต่อเนื่อง จากรายงานที่ผ่านมาได้มีการศึกษาที่ความหนาต่างๆเพื่อกำหนดความหนาให้เหมาะสมกับการใช้เครื่องมือตรวจสอบ จากรายงานที่ผ่านมา พบว่าความหนาที่นำมาศึกษาอยู่ในช่วงความหนาประมาณ 65-950 nm ต่อมาได้มีการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของ TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยในปี 2004 มีการวิจัยโดย C.Su และคณะ [23] ได้ศึกษาและตีพิมพ์ในวารสาร Catalysis Today เรื่อง “Sol-gel Preparation and Photocatalysis of Titanium dioxide” โดย TiO₂ เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการโซล-เจล จากไทเทเนียม (IV) เอ็นบูท็อกไซด์ (titanium (IV) n-butoxide) ผสมกับ ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) อะซีทิลอะซีโตน (acetylacetone) และน้ำด้วยอัตราส่วนโมลคือ 1:100:2:0.01 และปรับค่า pH ด้วยกรดไนตริกให้มีค่าเท่ากับ 2 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 400 500 600 และ 700°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบสูงขึ้นความเป็นผลึกของ TiO₂ มีความเป็นผลึกสูงขึ้น และที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C เกิดเฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ขึ้น ขนาดผลึกมีค่าอยู่ในช่วง 4-35 nm จากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงพบว่าตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิ 500°C

มีความสามารถในการระบวการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสูงสุด เนื่องจากการที่มีเฟสอนาเทสและรูไทล์ผสมกันอยู่จะช่วยในเรื่องของการลดอัตราการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของคู่อิเล็กตรอน-โฮล $e^- - h^+$ ต่อมา มีการปรับปรุงสมบัติในการระบวการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเจือธาตุอื่นลงเพื่อเพิ่มพาหะประจุ (charge carrier) ทำให้ TiO_2 แสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) หรือชนิดพี (p-type) ซึ่งกระบวนการนี้จะช่วยปรับค่าแถบช่องว่างพลังงานซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด คือกระบวนการดังกล่าวจะไปช่วยลดพลังงานของโฟตอน (ช่วงของความยาวคลื่น) ที่กระตุ้นให้ TiO_2 ช่วยเร่งปฏิกิริยาขึ้นมาได้ ดังเช่น ในงานวิจัยของ H.F. YU และคณะ [24] ได้ศึกษากระบวนการปรับปรุงสมบัติของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 ด้วยการเจืออะตอมของฟอสฟอรัสลงไป ด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยผู้วิจัยได้ใช้การเคลือบด้วยเทคนิคหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 2000 rpm จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิในช่วง $600-1200^\circ C$ และนำไปทดสอบความสามารถในการระบวการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง UV เป็นเวลา 12 hr พบว่า P- TiO_2 อบที่อุณหภูมิระหว่าง 600 และ $900^\circ C$ สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการย่อยสลาย MB ในน้ำได้ มากกว่า 84 % โดยสอดคล้องกับค่าคงที่เวลาน้อยกว่า 7.1 hr ซึ่งดีกว่า TiO_2 ที่ไม่มีการเติมฟอสฟอรัสในอุณหภูมิเดียวกัน ในขณะเดียวกันมีงานของ XU Thian-hua และคณะ [25] ได้ปรับปรุงสมบัติของ TiO_2 โดยการเจืออะตอมของธาตุไนโตรเจน (N) ลงไปซึ่งก่อให้เกิดการเลื่อนไปของ E_g ให้มีค่าต่ำลง ซึ่งสามารถทำให้ TiO_2 เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การฉายแสง UV และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับ TiO_2 ที่ไม่มีการเจือ ต่อมาได้มีงานวิจัยของ Y. Chen และคณะ [26] ได้ศึกษาผลของพื้นผิวฟลูออรีนต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและสภาวะชอบน้ำ (hydrophilic) ของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล เตรียมโดยใช้ไทเทเนียม (IV) เอ็นบูทท็อกไซด์ 17.2 ml. กับ เอทานอล 67.3 ml และ โพลีเอทิลีนกลายโค (PEG) 1g ตามลำดับ และเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ และอบที่อุณหภูมิ 350 450 550 และ $650^\circ C$ เป็นเวลา 1 hr ตามลำดับ สำหรับกระบวนการเติมฟลูออรีนที่ผิวทำได้โดยนำชั้นเคลือบที่ได้ไปแช่ในสารละลาย NaF (pH = 4) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (0 10 20 30 40 และ 50 mM) และนำไปทดสอบความสามารถในการระบวการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยพิจารณาจากความสามารถในการจางสีของ RhB และทดสอบคุณสมบัติความชอบน้ำภายใต้การฉายแสง UV มีกำลัง 300 W ความเป็นผลึกของ TiO_2 จะเกิดขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า $350^\circ C$ โดยที่อุณหภูมิ $450^\circ C$ เกิดเฟสอนาเทสเพียงอย่างเดียว และที่อุณหภูมิ $550^\circ C$ เกิดเฟสผสมระหว่าง อนาเทสและรูไทล์ และที่อุณหภูมิสูงกว่านั้นจะเกิดเฟสรูไทล์ทั้งหมด ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลาย RhB แล้วพบว่า TiO_2 ที่ประกอบไปด้วยเฟสอนาเทสและรูไทล์ มีความสามารถในการระบวการด้วยแสงสูงสุด และเมื่อเทียบระหว่าง TiO_2 และ F- TiO_2 ในเงื่อนไขเดียวกับพบว่าชั้นเคลือบที่มีการเติมฟลูออรีนที่ผิว

จะมีความสามารถในการระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการ และปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ที่เงื่อนไขการจุ่มในสารละลาย NaF เข้มข้น 40 mM สำหรับผลของความชอบน้ำพบว่า TiO_2 แสดงสมบัติความชอบน้ำคือ สามารถทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำแผ่ราบไปกับพื้นผิวได้มากกว่า F-TiO_2

ในปี 2010 มีผลงานของ L.Kangle และคณะ [27] ได้ศึกษาผลของโครงสร้างเฟสต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ TiO_2 ภายใต้การเติมฟลูออรีนที่ผิว โดยผู้วิจัยได้เตรียม TiO_2 และ F-TiO_2 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในรูปแบบของผงที่มีขนาดผลึกในระดับนาโนเมตรที่มีองค์ประกอบของเฟสแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ SO_4^{2-} ในสารละลายไฮโดรเทอร์มอล และได้ นำผงผลึกเหล่านี้ไปทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยพิจารณาจากการย่อยสลาย X3B โดย TiO_2 และ F-TiO_2 ที่มีองค์ประกอบของเฟสแตกต่างกันเพียงอย่างเดียวมีความสามารถในการระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสูงสุด และเมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับที่ผิวของ X3B พบว่า TiO_2 ที่มีองค์ประกอบในเฟสอานาเทสเพียงอย่างเดียวจะมีปริมาณของ X3B ถูกดูดซับสูงกว่ากรณีที่มีเฟสผสม แต่สำหรับในการวัดการดูดซับ X3B ที่ผิวผงผลึก F-TiO_2 การดูดซับกลับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากไฟฟ้าสถิตที่ผิวของ F-TiO_2 กับ X3B ที่มีประจุเป็นลบ

และในปี 2013 ได้มีงานวิจัยของ M.V. Dozzi และ E. Selli [28] ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบเฟส และพื้นที่ผิวสัมผัสต่อความสามารถในการระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ F-TiO_2 โดย TiO_2 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผง TiO_2 เกรดที่มีขายในท้องตลาดโดยสารแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวและองค์ประกอบเฟสที่ต่างกัน โดยศึกษาผลของกระบวนการเติมฟลูออรีนที่ผิวต่อกระบวนการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ TiO_2 ในการย่อยสลายสีย้อมอะซิ Acid Red 1 (AR1) โดยผลกระทบของสภาวะความเป็นกรด-เบส ผลกระทบของการเติมฟลูออรีนและความสามารถในการดูดซับ AR1 ที่ผิว ต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ TiO_2 ภายใต้การกระตุ้นจากแสง UV และแสงหลายความถี่ โดยพบว่า TiO_2 ที่มีเฟสผสมระหว่างอานาเทสและรูไทล์ มีความสามารถในการระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการสูงกว่า TiO_2 ในเฟสอานาเทสเพียงอย่างเดียวอีกทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสมไม่มีการเปลี่ยนในช่วงค่าสภาวะความเป็นกรดในทางกลับกัน TiO_2 ในเฟสอานาเทส มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะความเป็นกรดพบว่าการเติมฟลูออรีนที่ผิว TiO_2 ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจะมีการเกิดปฏิกิริยาในอัตราต่ำลง สำหรับกรณีไม่มีการเติมฟลูออรีน เมื่อสภาวะความเป็นกรดสูงขึ้นทำให้อัตราการย่อยสลาย AR1 สูงกว่ากรณีที่มีการเติมฟลูออรีน การดูดซับ AR1 ของ TiO_2 ในเฟสอานาเทสที่ไม่มีการเติมฟลูออรีนมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีการเติมฟลูออรีนสำหรับกรณีของเฟสรูไทล์พบว่า มีการดูดซับ AR1 ที่น้อยและมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าในเฟสอานาเทส

จากการศึกษา M.V. Dozzi และ E. Selli [29] ได้นำเสนอแนวคิดของกลไกการเกิดปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ F-TiO₂ โดยเส้นทางแรกของกระบวนการเริ่มจาก ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นทำให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ($e^- - h^+$) จากนั้นสารย้อม AR1 เข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ h^+ หรือเข้าทำปฏิกิริยากับ $OH^\bullet$ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับ h^+ ในแถบเวเลนซ์ที่ผิวรอยต่อทำให้เกิดการย่อยสลาย AR1 เกิดขึ้น สำหรับเส้นทางที่สองเป็นเส้นทางของสารย้อมไวแสง กล่าวคือสารย้อมมีการดูดกลืนแสงแล้วเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของ e^- อยู่ในสภาวะกระตุ้น จากนั้น e^- จะถูกถ่ายไปยังสารกึ่งตัวนำที่แถบนำกลายเป็น $Dye^{+\bullet}$ จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายของสารย้อม

2.10.2 การวิเคราะห์ผิวเคลือบ TiO₂ และ F-TiO₂

โดยทั่วไปภายหลังจากการเคลือบจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของผิวเคลือบว่าเป็นไปตามต้องการหรือไม่ ในกรณีของ TiO₂ และ F-TiO₂ สำหรับวิธีการตรวจสอบสมบัติ Photocatalytic activity ที่เป็นมาตรฐานยังไม่มีข้อกำหนดไว้ชัดเจนแต่ก็มีวิธีการที่ยอมรับกันทั่วไปเท่าที่ค้นหาได้จากงานวิจัยต่างๆ หลายวิธีที่สำคัญๆ และใช้กันค่อนข้างมากคือการวัด Photocatalytic activity จากการป้ายสารอย่างบนพื้นผิว แล้วดูการสลายตัวของสารเหล่านั้นภายใต้การฉายแสง UV ด้วยการวัดการเปลี่ยนสีหรือการดูดกลืนแสงที่ป้ายไปบนชั้นเคลือบ

นอกจากสมบัติวัด Photocatalytic activity แล้วยังต้องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีอื่นๆ อีกด้วย เพื่อให้ทราบว่าชั้นเคลือบที่ได้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน รวมทั้งเพื่อประโยชน์ในการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมและการปรับปรุงประสิทธิภาพให้สอดคล้องกับการใช้งานต่อไป โดยสมบัติดังกล่าวอาจจะเป็นเรื่องทั่วไปที่ต้องทราบในการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง เช่น ความหนา ความแข็งแรง ความคงทน เป็นต้น และยังมีสมบัติที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น โครงสร้างทางจุลภาคและ surface roughness โครงสร้างทางผลึกรวมทั้งส่วนผสมของ crystal phase ต่างๆ สมบัติของแสงวัสดุ (n, k) ค่า optical band gap องค์ประกอบทางเคมีและการนำไฟฟ้า เป็นต้น

เห็นได้ว่าเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติมีหลากหลาย เท่าที่พบในรายงานเทคนิคที่ใช้เป็นหลักได้แก่ Scanning electron microscopy (SEM) และ UV-VIS Spectrophotometry เป็นต้น ดังนั้น การวัดและวิเคราะห์ TiO₂ และ F-TiO₂ สำหรับใช้เคลือบเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย อาจแบ่งออกได้คร่าว ๆ ได้แก่ การวัด Photocatalytic activity โครงสร้างจุลภาคและความหนา เป็นต้น

การวัด Photocatalytic activity เพื่อให้ทราบว่าชั้นเคลือบที่เตรียมได้มีสมบัติที่ดีมาน้อยเพียงใด หลักการคือทำการเคลือบหรือป้ายสารอินทรีย์สมบัติทางเคมี โดยสารเคลือบเหล่านี้สามารถถูกทำลาย

หรือย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยา oxidation ของ photocatalytic activity บนชั้นเคลือบ Self-cleaning ตัวอย่างเช่น rhodamine B, stearic acid, methylene blue, methyl orange, trichloroethylene และ salad oil เป็นต้น อัตราเร็วของการถูกทำลายจะวัดได้จากสมบัติทางเคมีหรือทางแสงที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องมือต่างๆ การวัดความเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงในช่วง UV หรือ IR เครื่องมือหลักที่ใช้ในการวัด photocatalytic activity ได้แก่ เครื่อง spectrophotometer การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผลึก เพื่อตรวจสอบภาพที่เหมาะสมหรือมีประสิทธิภาพดี จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคขึ้นกับเทคนิคการเตรียมมีผลอย่างมากกับ photocatalytic activity เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคหลัก ๆ ได้แก่ SEM และ TEM เป็นต้น

การวัดความหนาซึ่งส่วนใหญ่จะเตรียมด้วยวิธี sol-gel หรือ dipping ทำได้ง่ายโดยใช้เครื่องวัดความหนาแบบ stylus profile meter กรณีชั้นเคลือบที่บางมากจำเป็นต้องใช้เทคนิคที่ยุ่ยากมากขึ้น เช่น SEM ของ fracture surface และ TEM การทดสอบความคงทนทำได้หลายวิธีซึ่งการประยุกต์ใช้งานนั้นการทดสอบพื้นฐาน เช่น การกดแน่น การทนความร้อน การทนความชื้น หรือการจำลองการใช้งานจริงซึ่งมาตรฐานเหล่านี้ถูกกำหนดและประกาศไว้ชัดเจนแล้วเป็นส่วนใหญ่ และการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีอื่นๆ หมายถึงการวิเคราะห์ที่ไม่ได้กล่าวถึงข้างต้น ซึ่งอาจจะมีผลต่อการศึกษาเช่น optical band gap เป็นต้น

2.10.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

สำหรับการตรวจสอบน้ำเสียที่ได้จากการบำบัดด้วย TiO_2 และเทคนิคการตรวจสอบและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียตรวจสอบได้ตามรายงานวิจัย นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียยังต้องการบำบัดตาม Standard Methods of Water and Wastewater ได้แก่ pH COD BOD สภาพความเป็นด่าง สี ของแข็งแขวนลอย ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัส เป็นต้น

ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม [30] ศึกษาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีสีซึ่งเกิดจากลิกนินซึ่งมีองค์ประกอบที่ยากต่อการบำบัด โครงการนี้เป็นการศึกษาการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดย TiO_2 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดและประสิทธิภาพในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริง การทดลองทำโดยใช้แบบจำลองแบบเต็มเต็มครั้งเดียว (Batch) และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปริมาณลิกนิน 10 mg/L ในการหาระยะเวลาโดยใช้ TiO_2 ที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าระยะเวลาลิกนินถูกบำบัดหมดใน 8 hr พบว่า ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 4.0 g/L โดยสามารถกำจัดลิกนินได้ทั้งหมดและจากการทดลองในการบำบัดสีจากลิกนินในน้ำเสียจริงซึ่งมี

ปริมาณลิกนิน 27.4 mg/L พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ TiO_2 4.0 g/L และระยะเวลา 8 hr ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินสามารถกำจัดได้ ร้อยละ 69.8

Houas, et al. [31] ศึกษาการกำจัด MB ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงซึ่งอาศัย TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ถังปฏิกรณ์ Pyrex reactor ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกระบอก ขนาด 90 mL พื้นที่หน้าตัด 11 cm^2 การวิเคราะห์ทำโดยวัดค่าความเข้มข้นของสาร MB จากเครื่อง UV-vis Spectrometer จากการศึกษาสามารถพบว่าสารละลาย MB สามารถถูกกำจัดได้ ผลจากการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาได้ $6.25 \times 10^3 \text{ mol/L}$ และเมื่อควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส $\text{pH} = 3-9$ ทำให้ความสามารถในการลดสีของ MB เพิ่มขึ้นโดยการกระตุ้นด้วยแสงภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสง UV เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวงเบนซีนอยู่ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แอมโมเนียและไนเตรต

Kua, et al. [32] ศึกษาการประยุกต์ใช้ฟิล์ม TiO_2 บนใบพัดแบบมีแกนหมุนรอบขนาดของถังปฏิกรณ์ปริมาตร 8 L ศึกษาลดสีย้อมผ้าประเภทต่าง ๆ เช่น MB (γ_{max} 660 nm) สี RR195 (γ_{max} 540 nm) และ RY145 (γ_{max} 420 nm) ภายใต้การฉายรังสีจากแสงอาทิตย์โดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้กับไม่ใช้ TiO_2 จากการทดลองการย่อยสลายสีของสีย้อมโดยใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีฟิล์ม Photocatalytic TiO_2 ร้อยละการกำจัดสีสำหรับ MB RR195 และ RY145 พบว่า 23.3, -9.3 และ -20.7 ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การทดลองแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ ได้แก่

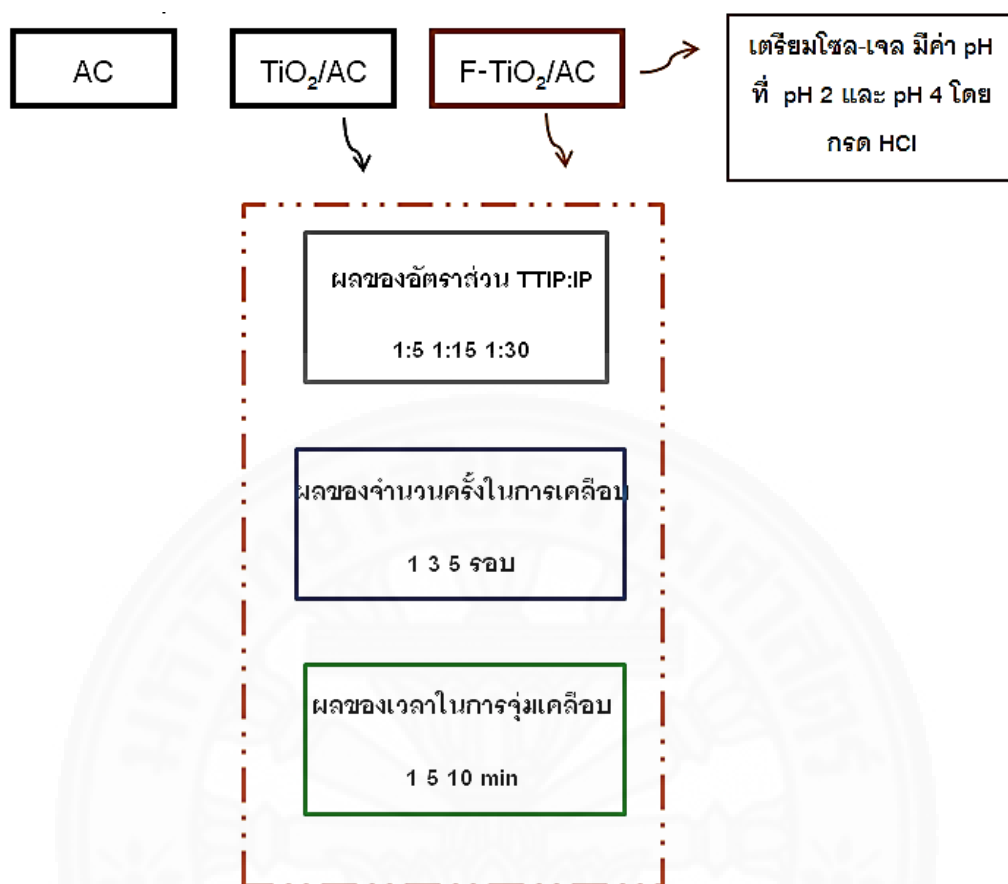
3.1 การเตรียม TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC

- 3.1.1 การเตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจลและการจุ่มเคลือบ
- 3.1.2 การเตรียมจากผง TiO_2 ทางการค้า
- 3.1.3 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC
- 3.1.4 ออกแบบและสร้างกังหันน้ำที่ประยุกต์ใช้งานร่วมกับ F- TiO_2/AC

3.2 การตรวจวัดและการวิเคราะห์

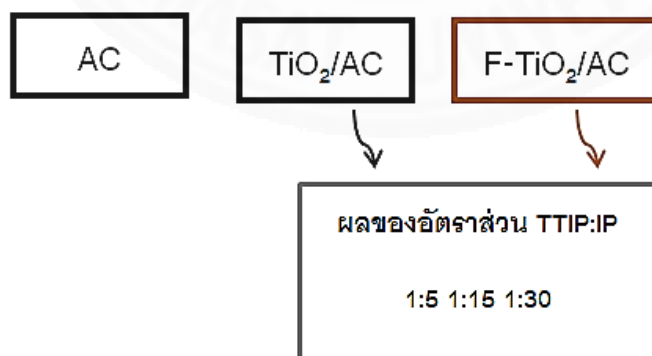
3.2.1 ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field emission scanning electron microscope: FE-SEM)

3.2.2 ศึกษาการสลายตัวของ MB ร่วมกับ TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงของ MB ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคป (UV-VIS spectroscope; UV-VIS) ตามเงื่อนไขดังแผนภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาการย่อยสลายของ MB

3.2.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียด้วยเครื่อง UV-VIS ตามเงื่อนไขแสดงดังแผนภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

3.3 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3.1 สารเคมีและวัสดุ อุปกรณ์ในการเตรียมผิวเคลือบและการตรวจสอบ

ตารางที่ 3.1

สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ในการเตรียมผิวเคลือบและการตรวจสอบ

สารเคมีและวัสดุ	เกรด/ที่มา
ไทเทเนียมเตตระไฮโดรโพพอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$)	Analysis reagent/ Kento company
2-โพรพานอล ($2\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}:2\text{PP}$)	Analysis reagent/ Kento company
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	Conc.10%V/Merck company
อะซิโตน (CH_3COCH_3)	Analysis reagent/ Kento company
เมทิลลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}\cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$)	ชนิดเม็ด (180°C) /ศึกษาภัณฑ์
ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon :AC)	I600
โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF)	Analysis reagent/ Kento company
ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า เฟลลوناเทส 100%	Analysis reagent/ Kento company
ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า เฟสรูไทล์ 100%	Analysis reagent/ Kento company
อลูมิเนียมฟอยล์	ศึกษาภัณฑ์
พาราฟิล์ม	ศึกษาภัณฑ์
น้ำกลั่น	ศึกษาภัณฑ์
น้ำยาล้างจาน	ซัลไลต์/Uniliver Thai Holding company
น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ	โรงงานจงสถิตย์ จำกัด
สแตนเลส	
ตะแกรงสแตนเลส	
น็อต	

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียม

ตารางที่ 3.2

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่าง

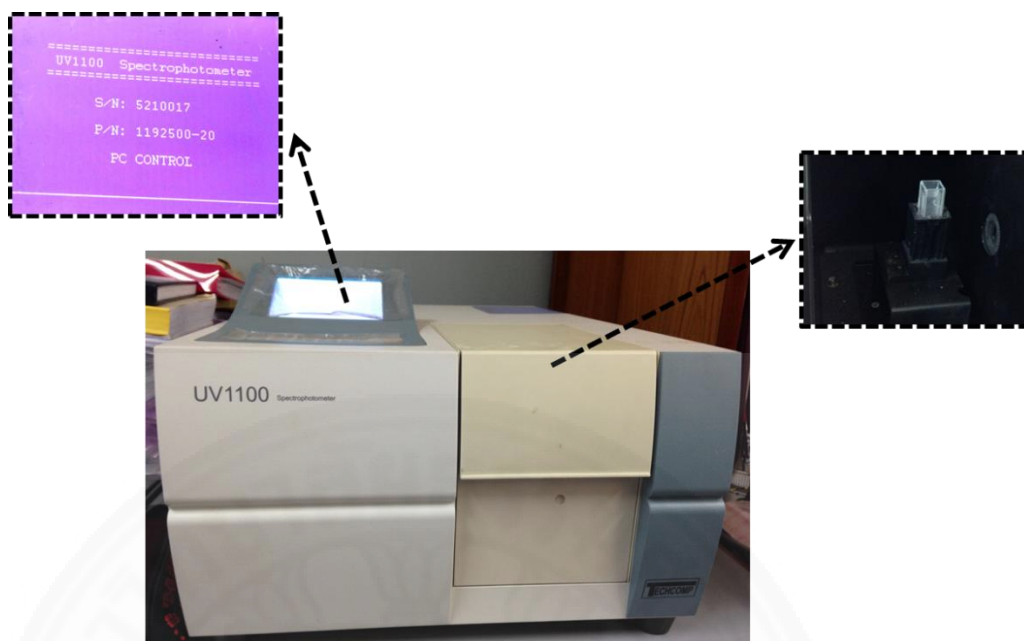
เครื่องมือและอุปกรณ์	เกรด/ที่มา
บีกเกอร์ ขนาด 50 100 150 500 1000 และ 2000 ml	Schott Duran brand
เครื่องดูดสารละลาย (pipette)	รุ่น A30-5000 ยี่ห้อ Pipette BLUE
เครื่องปั่นด้วยแม่เหล็ก (magnetic stirrer)	รุ่น MST ยี่ห้อ VELP SCIENTICA
เตาอบ	รุ่น VULCAN 3-550 ยี่ห้อ NEY
เครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating)	Auto Claver
หลอดยวี่	
เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic)	รุ่น DSA100-XN1
ครกบดเซรามิก	
ตะแกรงร่อนคัดขนาด	

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะ

ตารางที่ 3.3

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะ

เครื่องมือ	เกรด/ที่มา
เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	รุ่น UV 1100 ตั้งอยู่ที่สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	ยี่ห้อ FE-SEM HITACHI รุ่น S4700 ตั้งอยู่ที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ



ภาพที่ 3.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV-VIS 1100



ภาพที่ 3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง FE-SEM

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

ในการทดลองจะทำการเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2 ลงบน AC ซึ่งการเตรียม TiO_2 และ F-TiO_2 เตรียมโดยเทคนิคกระบวนการโซล-เจล จำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรสำหรับการเงื่อนไขการเคลือบดังต่อไปนี้

- ส่วนผสมไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ : (TTPP, $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$) กับตัวทำละลาย 2-โพรพานอล : (2-PP, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) ที่อัตราส่วน 1:5 1:15 และ 1:30
- จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ (dipped coating) ที่ 1 3 และ 5 รอบ
- เวลาในการจุ่มเคลือบ ที่เวลา 1 5 และ 10 min.

3.4.1 การเตรียมโซล-เจล

เพื่อหาเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่าง TTIP:2PP ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเป็นผิวเคลือบ TiO_2 เพื่อใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการเตรียมโซล-เจลด้วยอัตราส่วนคือ TTIP: 2PP 1:5 1:15 และ 1:30 ปรับค่า pH = 2 ด้วยกรด HCl กวนสารด้วยเครื่อง 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ 1 วัน ทำให้ได้โซล-เจล แสดงดังแผนภาพที่ 3.5

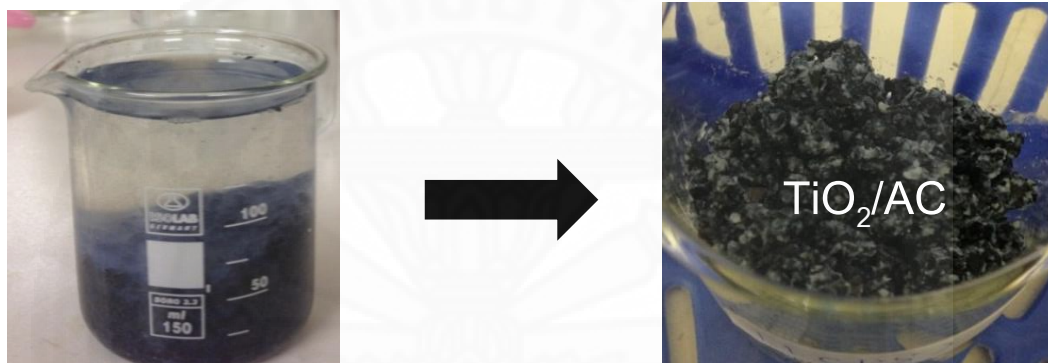


ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมโซล-เจล

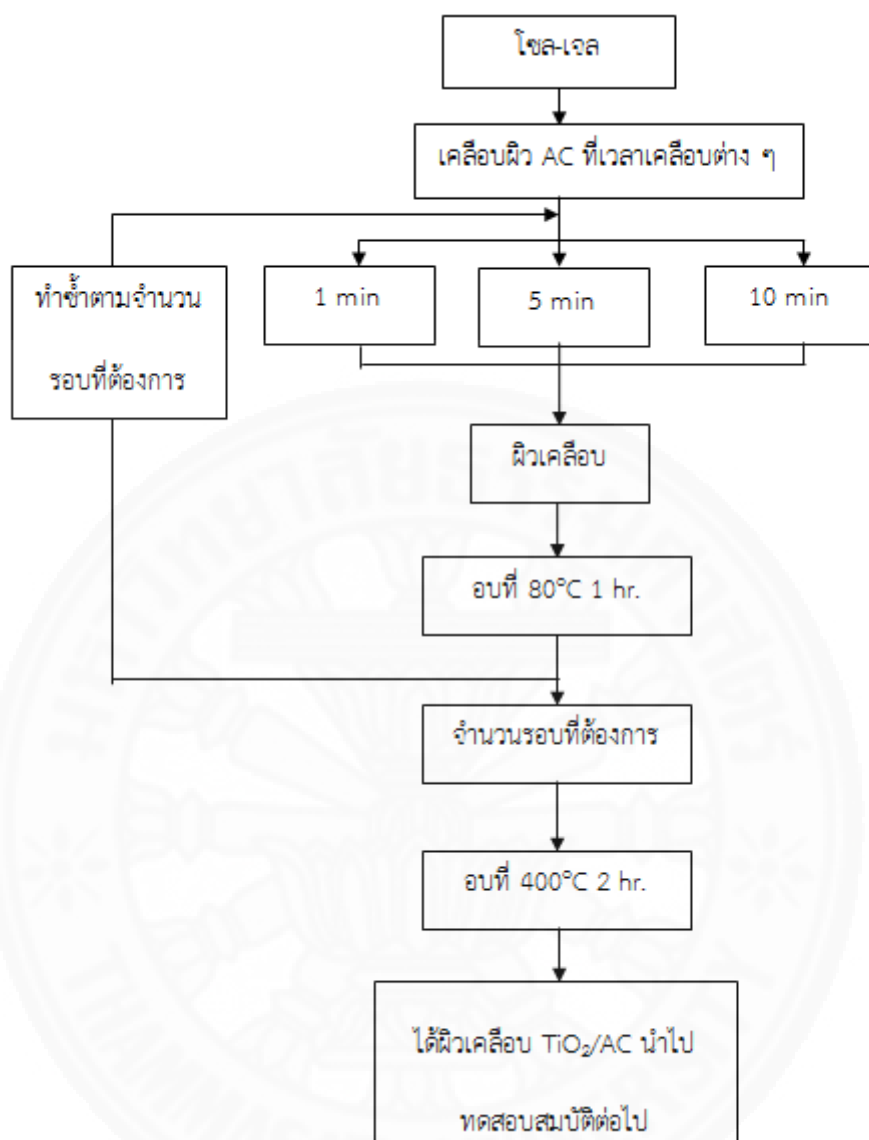
3.4.2 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2 จากโซล-เจล ลงบน AC และแผ่นสแตนเลส

แบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่

3.4.2.1 การเตรียม TiO_2 / AC แสดงดังภาพที่ 3.6 โดยการเคลือบแบบจุ่ม คือการเคลือบในลักษณะจุ่มทิ้งไว้ในรอบและเวลาตามเงื่อนไขที่เตรียม หลังจากนั้นในแต่ละรอบที่เคลือบจะนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้ผิวเคลือบแห้งและระเหยสารอินทรีย์ และจุ่มเคลือบอีกครั้งตามจำนวนรอบที่ต้องการ เมื่อครบรอบแล้วนำผิวเคลือบไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เพื่อนำผิวเคลือบไปศึกษาคุณลักษณะต่อไปซึ่งมีแผนผังแสดงขั้นตอนเพื่อง่ายต่อการเข้าใจดังภาพที่ 3.7

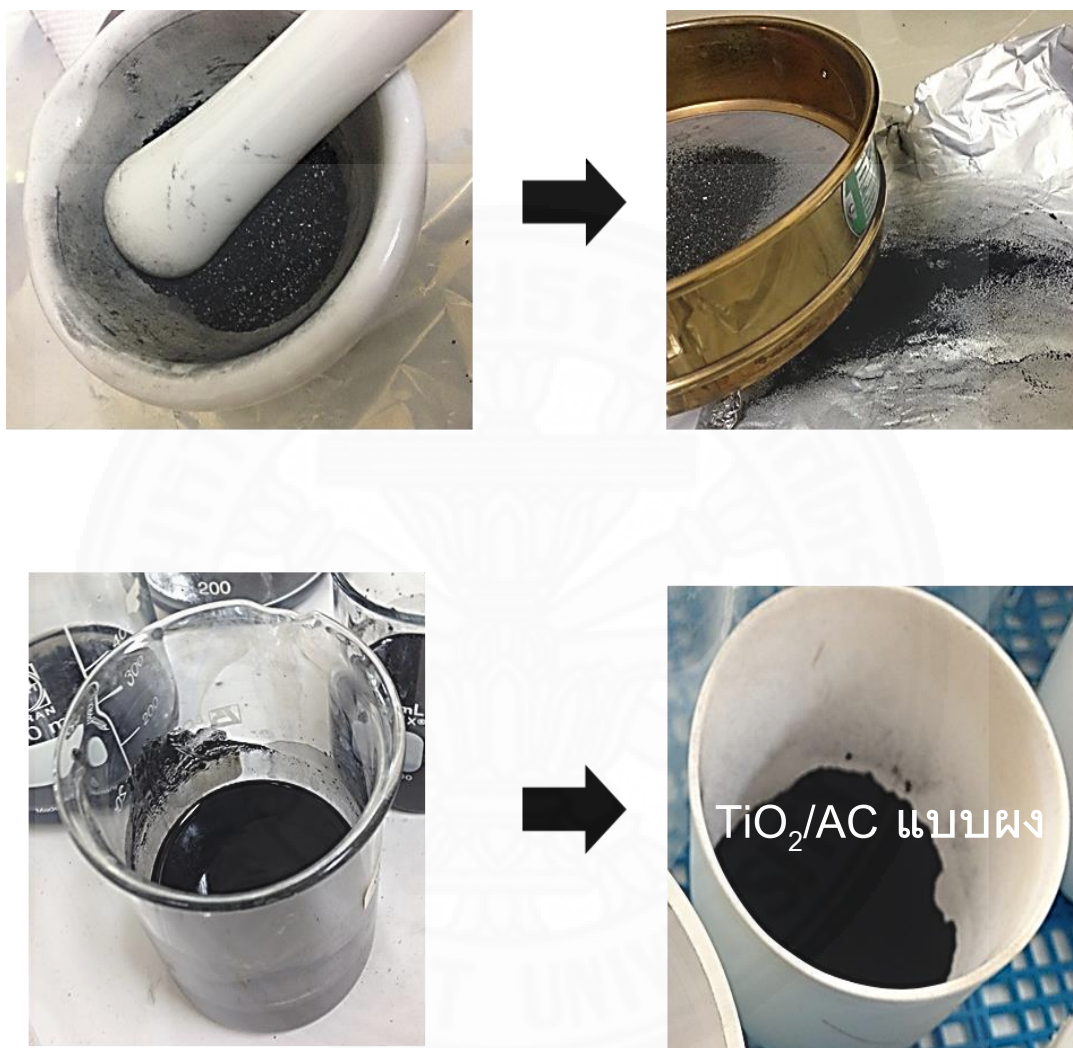


ภาพที่ 3.6 การเคลือบผิวแบบเคลือบจุ่ม TiO_2/AC



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมผิวเคลือบ TiO₂/AC

3.4.2.2 การเตรียม TiO_2 / AC แบบผง ทำเหมือนส่วนที่ 1 ทุกขั้นตอนเพิ่มเติม คือการเตรียม AC แบบผงทำได้โดยนำ AC มาบดละเอียดด้วยครกเซรามิคแสดงขั้นตอนดังภาพที่ 3.8

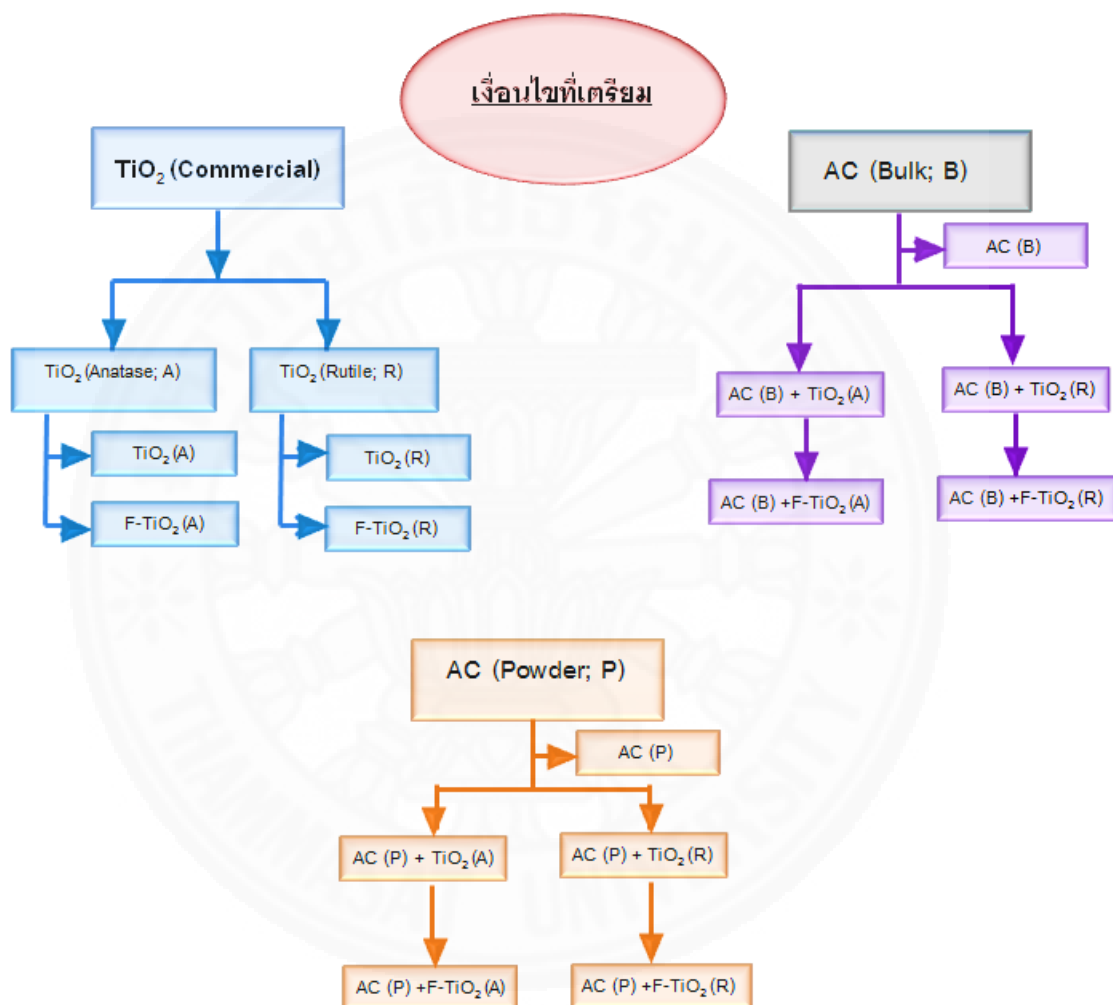


ภาพที่ 3.8 การเคลือบผิวแบบเคลือบจุ่ม TiO_2/AC แบบผง

3.4.2.3 การเตรียม TiO_2 บนแผ่นสแตนเลส ขนาด $10.5 \times 10.0 \text{ cm}^2$ สำหรับประกอบเป็นกังหันเพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ และนำน้ำเสียไปศึกษาประสิทธิภาพก่อนและหลังการบำบัดน้ำเสียโดยในการเตรียมได้ศึกษาตัวแปรคือปริมาตรโซล-เจล และอัตราเร็วของการหมุนเหวี่ยงต่อการกระจายตัว ศึกษาสมบัติของตัวอย่างหลังการเตรียม รวมไปถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย [33] โดยผู้วิจัยมีการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้และนำเสนอข้อมูลที่เหมาะสมมาใช้ประโยชน์

3.4.3 การเตรียมผิวเคลือบ TiO_2 เกรดทางการค้าลงบน AC

นำ TiO_2 เกรดทางการค้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 เกรดคือ TiO_2 เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส 100% และ TiO_2 เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ 100% มาผสมกับ AC แบบเม็ดและแบบผงตามเงื่อนไขแสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การเคลือบผิวแบบเคลือบ TiO_2 เกรดทางการค้า/AC

3.4.4 การเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2 และ TiO_2/AC

การเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2 และ TiO_2/AC ทำโดยการจุ่มแช่ในสารละลาย NaF ที่ความเข้มข้น 30 mmol pH = 2 เป็นเวลา 2 hr. [33]

3.4.4.1 การเตรียมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2

นำโซล-เจลที่ได้ภายหลังขั้นตอนการเตรียมตามเงื่อนไขต่าง ๆ นำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เพื่อให้ตัวอย่างเปลี่ยนจากออสฐานเป็นผลึกในกรณีผลึก TiO_2 เกรดทางการค้ามีเฟสอนาเทส 100% และ ผงผลึก TiO_2 เกรดทางการค้ามีเฟสรูไทล์ 100% โดยนำผงผลึก TiO_2 แช่ในสารละลาย NaF ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 hr. เพื่อให้เกิดการยึดจับฟลูออรีนที่ผิว หลังจากนั้นนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 hr จะได้ F- TiO_2 สำหรับนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติต่าง ๆ

3.4.4.2 การเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของผิวเคลือบ TiO_2/AC

หลังจากการเคลือบผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบจุ่มซึ่งเป็นการเคลือบของการทดลองในระยะแรกเพื่อดูความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ สำหรับการนำผิวเคลือบ TiO_2/AC มาเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวเพื่อสร้างตัวอย่าง F- TiO_2/AC มีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการเติมฟลูออรีนลงบน TiO_2/AC เพื่อสร้างตัวอย่าง F- TiO_2/AC

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะและความสามารถของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

ในการประยุกต์ใช้ TiO_2 สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น ความเป็นผลึก ขนาดของผลึก และลักษณะพื้นผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งเกี่ยวข้องการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ($e^- - h^+$) นอกจากนี้ขนาดเกรนจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) กับสิ่งแวดล้อมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาปัจจัยดังกล่าว

3.5.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของ TiO_2 F-TiO_2 TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

ลักษณะพื้นผิวของผิวเคลือบ ศึกษาโดยการถ่ายภาพจากกล้อง FE-SEM ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S4700 ตั้งอยู่ที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ

3.5.2 ยูวี-วิสลิเบิล สเปกโตรสโคปี (UV-VIS spectroscopy)

สเปกโตรสโคปี (spectroscopy) เป็นวิธีการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดอันตรปฏิกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารโดยเมื่อการดูดกลืนหรือปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น สามารถนำมาตรวจวัดปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลังผ่านสาร แล้วสามารถวัดได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ใช้เครื่อง UV-VIS โดยศึกษาค่าการดูดกลืนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง 200-800 nm เมื่อผ่านคลื่นดังกล่าวเข้าไปในสาร สารจะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากโฟตอนของคลื่นแสงและสารจะดูดกลืนแสงไว้ส่วนหนึ่ง และให้แสงอีกส่วนหนึ่งถูกส่งผ่านออกไปคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะทำให้ไอเล็กตรอนหรืออะตอม หรือโมเลกุล หรือไอออน เกิดการเปลี่ยนสถานะของพลังงาน โดยพลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ คือ การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุล การเปลี่ยนสถานะที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

การทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสีของ MB ที่อยู่ในรูปของผง โดยวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS แล้วบันทึกผลเพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของ MB เมื่อเวลาในการฉายแสง UV เพิ่มขึ้น

ร้อยละของการย่อยสลายสีของ MB (%decolorization of methylene blue) สามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{ Decolorization} = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ s

A คือ ค่าการดูดกลืน

3.5.3 การศึกษาความสามารถของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 F- TiO_2 TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC

เพื่อศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงสำหรับ TiO_2 ชนิดผงทางการค้า และผิวเคลือบที่เตรียมขึ้นของ TiO_2 และ F- TiO_2 ที่เตรียมบน AC นำมาทดสอบจากความสามารถในการกำจัดของ MB ที่ละลายน้ำด้วยความเข้มข้น 0.05 mmol โดยพิจารณาแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

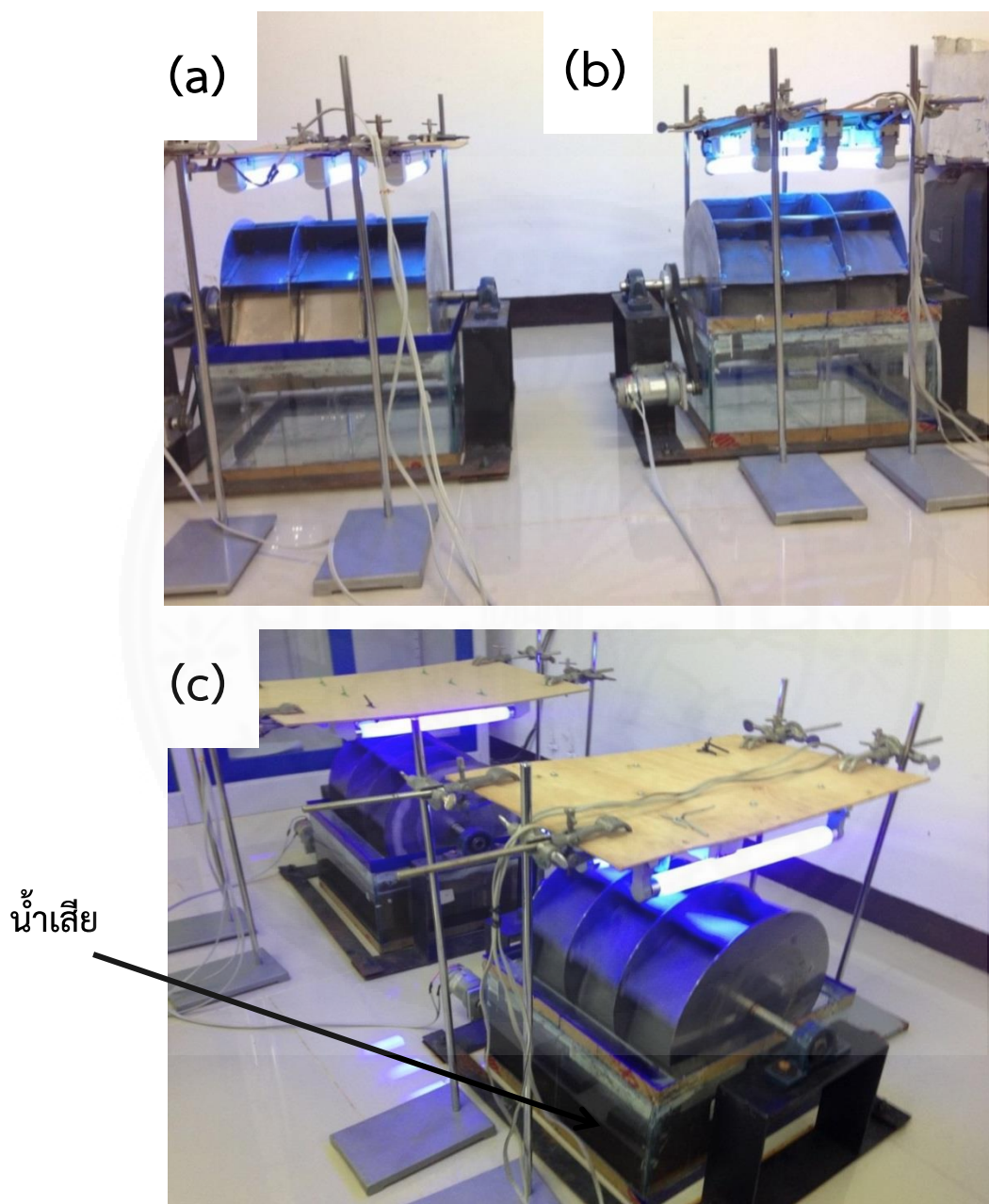
กรณีผง TiO_2 และ F- TiO_2 เติมผง 0.8 mg ลงไปในสารละลาย MB ในปริมาตร 30 ml จากนั้นนำไปฉายแสง UVA ความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 365 nm เป็นเวลา 2 hr โดยทุก ๆ ครึ่งชั่วโมงจะเก็บตัวอย่างมาวัดความสามารถในการดูดกลืนแสงเพื่อตรวจสอบการกำจัดของ MB ด้วยเครื่อง UV-Vis ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm

กรณีการเคลือบ TiO_2 และ F- TiO_2/AC ลงบน AC ใช้อัตราส่วน TiO_2/AC หรือ F- TiO_2/AC 10 g ต่อ MB 150 ml จากนั้นนำไปฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 365 nm เป็นเวลา 5 min โดยทุก ๆ นาทีจะเก็บตัวอย่างขึ้นมามวัดความสามารถในการดูดกลืนแสงเพื่อตรวจสอบการกำจัดของ MB ด้วยเครื่อง UV-Vis ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm เช่นเดียวกัน ในกรณีทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง กรณีการทดสอบการกำจัดที่ได้จากโรงงานย้อมผ้าทำโดยการนำเอา TiO_2/AC หรือ F- TiO_2/AC มาในปริมาณ 10 g ต่อปริมาณน้ำเสีย 150 ml ฉายแสง UVA ตลอด 6 hr และเก็บตัวอย่างทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง เพื่อนำไปตรวจสอบความสามารถในการกำจัดของ TiO_2/AC หรือ F- TiO_2/AC ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.6 การออกแบบและสร้างกังหันน้ำ

ในการออกแบบและสร้างกังหันน้ำผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างกังหันน้ำโดยคำนึงถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ TiO_2 หรือ F- TiO_2/AC เป็นสำคัญ โดยออกแบบกังหันให้สามารถกวาดอากาศไปเติมให้กับน้ำและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวผิวเคลือบกับน้ำให้มากเพื่อช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ อย่างไรก็ตามการออกแบบยังจำเป็นต้องให้ผิวเคลือบสามารถที่จะรับแสงจากดวงอาทิตย์หรือหลอด UVA จากการทดลองแล้ว

เข้าไปสัมผัสกับน้ำเสียเพื่อช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ กังหันจึงถูกออกแบบให้มีใบพัดจำนวนมากขึ้นและสามารถกวาดอากาศสู่น้ำได้ ลักษณะกังหันที่ออกแบบแสดงดังภาพที่ 3.11 (a) โดยกังหันที่ออกแบบมีใบพัดที่เคลือบ TiO_2 ทั้งหมด 24 แผ่น ขนาดใบพัด $10.0 \times 10.5 \text{ cm}^2$



ภาพที่ 3.11 กังหันน้ำและการติดตั้ง (a) กังหันน้ำชนิดเคลือบ TiO_2

(b) กังหันน้ำที่ประกอบด้วยใบพัด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

(c) การติดตั้งสำหรับบำบัดน้ำเสีย

จากภาพที่ 3.11 (b) แต่ละใบพัดนั้นมีการเชื่อมติดกับแผ่นสแตนเลสชนิดตาข่ายที่ภายในบรรจุ AC ในปริมาณเท่าๆกัน แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การประกอบกังหันน้ำที่ประกอบด้วยใบพัด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

3.7 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้รับการอนุเคราะห์น้ำเสียจริงจากระบบบำบัดของโรงงานจงสถิตย์ น้ำเสียจากระบบหล่อเย็นก่อนเข้าระบบเติมอากาศ



ภาพที่ 3.13 น้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอจากโรงงานจงสถิตย์ จำกัด

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจากโรงงานจงสถิตย์ จำกัด โดยเก็บน้ำในระบบน้ำหล่อเย็นลักษณะสีน้ำตาลเข้มมีฟองมากเนื่องจากการปนเปื้อนน้ำยาซักล้าง ไม่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ แต่จะมีกลิ่นของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตบ้างเล็กน้อย เช่น สารฟอกขาว สีย้อม เป็นต้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองแบ่งเป็นส่วนๆ ดังนี้

- ผลของกระบวนการเตรียมและการวิเคราะห์ TiO_2 คือ เกรดทางการค้าและที่ได้จากการเตรียมโดยเทคนิคโซล-เจลและนำมาใช้เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม (dipped coating) บนถ่านกัมมันต์ (TiO_2/AC)
- ผลการศึกษากระบวนการเตรียมและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ ($\text{F-TiO}_2/\text{AC}$)
- ผลการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำรงแสงของ TiO_2 F-TiO_2 TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$
- ผลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของกังหันน้ำที่มี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นองค์ประกอบของกังหัน
- ผลการศึกษา TiO_2 F-TiO_2 TiO_2/AC ชนิดผงและ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ชนิดผง

ในเบื้องต้นได้ศึกษาการเตรียม TiO_2 โดยเลือกใช้กระบวนการโซล-เจล ซึ่งในการทดลองนี้ได้เตรียมสารละลาย โซล-เจล โดยใช้สารตั้งต้นเป็น TTIP ผสมเข้ากับ 2PP ด้วยอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 1:5 1:10 1:15 และ 1:30 โดยปริมาตร จากนั้นนำไปอบแห้งและนำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C และนำมาเติมฟลูออรีนโดยการจุ่มแช่ในสารละลาย NaF ทำให้ได้ F-TiO_2 นอกจากนี้ได้นำโซล-เจลที่ได้มาจุ่มเคลือบ AC แล้วจึงนำไปเติมฟลูออรีนที่ผิว ($\text{F-TiO}_2/\text{AC}$) ซึ่งจะได้ผลของการเตรียมและการวิเคราะห์ผลเป็นลำดับดังนี้

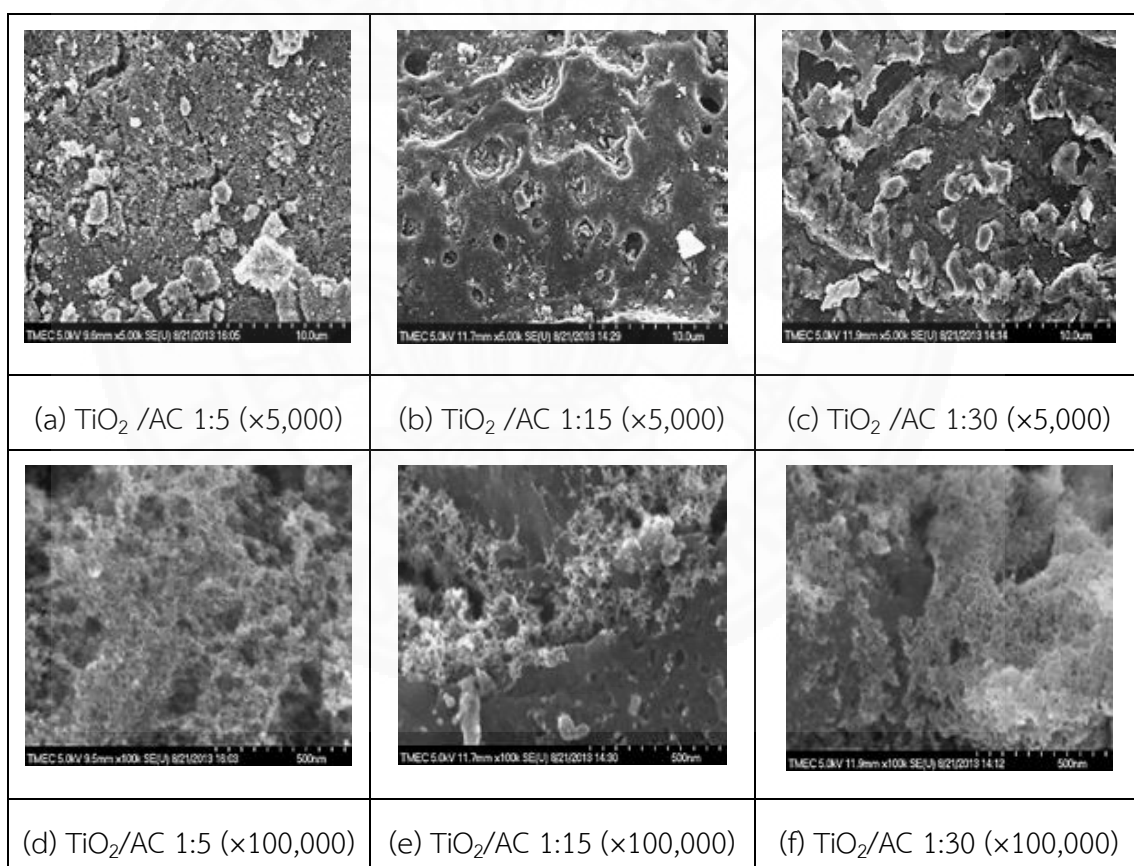
4.1 การศึกษา TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

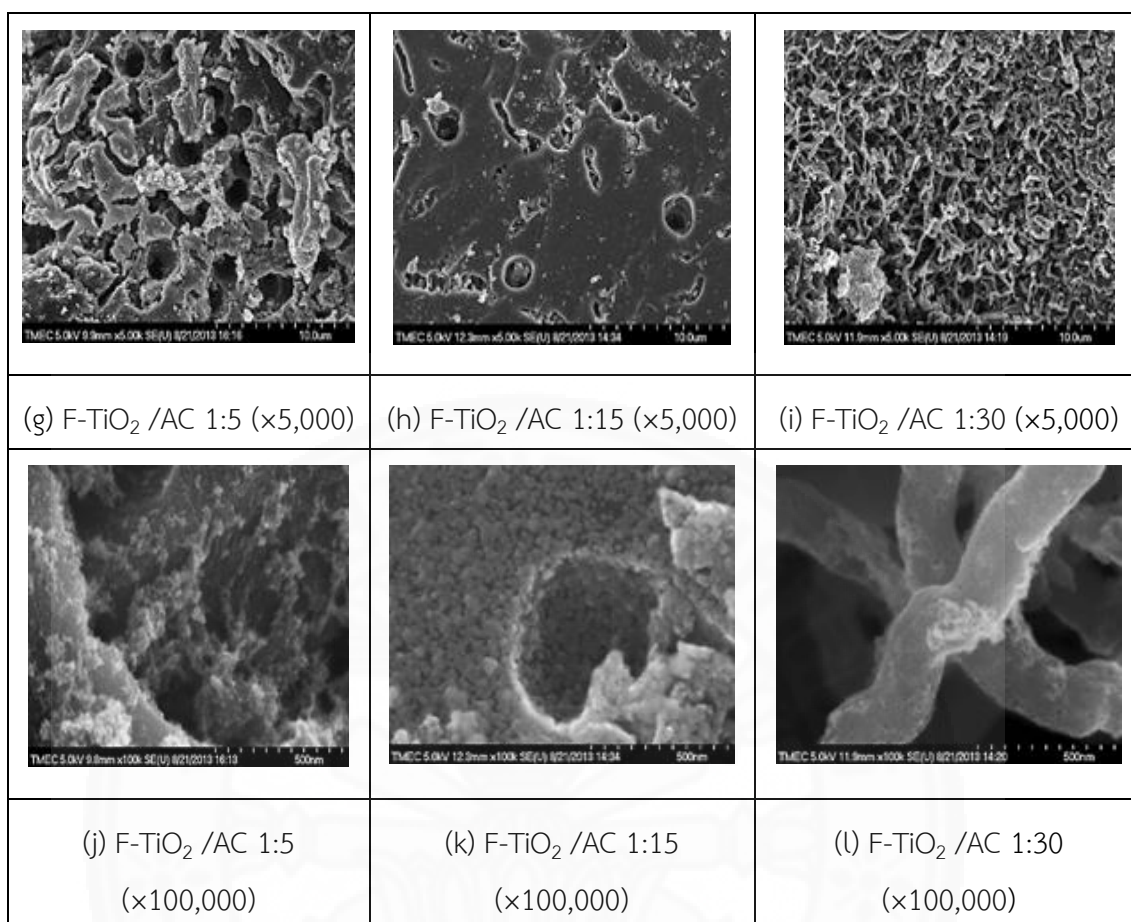
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

● ผลของอัตราส่วน TTIP:2PP

จากภาพที่ 4.1 เป็นการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของผิวเคลือบ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ โดยพิจารณาที่จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบที่เวลาจุ่มเคลือบ 10 min ในกรณีที่มีการเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิว $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ปรับ pH = 2 ด้วยกรด HCl พบว่าทั้ง TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มี TiO_2 และ F-TiO_2 กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ โดยในส่วนของช่องรูพรุนเปิดมี TiO_2 และ F-TiO_2 เข้าไปเคลือบเกาะอยู่ โดย TiO_2 และ F-TiO_2 เกาะตัวบนพื้นผิว AC รวมเป็นกลุ่มโดยมีลักษณะเป็นเม็ดเกรนขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอยู่และจับกลุ่มกันในลักษณะที่เป็นฟองน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่

อัตราส่วน TTIP:2PP ที่ต่างกัน พบว่าทั้ง TiO_2 และ F-TiO_2 ของ TTIP:2PP ที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:15 มีลักษณะไม่ต่างกันมาก คือมีลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนลักษณะแบบฟองน้ำบนพื้นผิว AC ในขณะที่ TTIP:2PP ที่อัตราส่วน 1:30 ของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ พบว่าเกิดพื้นผิวในลักษณะเส้นใยนาโนโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับที่เล็กกว่า 250 nm กระจายตัวทั่วบริเวณพื้นผิวซึ่งเส้นใยนาโนน่าจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวและเกิดขึ้นได้กับอนุภาคที่มีขนาดเกรนเล็กที่สุดของ TTIP:2PP นั่นคือที่อัตราส่วน 1:30 โดยอนุภาคที่เป็นเกรนจับตัวรวมกันเป็นในเส้นใยนาโน อย่างไรก็ตามการเกิดเส้นใยนาโนเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ AC เพราะจากการทดลองพบว่า TiO_2 ไม่สามารถฟอร์มตัวเป็นเส้นใยนาโน F-TiO_2 ได้เองภายใต้เงื่อนไขการเติมฟลูออรีนที่ผิวด้วยเงื่อนไขเดียวกัน

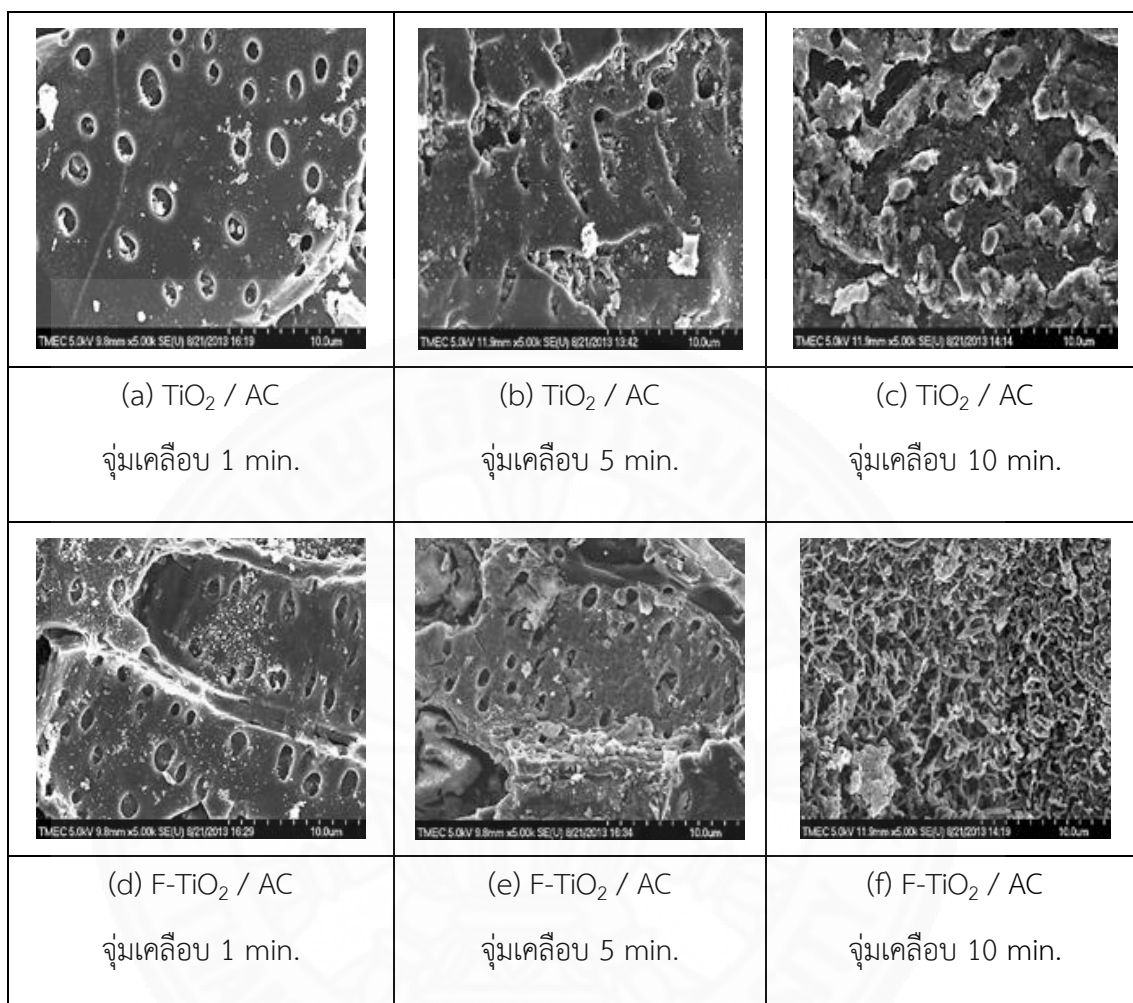




ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่างลักษณะพื้นผิวของ TiO₂/AC และ F-TiO₂/AC ที่กำลังขยาย 5,000 และ 100,000 เท่า จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบ เวลาในการจุ่มเคลือบที่ 10 min. ค่า pH = 2

● ผลของเวลาในการจุ่มเคลือบ

จากภาพที่ 4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มเคลือบต่อลักษณะพื้นผิวมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือที่จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ 1 รอบในการจุ่มเคลือบ 1 min. จะมี TiO₂ และ F-TiO₂ เกาะอยู่บนพื้นผิว AC อย่างเบาบางทำให้เห็นรูพรุนของ AC อย่างชัดเจน ในขณะที่เมื่อเวลาในการจุ่มเข้มข้นขึ้น TiO₂ และ F-TiO₂ กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวทั่วบริเวณมากขึ้นและเมื่อตรวจสอบด้วยภาพถ่ายจากกล้อง FE-SEM พบว่าที่เวลาในการเคลือบ 10 min. มีการกระจายตัวของ TiO₂ และ F-TiO₂ ที่ครอบคลุมทั่วบริเวณมากกว่า 5 min. อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TiO₂/AC และ F-TiO₂/AC พบว่าผลของการเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวส่งผลต่อโครงสร้างของ F-TiO₂ ให้จับตัวกันเป็นเส้นใยนาโนและกระจายตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนมากขึ้น

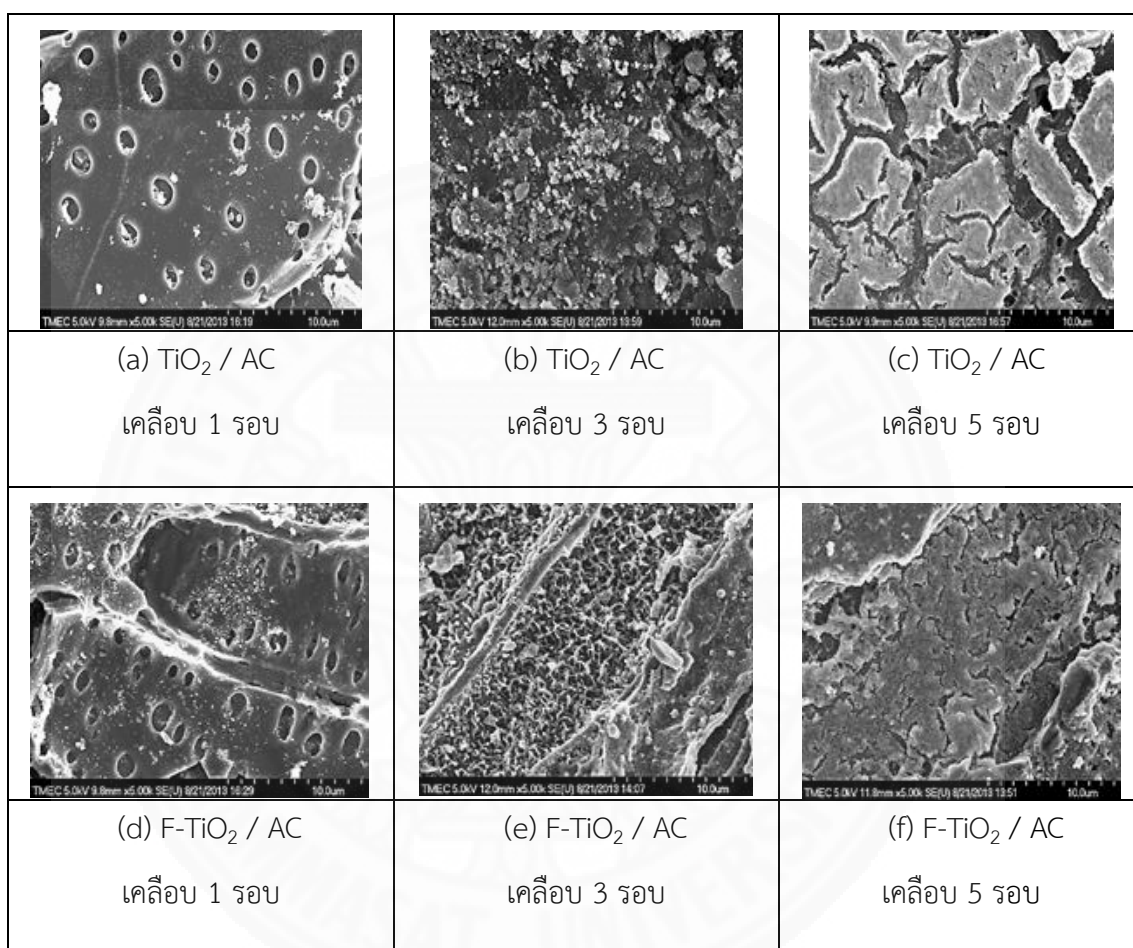


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่างลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบเวลาในการจุ่มเคลือบที่ 1 5 และ 10 min. ตามลำดับ ค่า pH = 2

● ผลของจำนวนรอบในการเคลือบ

จากภาพที่ 4.3 แสดงถึงตัวอย่างที่มีจำนวนรอบในการเคลือบมากขึ้น ซึ่งการเคลือบในแต่ละรอบจำเป็นจะต้องนำเข้าสู่การอบความร้อนที่ 60°C เป็นเวลา 24 hr. เพื่ออบแห้งซึ่งเป็นกระบวนการที่สิ้นเปลืองเวลาและพลังงาน แต่เพื่อเปรียบเทียบว่าการเคลือบรอบเดียวใช้เวลานานกับการเคลือบหลายรอบใช้เวลาสั้นๆ การเคลือบแบบไหนให้สมบัติที่ดีและเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานมากกว่ากัน จากภาพที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวพบว่าภายใต้เงื่อนไขที่ใช้จำนวนรอบในการ

เคลือบหลายครั้งขึ้น พบว่า TiO_2 และ F-TiO_2 กระจายตัวครอบคลุมพื้นผิว AC มากขึ้นและหนาแน่นมากขึ้นซึ่งผิวเคลือบของ F-TiO_2 จะให้ผิวเคลือบที่มีลักษณะเป็นเส้นใยกระจายตัวอยู่ทั่วรูพรุนเมื่อเปรียบเทียบการเคลือบ 1 รอบมีผิวเคลือบ TiO_2 และ F-TiO_2 กระจายตัวอยู่อย่างเบาบาง

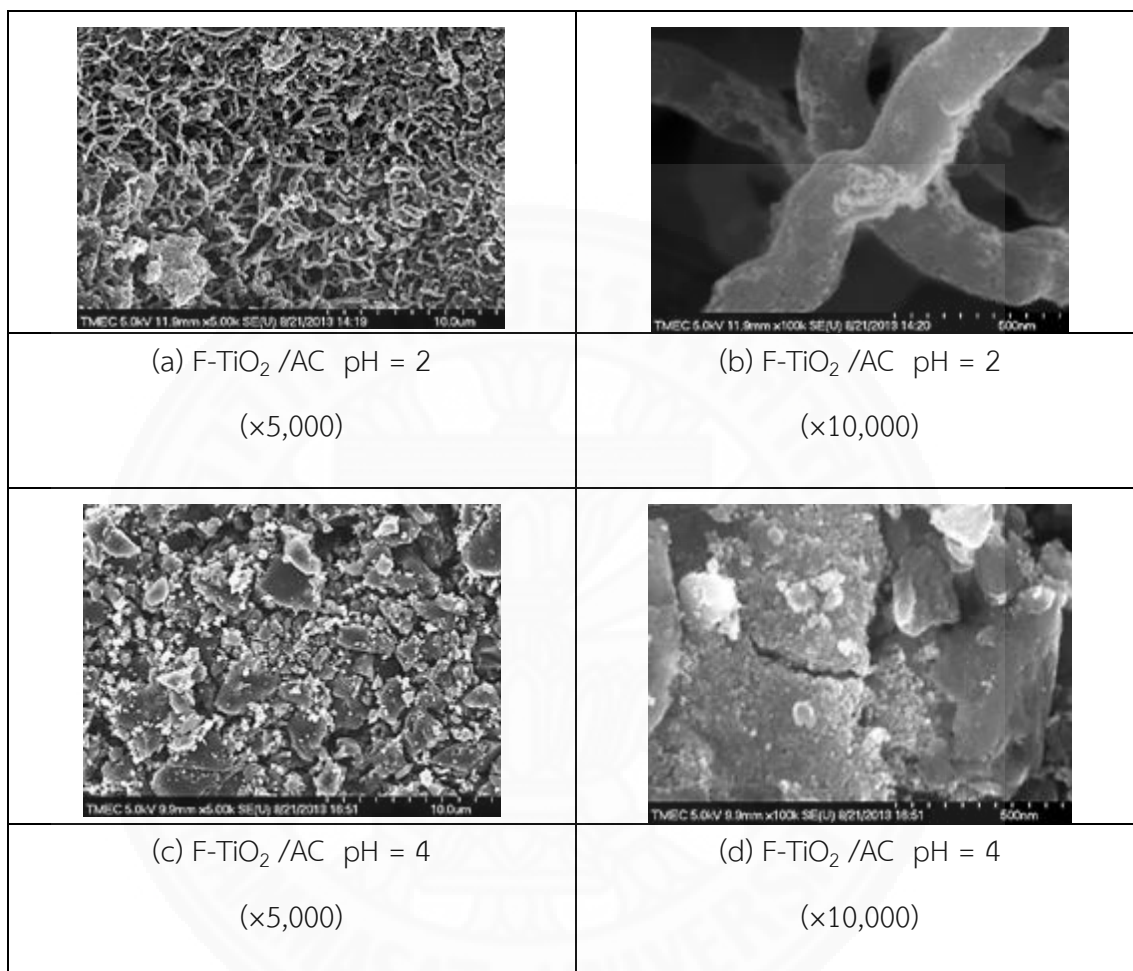


ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM เปรียบเทียบความแตกต่างลักษณะพื้นผิวของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ที่เวลาในการเคลือบ 1 min. จำนวนรอบในการเคลือบที่ 1 3 และ 5 รอบ ค่า pH = 2

- ผลของค่า pH ในการเตรียม $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

จากภาพที่ 4.4 พิจารณาผลต่างของค่า pH ในการเตรียม $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ พบว่ามีผลอย่างมากต่อรูปแบบกับฟอร์มตัวของ F-TiO_2 บนพื้นผิว AC ซึ่งในช่วงกรด pH = 2 ส่งผลทำให้ F-TiO_2

TiO_2/AC พอร์มตัวกันเป็นเส้นใยนาโนได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ $\text{pH} = 4$ พบลักษณะผิวเคลือบที่มีการกระจายของอนุภาค $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ อย่างหนาแน่นเป็นผิวโดยมีลักษณะเป็นเกรนจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค FE-SEM ที่กำลังขยาย 5,000 และ 100,000 เท่า เปรียบเทียบความแตกต่างลักษณะพื้นผิวของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่เตรียมด้วยค่า pH ที่แตกต่างกันคือที่ $\text{pH} = 2$ และ $\text{pH} = 4$ ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบเวลาในการเคลือบ 10 min.

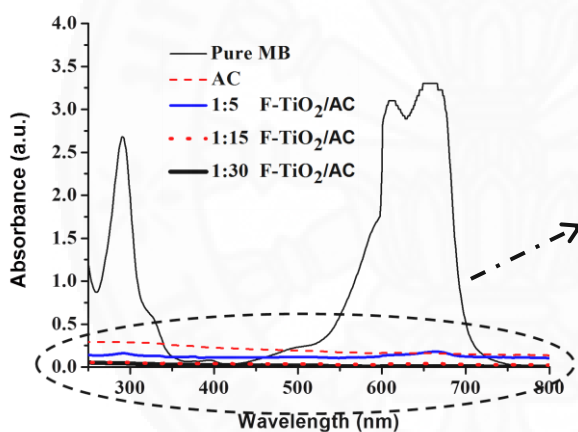
4.1.2 ความสามารถในการจางสี MB ของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

ในการศึกษาความสามารถในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถทำได้ด้วยการพิจารณาความสามารถในการจางสีของ MB ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานคือ AC เป็นตัวช่วยดูดซับ

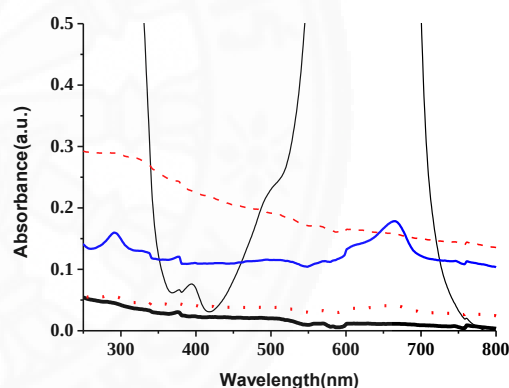
สารอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม AC มีขีดจำกัดในการดูดซับเมื่ออิมตัวจึงไม่สามารถดูดซับได้เพิ่มและภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดูดซับภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและเพื่อพิจารณาความสามารถในการจางสีของ MB โดยรวมเอาการดูดซับและย่อยสลายโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเข้าด้วยกัน จึงได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

● ผลของอัตราส่วน TTIP:2PP

จากภาพที่ 4.5 และ 4.6 ผลการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าอัตราส่วนของ TTIP:2PP มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การเคลือบบน AC โดยทดสอบภายใต้แสง UVA ที่อัตราส่วน $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$: สารละลาย MB คือ 10 g : 150 ml ซึ่งพบว่า TTIP:2PP ที่ 1:30 ให้ผลการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ซึ่งดีกว่า 1:15 และ 1:5 เป็นอัตราส่วนที่แย่ที่สุดและเกิดการจางสีโดยสามารถเปลี่ยนสีของ MB จากสีน้ำเงินเป็นสีใสได้ในเวลาเพียง 5 min ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วน TTIP:2PP ที่ 1:30



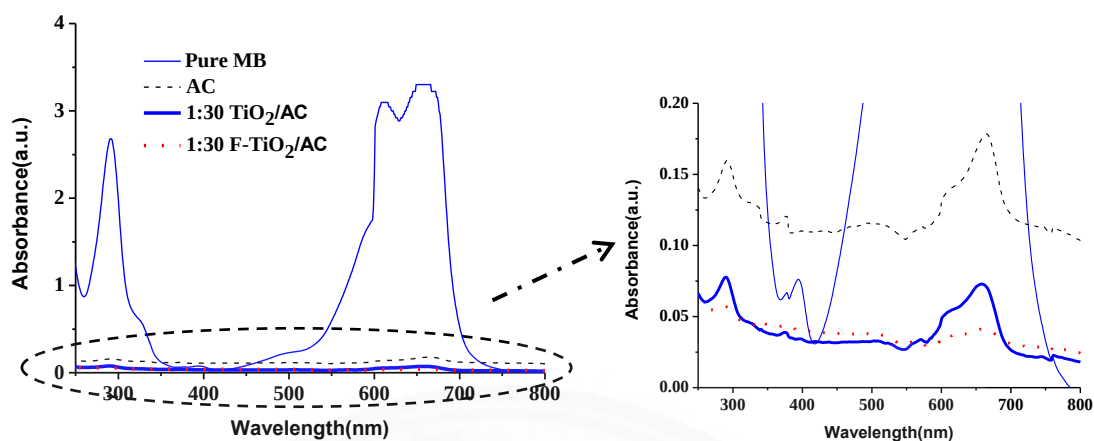
(a) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB



(b) ภาพขยาย

ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 เวลาฉายแสง UVA ที่ 5 min. เปรียบเทียบกับ Pure MB และ AC

จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ และ TiO_2/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:IP 1:30 พบว่า $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มีความสามารถในการจางสีที่ดีกว่าที่เวลาในการฉายแสง 5 min. $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มีความสามารถในการจางสีได้เป็นสีใสในขณะที่ TiO_2/AC ยังคงมีสีของ MB

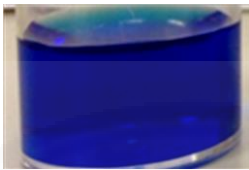
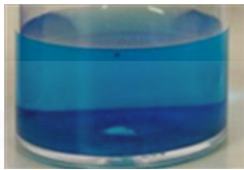
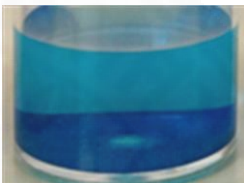
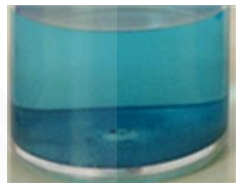
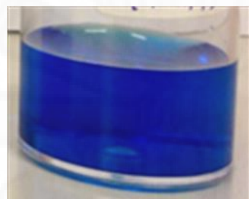
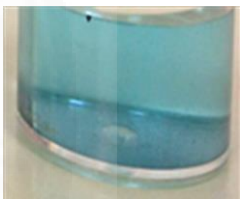
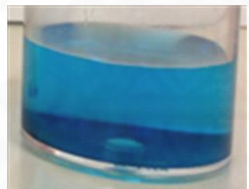


(a) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB

(b) ภาพขยาย

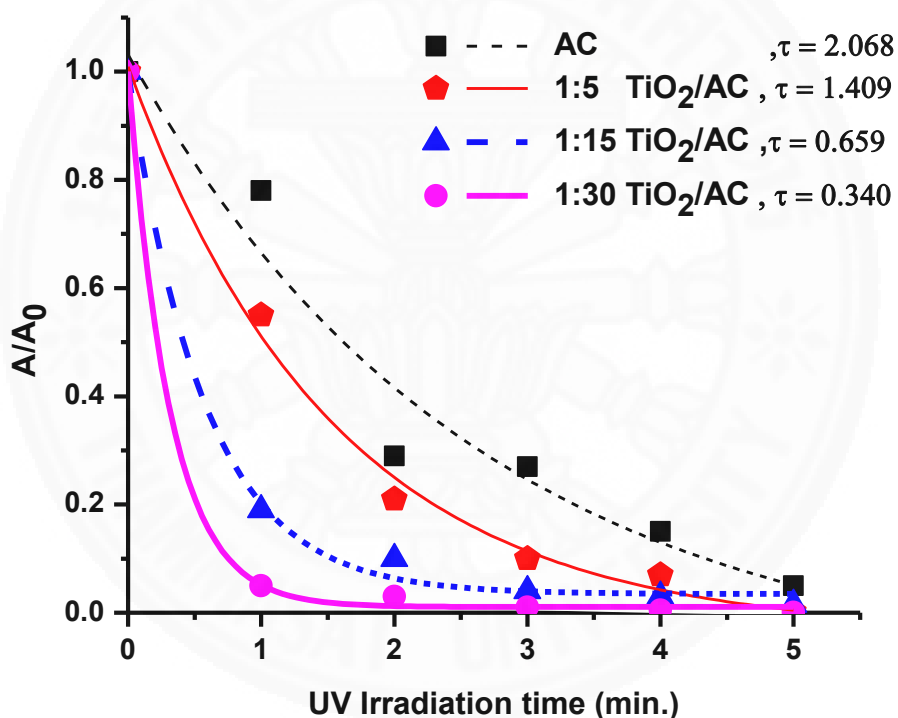
ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี TiO₂/AC และ F-TiO₂/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 เวลาฉายแสง UVA ที่ 5 min. เปรียบเทียบกับ Pure MB และ AC

จากภาพที่ 4.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบการจางสีของแต่ละตัวอย่างจะเห็นว่าเมื่อเวลาฉายแสงนานขึ้นสีจะจางลง และเมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของ TTIP: 2PP มีผลต่อความสามารถจางสีได้ดีขึ้น โดย F-TiO₂/AC (1:30) จางสีได้ดีที่สุดที่เวลาเพียง 3 min. สีก็จะจางอย่างชัดเจน

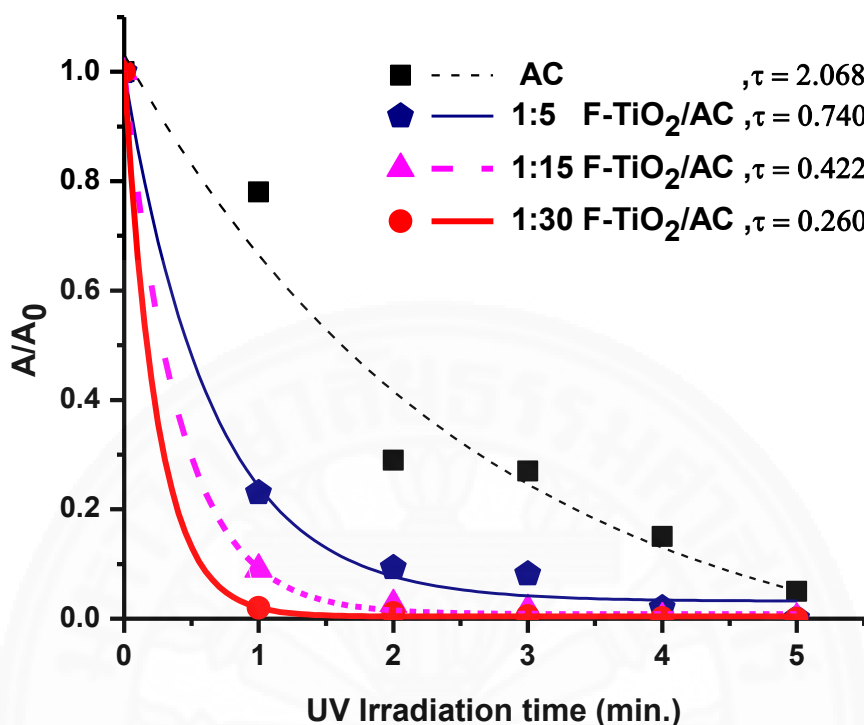
Samples (TTIP:2PP)	UV Irradiation Time (min.)		
	1	3	5
AC			
AC/TiO ₂ (1:5)			
AC/TiO ₂ (1:30)			
AC/F-TiO ₂ (1:30)			

ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายสารละลาย MB เปรียบเทียบการจางสีระหว่าง TiO₂/AC (1:5) TiO₂/AC (1:30) และ F-TiO₂/AC (1:30) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาในการฉายแสงต่างกัน คือ 1 3 และ 5 min.

พิจารณาความแตกต่างของความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงระหว่าง TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เปรียบเทียบกับ AC เพียงอย่างเดียว แสดงดังภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนที่เวลาต่างๆของ MB และพิจารณาเป็นความเข้มข้นของ MB ซึ่งพบว่า $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงดีกว่า TiO_2/AC ทุกอัตราส่วน TTIP:2PP โดยค่าคงที่เวลาในการจางสี MB แสดงดังตารางที่ 4.1 คือ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 0.742 0.422 และ 0.260 min ของอัตราส่วน TTIP: 2PP 1:5 1:15 และ 1:30 ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่เวลาน้อยแสดงว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่ดี สำหรับ TiO_2/AC มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 1.409 0.659 และ 0.340 min ตามลำดับในขณะที่ AC มีค่าคงที่เวลามากถึง 2.068 min.



ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบการดูดกลืนที่เวลาต่างๆ ของ MB หลังการฉายแสงตลอดช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ TiO_2/AC ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 เปรียบเทียบกับ AC



ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบการดูดกลืนที่เวลาต่างๆของ MB หลังการฉายแสงตลอดช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ F-TiO₂/AC ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 เปรียบเทียบกับ AC

จากการพิจารณาผลการทดลองดังกล่าวเมื่อพิจารณาผลของความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO₂/AC และ F-TiO₂/AC เปรียบเทียบกับ AC เพียงอย่างเดียว พบว่า F-TiO₂/AC มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีกว่า TiO₂/AC ทุกอัตราส่วนของ TTIP:2PP ซึ่งจะสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ตัวอย่าง F-TiO₂/AC มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 0.742 0.422 และ 0.260 min. ของอัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่เวลาที่มีค่าน้อยแสดงว่าการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี สำหรับ TiO₂/AC มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 1.409 0.659 และ 0.340 min. ตามลำดับ ในขณะที่ AC มีค่าคงที่เวลามากที่สุดถึง 2.068 min. และจากตารางสรุปได้ว่าข้อมูลในตารางนั้นแสดงถึงบทสรุปของโครงสร้างตัวอย่างตามเงื่อนไขที่เตรียมรวมถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจากการจางสีของ MB

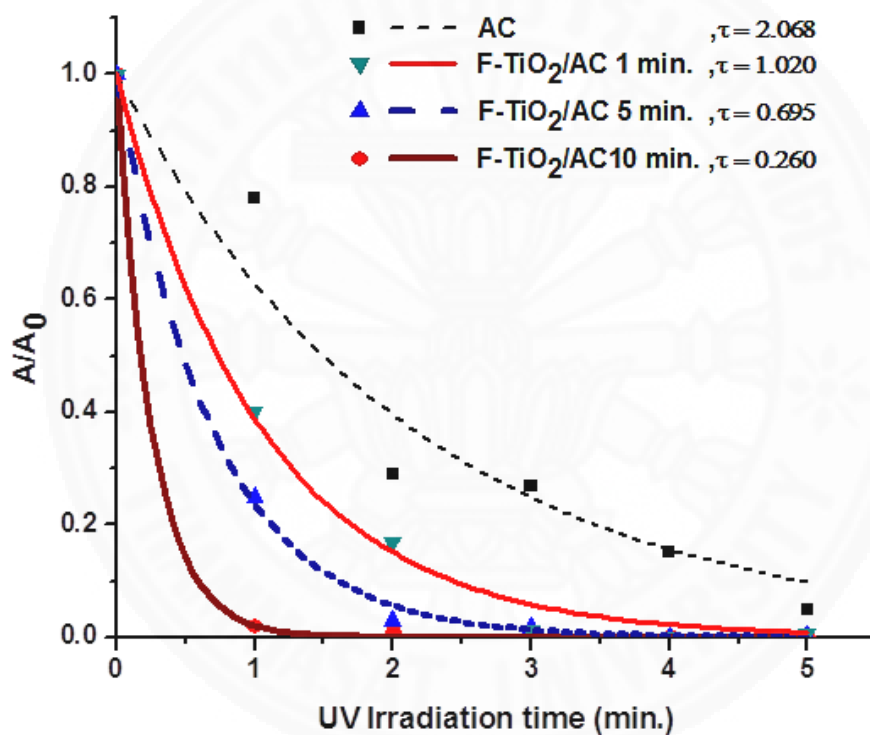
ตารางที่ 4.1

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดรูพรุน ขนาดอนุภาคและขนาดเส้นใย ค่าคงที่เวลา (τ) ของ AC TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ตามเงื่อนไขอัตราส่วนของ TTIP:2PP

ตัวอย่าง (TTIP:2-PP)		ลักษณะทาง สัณฐานวิทยา	ขนาดรูพรุน/ อนุภาค/เส้นใย	ค่าคงที่เวลา (τ) (min.)
AC		รูพรุนขนาดต่างๆ กระจายตัวบนพื้นผิว	Macropores 50-100 μm Micropores 100 nm-3 μm	2.068
TiO_2/AC	(1:5)	อนุภาคนาโนกระจายตัวหนาที่บ เสมือนเป็นแผ่นปิดรูพรุน	ขนาดอนุภาค < 80 nm	1.409
	(1:15)	อนุภาคนาโนขนาดต่างๆกระจาย ตัวบนพื้นผิว AC	ขนาดอนุภาค < 50 nm	0.659
	(1:30)	อนุภาคนาโนขนาดต่างๆกระจาย ตัวบนพื้นผิว AC	ขนาดอนุภาค < 40 nm	0.340
$\text{F-TiO}_2/\text{AC}$	(1:5)	อนุภาคนาโนเกิดการเชื่อมต่อกัน เป็นจำนวนมาก	ขนาดอนุภาค < 80 nm	0.740
	(1:15)	อนุภาคนาโนเกิดการเชื่อมต่อกัน เป็นกลุ่มคล้ายฟองน้ำ (sponge)	ขนาดอนุภาค < 50 nm	0.422
	(1:30)	อนุภาคนาโนเชื่อมต่อกันเกิดเป็น ลักษณะคล้ายเส้นใยนาโน (nano-fiber)	ขนาดเส้นใย < 250 nm ขนาดอนุภาค < 40 nm	0.260

- ผลของเวลาในการจุ่มเคลือบ

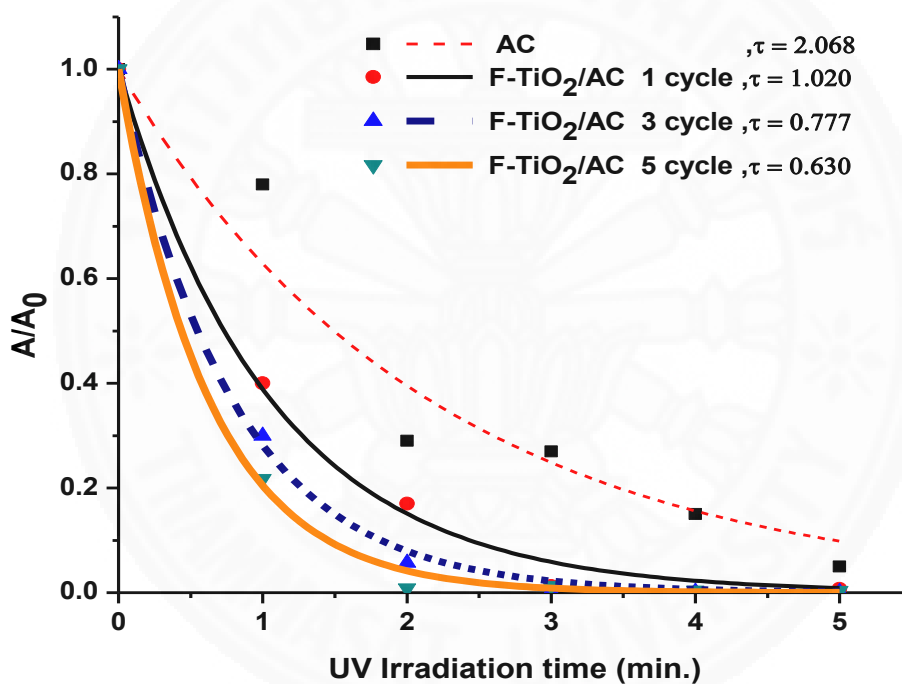
จากภาพที่ 4.10 พิจารณาผลของเวลาในการจุ่มเคลือบที่จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบ TTIP:2PP 1:30 โดยเปลี่ยนค่าเวลาในการจุ่มเคลือบคือ 1 5 และ 10 min. ค่า pH = 2 โดยมีค่าคงที่เวลาในการจางสี MB ที่เวลาในการจุ่มเคลือบ 1 5 และ 10 min. คือ 1.020 0.695 และ 0.260 ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการเคลือบนานขึ้นความสามารถในการจางสีดีขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสงช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ F-TiO₂/AC เมื่อเปลี่ยนค่าเวลาในการจุ่มเคลือบที่ 1 5 และ 10 min. ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ค่า pH =2 เปรียบเทียบกับ AC

- ผลของจำนวนครั้งในการเคลือบ

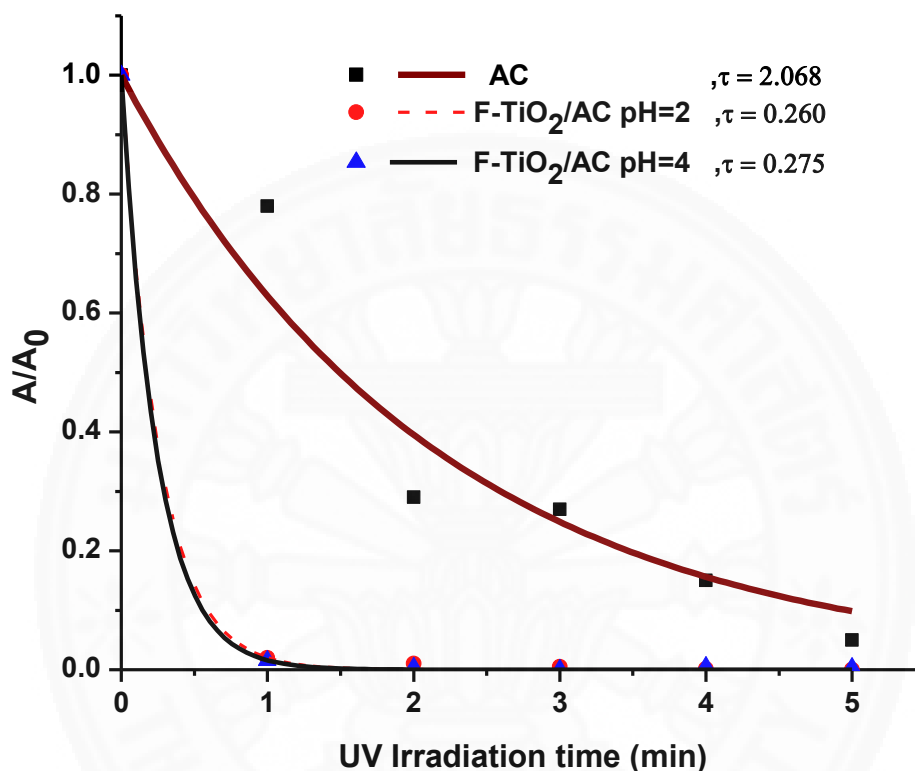
จากภาพที่ 4.11 พิจารณาผลของจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบที่เวลาในการจุ่มเคลือบ 1 min. โดยเปลี่ยนจำนวนรอบคือ 1 3 และ 5 รอบ ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ค่า pH =2 โดยมีค่าคงที่เวลาในการจางสี MB ที่จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบ 1 3 และ 5 รอบ คือ 1.020 0.777 และ 0.6300 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนในรอบการเคลือบมากขึ้นความสามารถในการจางสีดีขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสงช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ F-TiO₂/AC เมื่อเปลี่ยนจำนวนรอบในการเคลือบ ที่ 1 3 และ 5 รอบ ที่เวลาในการจุ่มเคลือบ 1 min. ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ค่า pH = 2 เปรียบเทียบกับ AC

- ผลของค่า pH ในการเตรียม F-TiO₂/AC

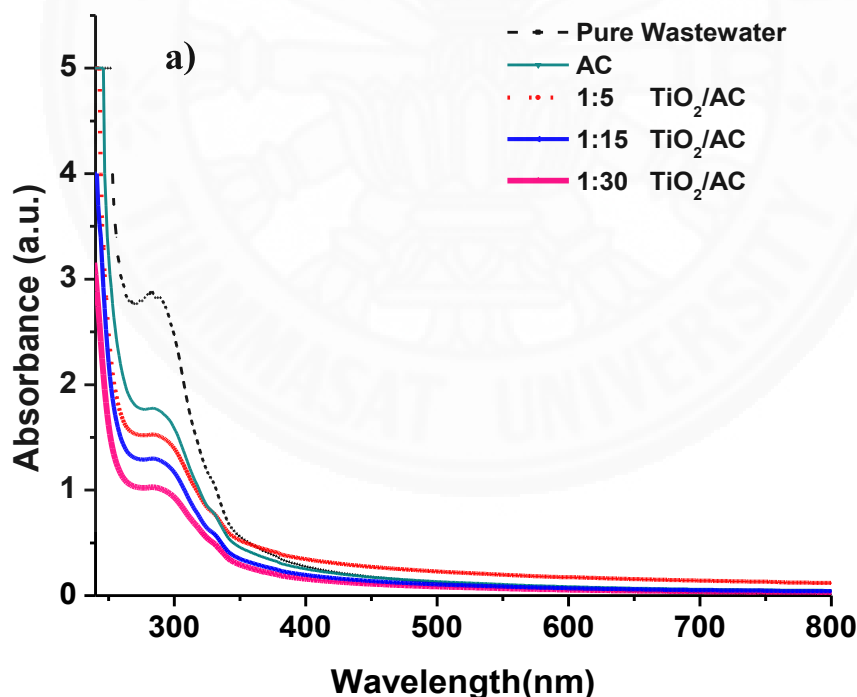
จากภาพที่ 4.12 พิจารณาผลของค่า pH ต่อความสามารถเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง TTIP:2PP 1:30 โดยเปลี่ยนค่า pH = 2 และ 4 โดยมีค่าคงที่เวลาในการจางสี MB ที่ pH = 2 คือ 0.260 และที่ pH = 4 คือ 0.275 จะเห็นได้ว่าที่ pH = 2 ให้ค่าการจางแสงที่ดี

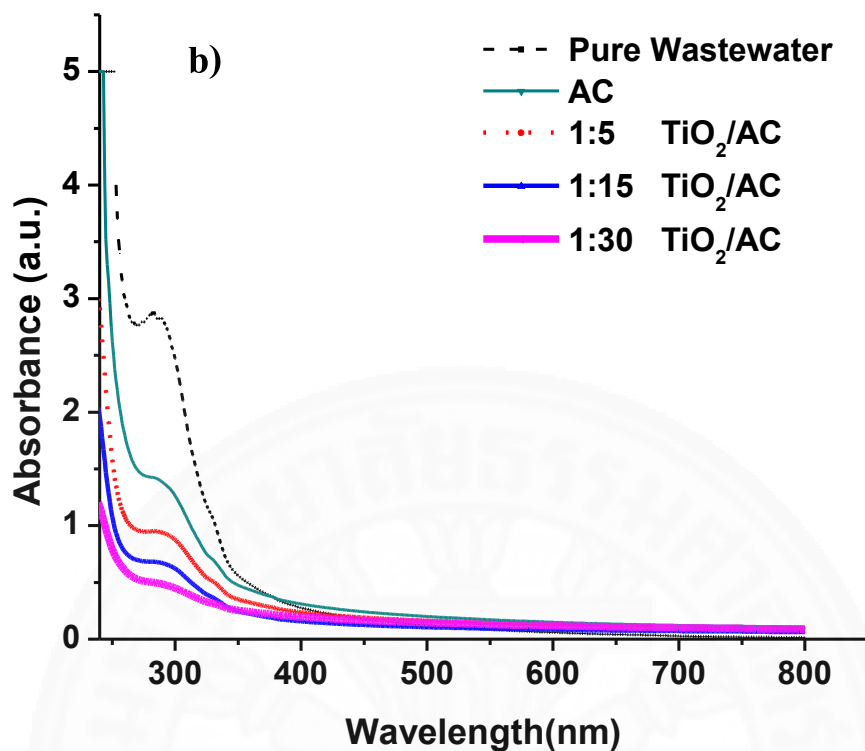


ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบการดูดกลืนของ MB หลังการฉายแสงช่วงเวลา 5 min. ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ F-TiO₂/AC เมื่อเปลี่ยนค่า pH = 2 และ pH = 4 ที่เวลาในการจุ่มเคลือบ 10 min. จำนวนรอบในการเคลือบ 1 รอบ ที่อัตราส่วน TTIP: 2PP 1:30 เปรียบเทียบกับ AC

4.1.3 ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมของ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

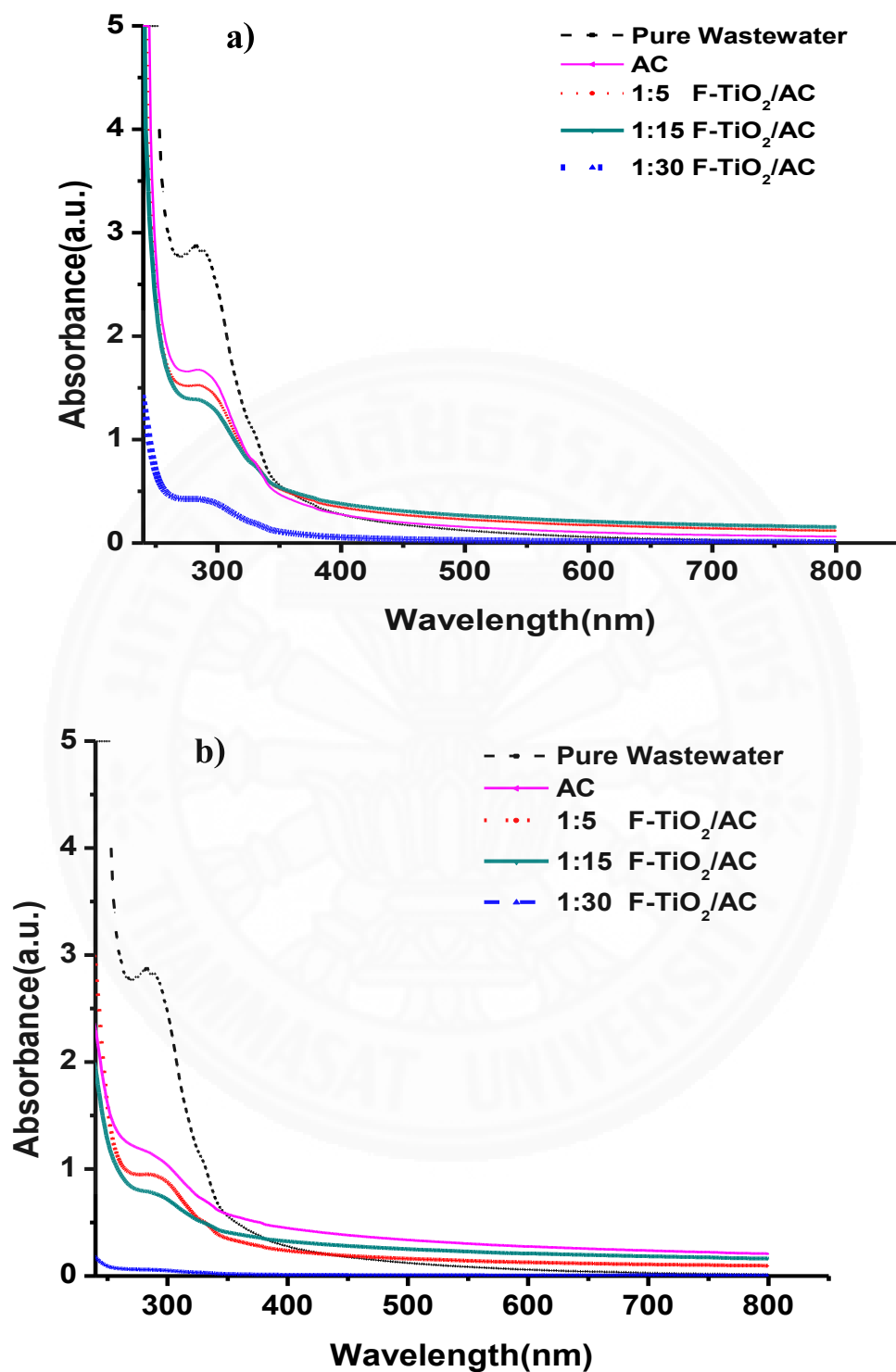
เพื่อตรวจสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของตัวอย่างจึงนำมาบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานภายใต้แสง UV โดยใช้ตัวอย่าง 10 g/น้ำเสีย 150 ml มาทดสอบโดยการคนด้วยแท่งแม่เหล็กคนตลอด 6 hr. และเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 hr. จากภาพที่ 4.13 (a) และ (b) แสดงผลการบำบัดน้ำเสียด้วย TiO_2/AC ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วน TTIP:2PP มากขึ้นทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่ดีขึ้น โดยที่ TTIP:2PP 1:30 เป็นเงื่อนไขในการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุด โดยจากสเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนอย่างชัดเจนเมื่อมีการบำบัดคือ ช่วง 270-320 nm และสเปกตรัมส่วนมากถูกดูดกลืนอยู่ในช่วง 250-400 nm ทำให้น้ำเสียก่อนการบำบัดนั้นมีสีที่ตามองเห็นเป็นสีน้ำตาลแกมเหลืองซึ่งการดูดกลืนช่วงแสงดังกล่าวทำให้น้ำตัวอย่างค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีใส



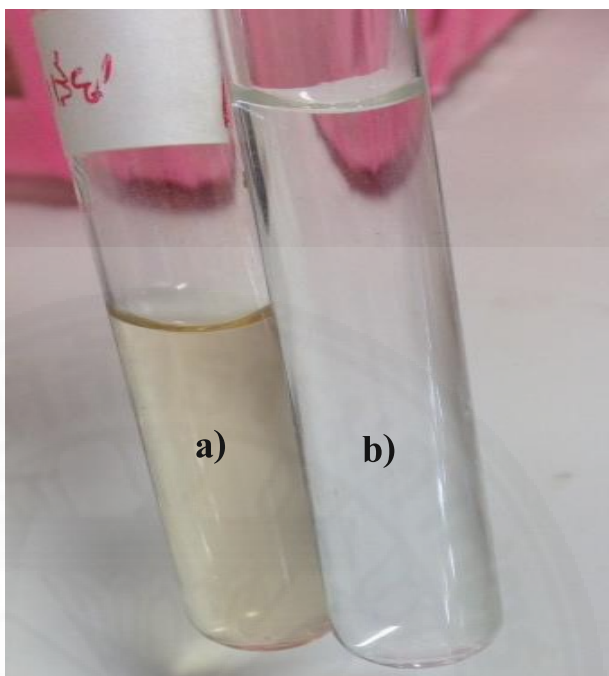


ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี TiO_2/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลังถูกฉายแสง UV (a) ที่เวลาฉายแสง 1 hr. (b) ที่เวลาฉายแสง 6 hr.

จากภาพที่ 4.14 เป็นผลของสเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วย F- TiO_2/AC ซึ่งเมื่ออัตราส่วน TTIP:2PP มากขึ้นทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีขึ้น โดยที่ TTIP:2PP 1:30 เป็นเงื่อนไขในการบำบัดที่ดีที่สุดซึ่งเห็นผลได้อย่างชัดเจนว่าตลอดช่วงเวลา 6 hr ในการบำบัดสามารถจางสีได้อย่างต่อเนื่องและใช้เวลาเพียง 6 hr. ก็สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์และเห็นน้ำเสียเปลี่ยนเป็นสีใสดังภาพที่ 4.15



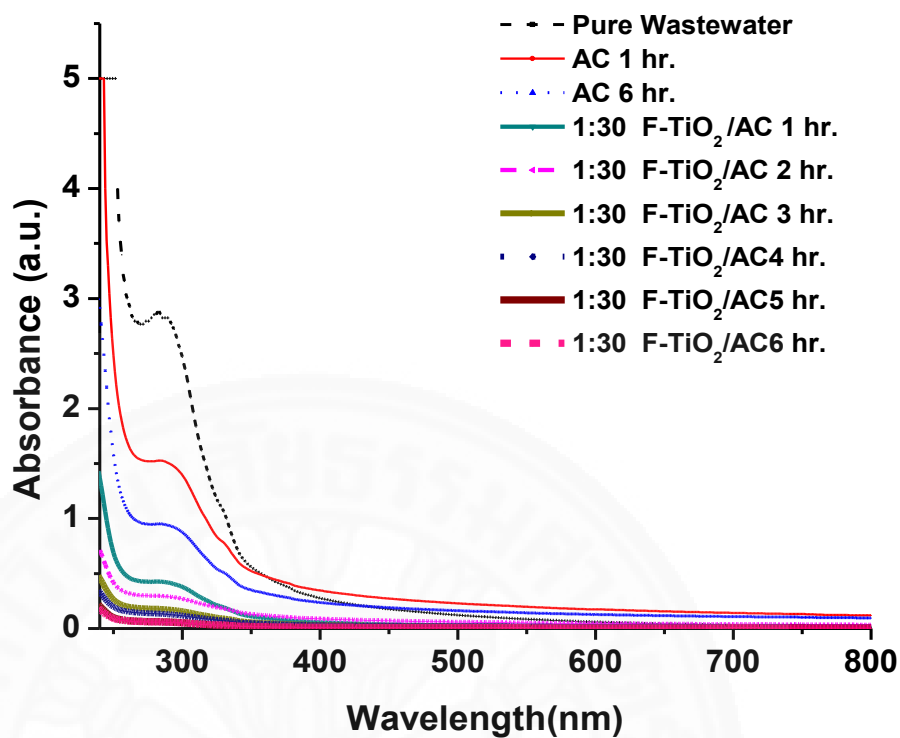
ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี F-TiO₂/AC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:5 1:15 และ 1:30 ที่เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลังถูกฉายแสง (a) ที่เวลาฉายแสง 1 hr. (b) ที่เวลาฉายแสง 6 hr.



รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย (a) น้ำเสียจริงจากโรงงาน

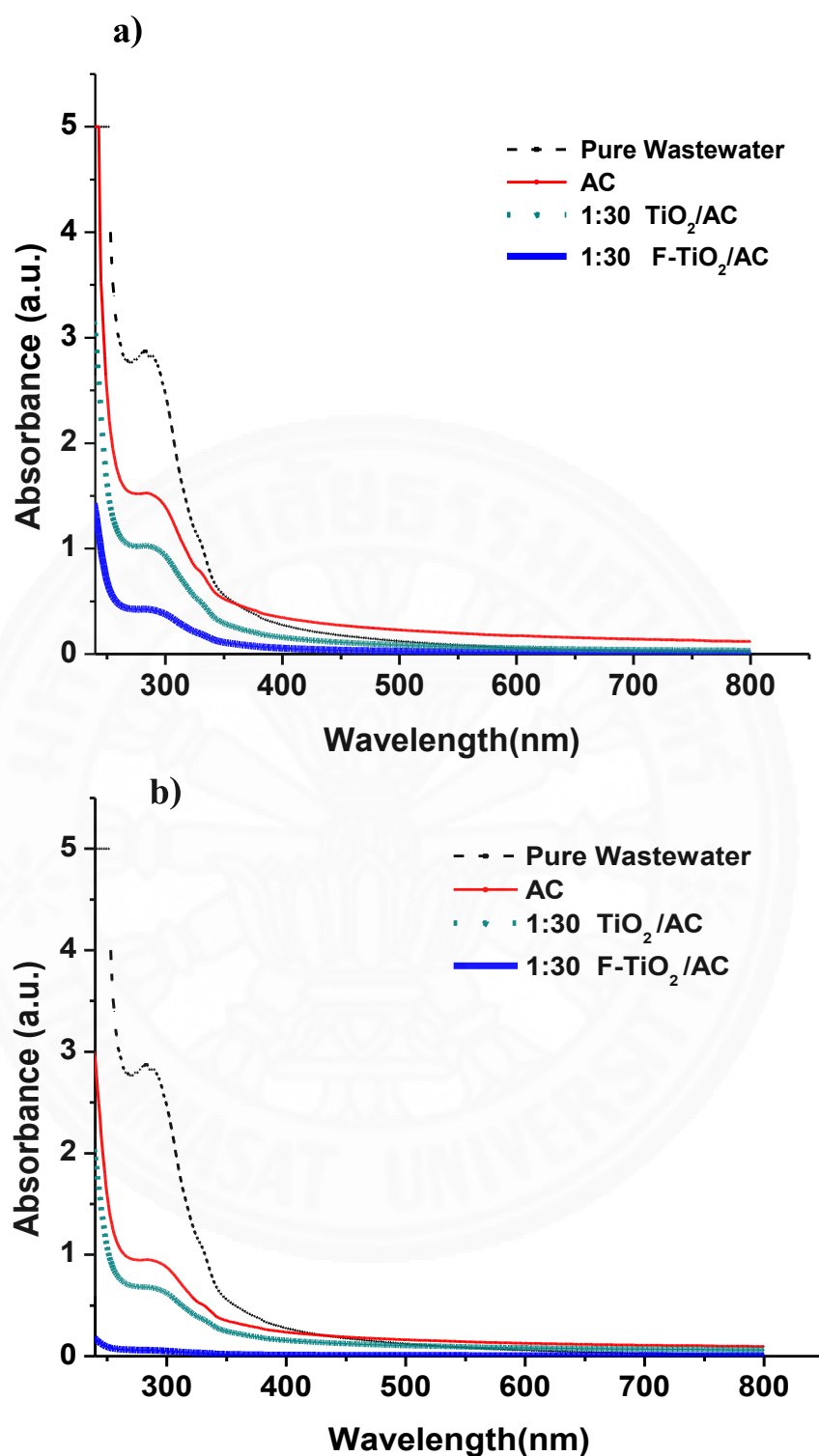
(b) น้ำเสียที่บำบัดด้วย $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นเวลา 6 hr.

จากภาพที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วย $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ตลอดช่วงเวลา 6 hr. ซึ่งเห็นผลได้อย่างชัดเจนว่าตลอดช่วงเวลา 6 hr. ในการบำบัดสามารถจางสีได้อย่างต่อเนื่องโดยความสามารถในการจางสีนั้นในช่วงชั่วโมงแรกๆ จะสามารถจางสีได้ชัดเจนและดีกว่าช่วงชั่วโมงหลัง



ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสีย โดยมี $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 ที่เวลาฉายแสง UV ที่เวลาต่างๆตลอด 6 hr. เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC

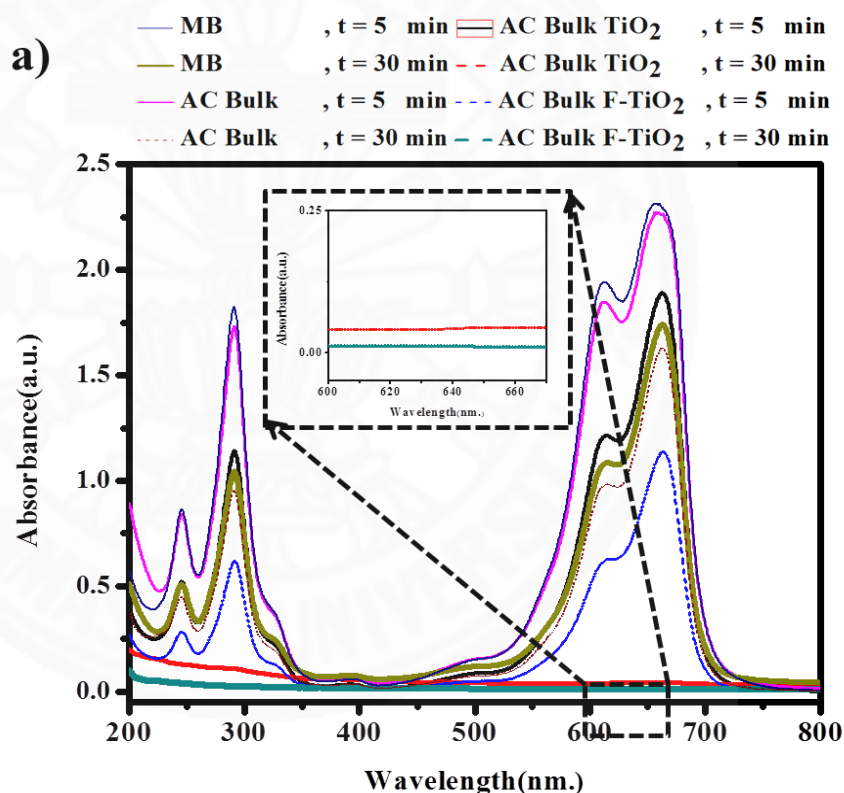
จากภาพที่ 4.17 (a) และ (b) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลา 1 hr และ 6 hr. โดยเปรียบเทียบระหว่าง TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 โดย $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ให้ผลที่ดีกว่าและดีกว่า AC เป็นอย่างมาก

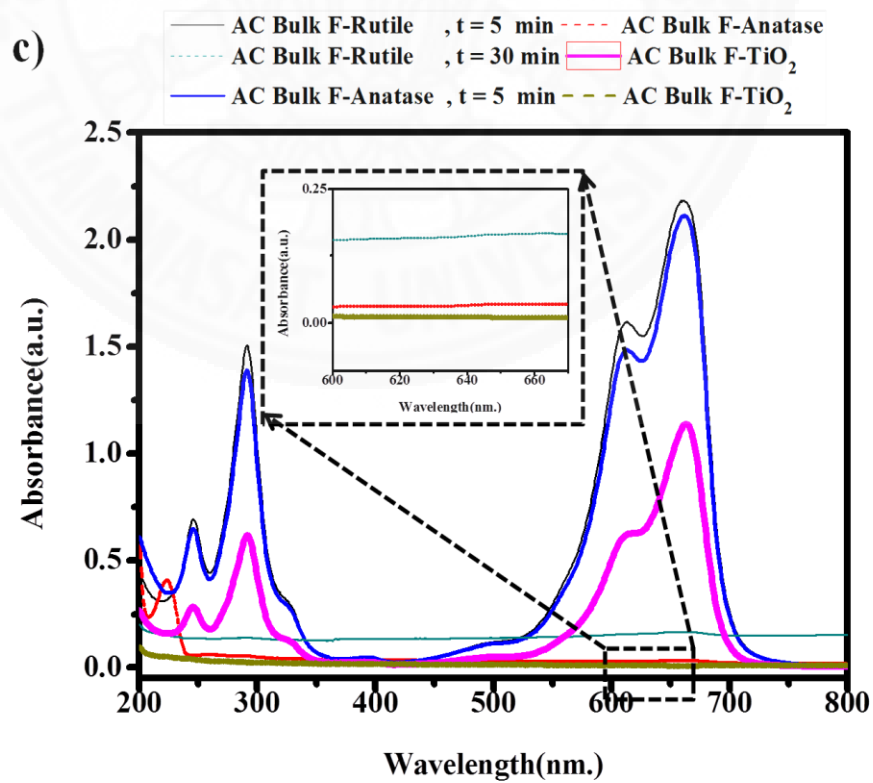
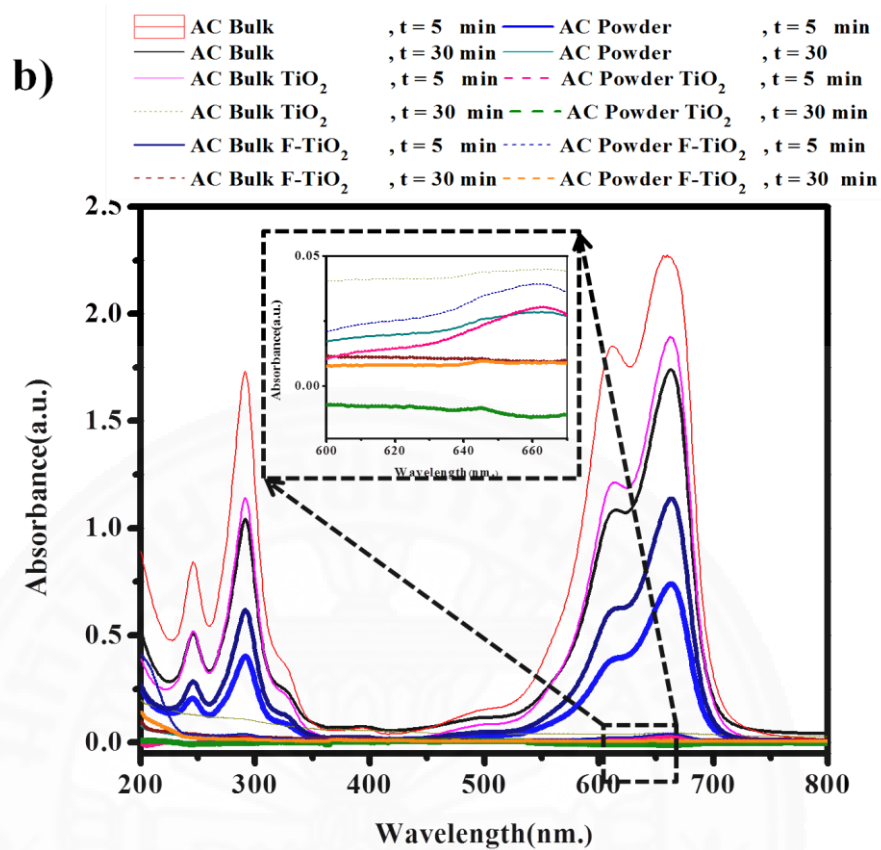


ภาพที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนของน้ำเสียเปรียบเทียบกับ TiO_2/AC และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อัตราส่วน TTIP:2PP 1:30 เปรียบเทียบกับ Pure Wastewater และ AC หลังถูกฉายแสง UV (a) 1 hr. (b) 6 hr.

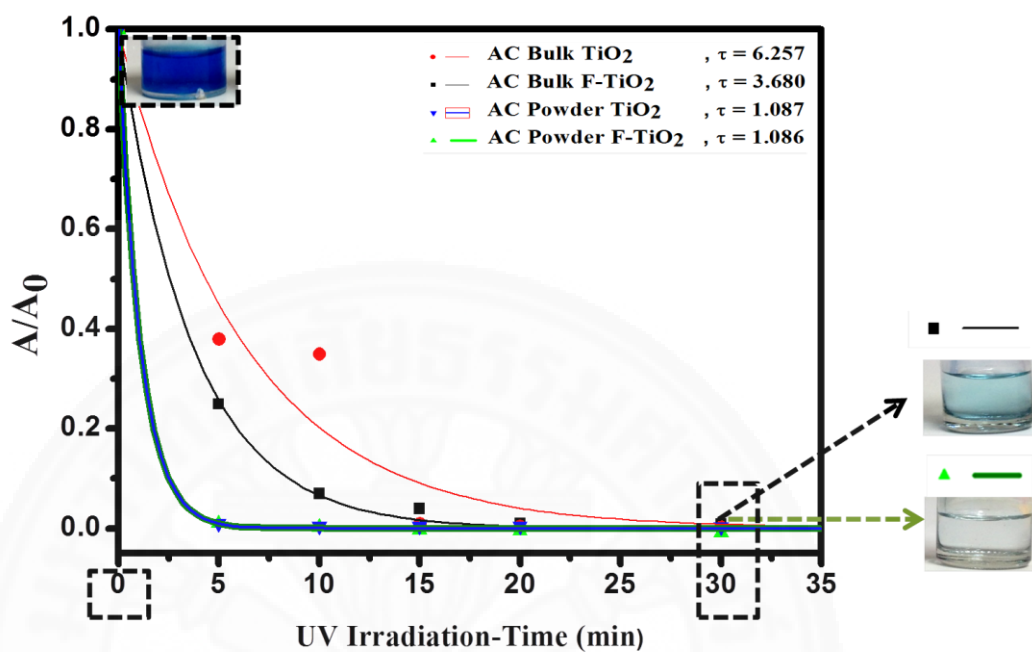
4.1.4 ความสามารถในการจางสี MB ของ TiO_2 เกรดทางการค้า และ AC แบบผง

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งในงานวิจัยนี้ทำโดยการบด AC ให้เป็นผง (AC Powder) นั้นทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดูดซับภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงได้รวดเร็วกว่า AC แบบเม็ด (AC Bulk) อีกทั้งยังศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงระหว่าง TiO_2 ที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจล และ TiO_2 เกรดทางการค้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 เกรดคือ TiO_2 เกรดทางการค้าเฟสอนาเทส (Anatase) 100% และ TiO_2 เกรดทางการค้าเฟสรูไทล์ (Rutile) 100% มาผสมกับ AC Bulk และ AC Powder เมื่อพิจารณาความสามารถในการจางสีของ MB ได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ เปรียบเทียบกันแสดงดังนี้

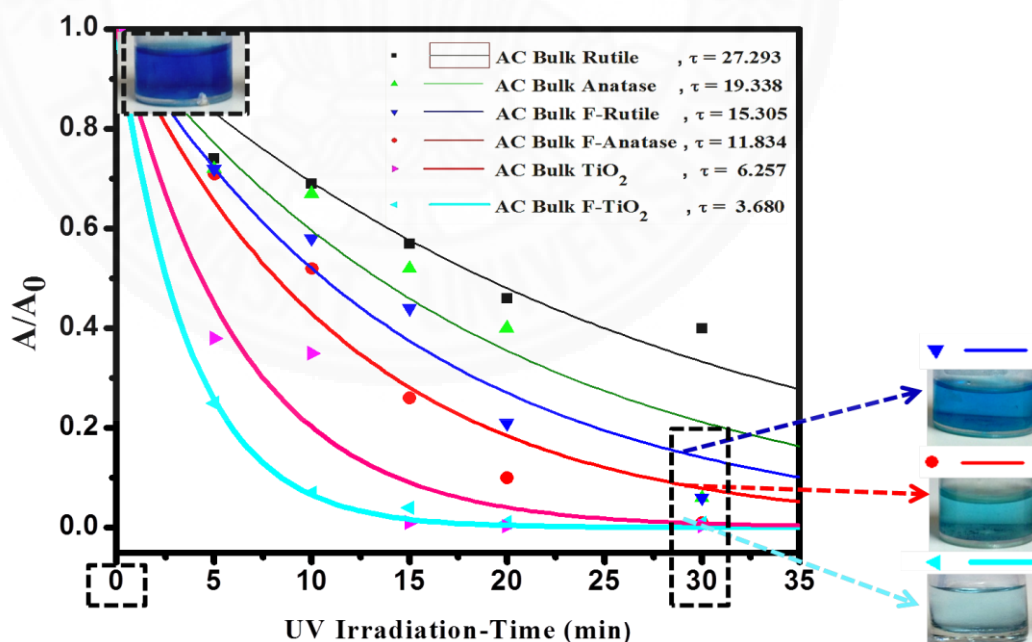




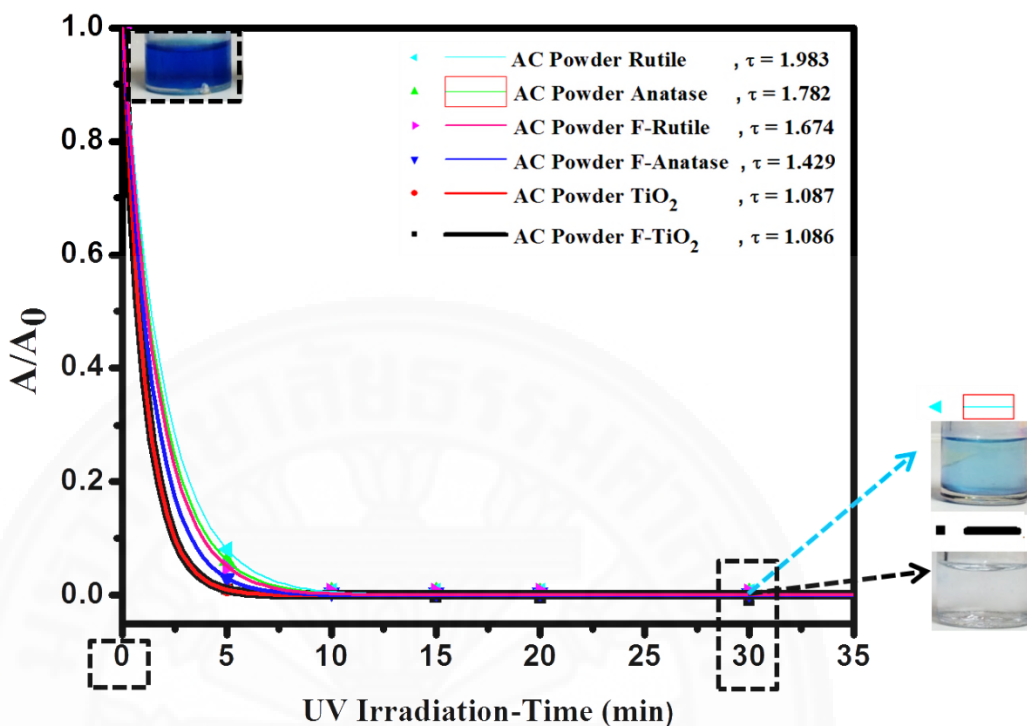
d)



e)



f)



ภาพที่ 4.18 ความเข้มข้นของ MB หลังการฉายแสงภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ

a) เปรียบเทียบ TiO_2 /AC Bulk และ F- TiO_2 /AC Bulk ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

b) เปรียบเทียบ AC Bulk และ AC Powder ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

c) เปรียบเทียบ TiO_2 เกรดทางการค้าและ TiO_2 ที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจลร่วมกับ AC Bulk และ AC Powder ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

d) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี TiO_2 /AC Bulk TiO_2 /AC Powder F- TiO_2 /AC Bulk F- TiO_2 /AC Powder เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

e) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี Rutile/AC Bulk F-Rutile/AC Bulk Anatase/AC Bulk F-Anatase /AC Bulk TiO_2 /AC Bulk และ F- TiO_2 /AC Bulk เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

f) สเปกตรัมการดูดกลืนของ MB ที่มี Rutile/AC Powder F-Rutile/AC Powder Anatase/AC Powder F-Anatase/AC Powder TiO_2 /AC Powder และ F- TiO_2 /AC Powder เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min.

จากรูปที่ 4.18 a) - c) แสดงความเข้มข้นของ MB หลังการฉายแสงภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ AC Bulk AC Powder Rutile AC Bulk F-Rutile/AC Bulk Anatase/AC Bulk F-Anatase/AC Bulk TiO_2 /AC Bulk F- TiO_2 /AC Bulk Rutile/AC Powder F-Rutile/AC Powder Anatase/AC Powder F-Anatase/AC Powder TiO_2 /AC Powder และ F- TiO_2 /AC Powder ที่เวลาฉายแสงที่ 5 และ 30 min. แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่เตรียมด้วยเงื่อนไข F- TiO_2 /AC Powder คือเงื่อนไขที่มีความสามารถในการจางสีของ MB ได้ดีที่สุดภายใต้การเตรียมสารละลาย MB ความเข้มข้น 0.05 mmol อัตราส่วนระหว่างสารละลาย MB ต่อ สารตัวอย่างคือ 400 ml:0.15 g ซึ่งสารละลาย MB เกิดการจางสีจนกลายเป็นสีใสที่เวลาฉายแสงที่ 5 min.

จากรูปที่ 4.18 d) - f) แสดงความเข้มข้นของ MB หลังการฉายแสงภายใต้การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ พบว่าที่เวลาช่วงแรกเงื่อนไขที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการที่ดีคือ TiO_2 /AC Powder และ F- TiO_2 /AC Powder แต่อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขเวลาการฉายแสงเดียวกันที่เงื่อนไข F- TiO_2 /AC Powder มีความสามารถในการจางสีของ MB มากกว่า TiO_2 /AC Powder เพราะการเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวของ TiO_2 คือการเพิ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์แคโทดไอออนิกซึ่งในที่นี้ได้ใช้ MB เป็นตัวทดสอบ เนื่องมาจากฟลูออรีนมีสมบัติที่จับ e^- ได้ดี ส่งผลให้เกิดจำนวน h^+ บนพื้นผิว TiO_2 มากขึ้น เป็นการลดกระบวนการรวมกันของ e^- - h^+ ซึ่งเมื่อ h^+ ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดหมู่ $\text{OH}^\cdot$ มากขึ้นกว่า TiO_2 ที่ไม่ได้เติมฟลูออรีน

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอของกังหันน้ำ TiO_2 และ F- TiO_2 /AC

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนั้นได้รับการอนุเคราะห์น้ำเสียจริงจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานจงสถิตย์ จำกัด ซึ่งนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆในเบื้องต้นได้ ตามมาตรฐานโดยวิธีตาม Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. (2005) มีหลายคุณลักษณะยกตัวอย่าง เช่น การวิเคราะห์สี ใช้วิธีวิเคราะห์คือ UV-VIS Spectrometer เป็นต้น

4.2.1 คุณลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจากโรงงานจงสถิตย์ จำกัด ในการทดลองนั้น นั้นเก็บน้ำในระบบน้ำหล่อเย็นน้ำเสียซึ่งก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาตินั้นจะต้องผ่านการบำบัดโดย กระบวนการใช้จุลินทรีย์เติมอากาศ (activated sludge : AS) ต่อด้วยถังตกตะกอนเพื่อกำจัดจุลินทรีย์แขวนลอยแสดงดังแผนภาพที่ 4.19 น้ำเสียมีลักษณะสีน้ำตาลแกมเหลือง มีฟองมากเนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำยาซักล้างและมีกลิ่นของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตบ้างเล็กน้อย เช่น สารฟอกขาว สีย้อม เป็นต้น



ภาพที่ 4.19 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานจงสถิตย์ จำกัด



ภาพที่ 4.20 ลักษณะน้ำเสียจากระบบหล่อเย็นของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

4.2.2 การบำบัดน้ำด้วยกังหันน้ำที่มีส่วนประกอบของ TiO_2 และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอได้นำน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าจงสถิตย์ โดยนำตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอปริมาตร 30 L โดยทำใบพัดกังหันขนาด $10.0 \times 10.5 \text{ cm}^2$ แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข ดังนี้

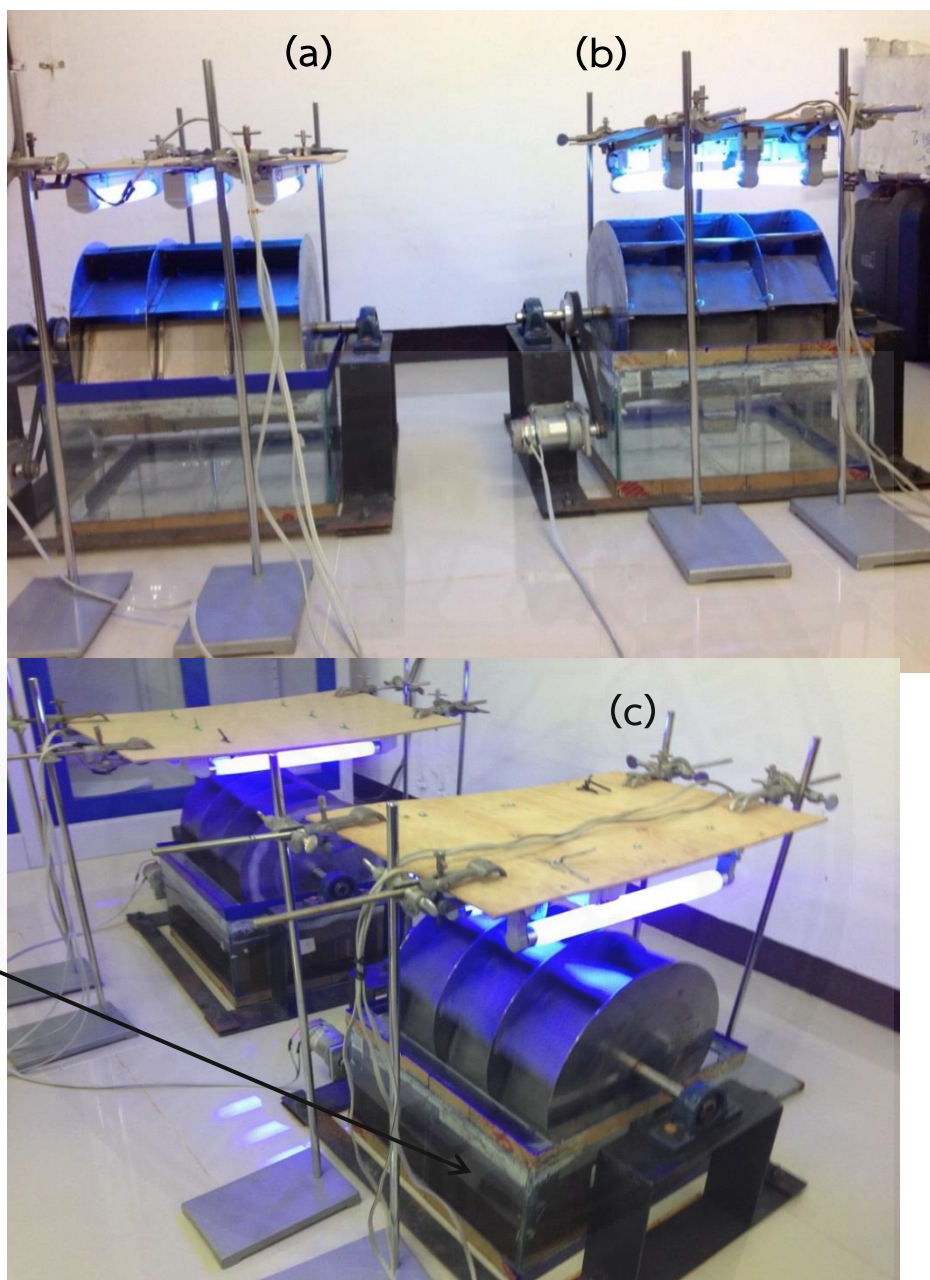
- ใบพัด TiO_2 เคลือบบนใบพัดสแตนเลส

เคลือบโดยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงที่อัตราเร็วรอบ 1500 rpm ปริมาตร 1.5 ml ทั้งสองด้าน และอบด้วยอุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 hr. และเคลือบเป็นจำนวนรอบทั้งหมด 10 รอบ

- ใบพัด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

ทำจากตะแกรงสแตนเลสห่อหุ้ม $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ปริมาณ 20 g ต่อใบพัด โดยเตรียมที่เงื่อนไข TTIP:2PP 1:30 pH = 2 จุ่มเคลือบ AC เป็นจำนวน 1 รอบ ใช้เวลาจุ่มเคลือบ 10 min. จากภาพที่ 4.21 (c) การติดตั้งในระบบการบำบัดน้ำเสียโดยฉายแสง UV ที่ความเข้มแสง 0.22 mW/cm^2 ซึ่งในขณะฉายแสง UV จะเก็บตัวอย่างทุกๆ hr. ช่วง 12 hr. แรกและเก็บทุกๆ 4 hr. ในช่วงหลังจนครบ 24 hr สุดท้ายเก็บอีกทีเมื่อเวลาผ่านไปอีก 6 hr. จนครบ 30 hr.

น้ำเสีย

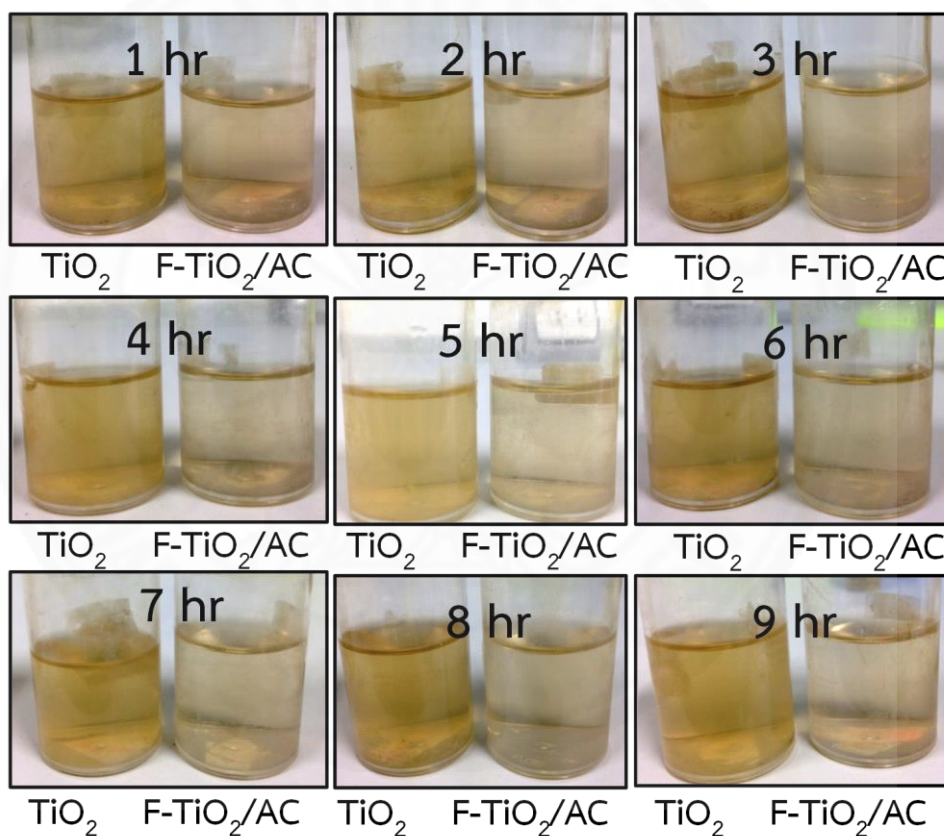


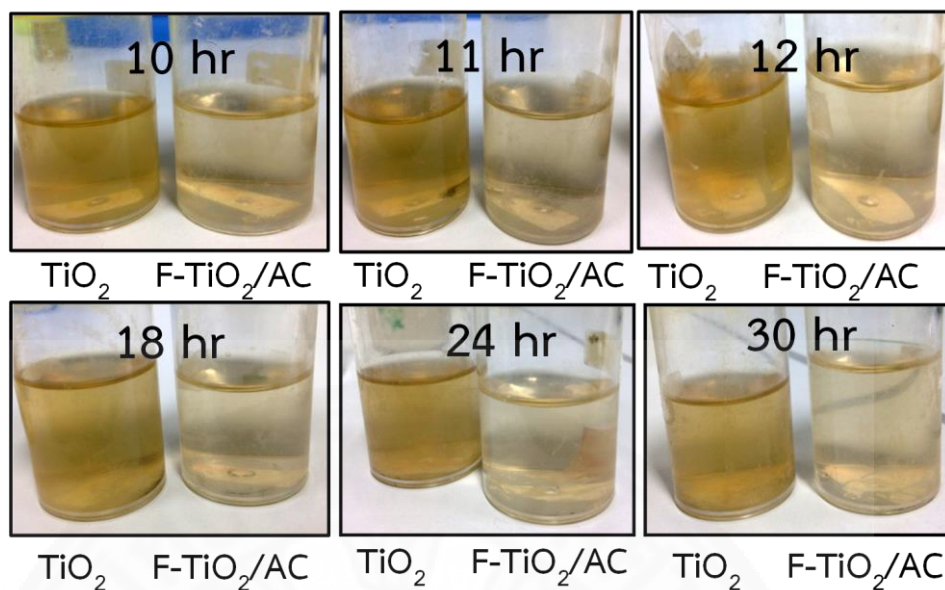
ภาพที่ 4.21 กังหันน้ำและการติดตั้ง (a) กังหันน้ำชนิดเคลือบ TiO_2 (b) กังหันน้ำที่ประกอบด้วย ใยพืด $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ และ (c) การติดตั้งสำหรับบำบัดน้ำเสีย

4.2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกังหันน้ำที่เตรียม

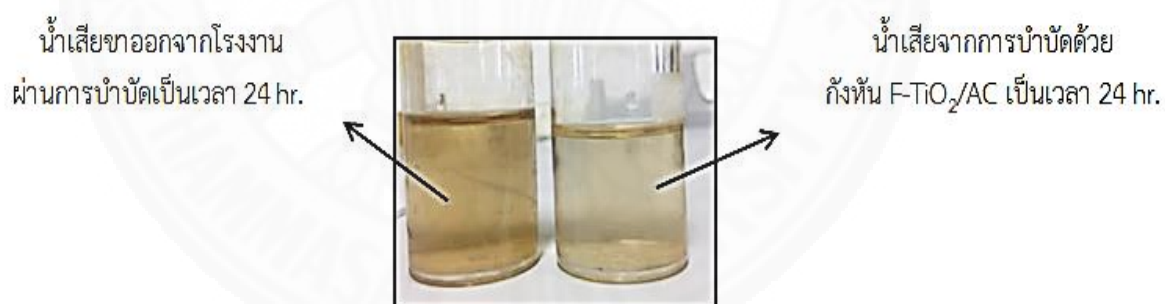
จากฟิล์มเคลือบ TiO_2 และแผ่นไบพัต $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$

จากภาพที่ 4.22 แสดงภาพถ่ายน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งจากการทดลองนำกังหันน้ำที่ไบพัตเป็น $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ มาบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเปรียบเทียบกับกังหันที่มีไบพัตเคลือบ TiO_2 โดยใช้ระยะเวลาฉายแสง UV 30 hr. ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่ากังหันน้ำที่ไบพัตเป็น $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ให้การบำบัดที่ดีกว่ากังหันน้ำไบพัตเคลือบ TiO_2 ชัดเจนและกังหันน้ำไบพัต F-TiO_2 ให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าน้ำเสียขาออกจากโรงงาน





ภาพที่ 4.22 ภาพถ่ายหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยกังหันน้ำที่ใบพัดมีส่วนประกอบของ TiO_2 และ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ ที่เวลาต่างๆหลังจากผ่านการบำบัดเป็นเวลาทั้งหมด 30 hr.



ภาพที่ 4.23 ภาพถ่ายหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยกังหันน้ำที่ใบพัดมีส่วนประกอบของ $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียกับน้ำเสียจากโรงงานที่เวลา 24 hr.

กลไกการบำบัดด้วย $\text{F-TiO}_2/\text{AC}$ เป็นการบำบัดที่อาศัยการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสียและใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงช่วยในการจางสีโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นโมเลกุลเล็กลง เนื่องจากการเติมฟลูออรีนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยไปดูดจับ

บนพื้นผิวของ TiO_2 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้โดยการแลกเปลี่ยนระหว่างหมู่ OH ที่ผิวของ TiO_2 และ F^- ทำให้เกิด Ti-F และเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด e^- ที่เกิดขึ้นถูกจับโดยออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลของออกซิเจนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเรียกว่า active oxygen species เช่น หมู่ $\text{OH}^\cdot$ และ $\text{O}_2^{\cdot-}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นเรดิคอลที่ไวในการทำปฏิกิริยาต่อสารสีและเกิดการย่อยสลายสี ซึ่งสีที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีความซับซ้อนและมีสีหลากหลายกลุ่ม โดย F-TiO_2 และ TiO_2 สามารถลดสีเนื่องจากทำให้เกิด $h^+ - e^-$ ไปดึง e^- จาก O_2 แล้วเกิดการแตกตัวกับน้ำทำให้เกิด $\text{OH}^\cdot$ และอาจจะเปลี่ยนรูปไปเป็น H_2O_2 จากไอออนของอนุมูลอิสระออกซิเจน ($\text{O}_2^{\cdot-}$) โดยที่ O_2 เป็นตัวที่เข้ารับ e^- จากอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (4.2 a)



โดย อิเล็กตรอนและโฮลจะมารวมกัน (recombination) โดยปราศจากผู้ให้อิเล็กตรอนหรือผู้รับแสงในสมการ (4.2 b)



H_2O_2 สามารถเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาของ $\text{O}_2^{\cdot-}$ ดังสมการ (4.2 c) - (4.2 f)



H_2O_2 เข้าทำปฏิกิริยาทำได้อนุมูลอิสระ $\text{OH}^\cdot$ และมีการเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่ง $\text{OH}^\cdot$ เป็นสารออกซิไดซ์เอเจนต์สามารถลดสีได้ดังแสดงในสมการที่ (4.2 g) - (4.2 i) ซึ่งสมการที่ (4.2 i) อธิบายได้ว่าสุดท้ายแล้วผลิตภัณฑ์จะได้เป็น CO_2 และ H_2O



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทดลองแบ่งออกเป็นสองตอนโดยตอนแรกคือการศึกษาเพื่อค้นหาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีโดยศึกษาเงื่อนไขต่างๆ ในการเตรียม TiO_2 ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงระหว่าง TiO_2 ที่เตรียมจากกระบวนการโซล-เจล และ TiO_2 เกรดทางการค้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 เกรดคือ Anatase และ Rutile และเงื่อนไขในการเตรียมสารละลาย NaF เพื่อเติมฟลูออรีนลงบนพื้นผิวของ TiO_2 เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 จากนั้นจึงเคลือบ TiO_2 และ F- TiO_2 ลงบน AC Bulk และ AC Powder เพื่อทดสอบคุณลักษณะที่เหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งการศึกษาคุนลักษณะได้พิจารณาถึงการศึกษาลักษณะพื้นผิว การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เป็นต้น และส่วนที่สองคือส่วนของการออกแบบกังหันน้ำ และการนำ TiO_2 และ F- TiO_2/AC ไปเป็นส่วนประกอบกับกังหันน้ำเพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเตรียม TiO_2/AC และ F- TiO_2/AC

(1) จากการศึกษาพบว่า AC มีความพรุนสูงประกอบไปด้วยรูพรุนเปิดขนาดใหญ่และรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ดังนั้นผิวเคลือบ TiO_2 และ F- TiO_2 กระจายตัวอยู่บนผิวและในรูพรุน

(2) อัตราส่วนระหว่าง TTIP:2PP โดยปริมาตรโดยอัตราส่วนของ 2PP เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการเกิดกระบวนการปฏิกิริยาด้วยแสงสูงขึ้นโดยอัตราส่วน 1:30 สามารถจางสีของ MB ได้เร็ว อีกทั้งลักษณะพื้นผิวแสดงว่าเกรนมีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดี

(3) ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการเตรียม F- TiO_2/AC โดยการเติมกรด HCl พบว่าที่ค่า pH = 2 ทำให้ F- TiO_2/AC มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีโดยที่ TTIP:2PP 1:30 ทำให้เกิดจากลักษณะโครงสร้างที่คล้ายเส้นใยนาโนและมีลักษณะเป็นเกรนขนาดเล็กจับตัวอยู่ในเส้นใยนาโน ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสมากขึ้นเนื่องจากมีลักษณะเป็น 3 มิติไม่เกิดการซ้อนทับกันเป็นพื้นผิวในลักษณะ 2 มิติ

(4) ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ F- TiO_2/AC มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า TiO_2/AC โดยพบว่า F- TiO_2/AC ที่จำนวน 10 g ต่อ MB 150 ml ใช้เวลาในการฉายแสง UV ความ

เข้มแสง 0.22 mW/cm^2 เป็นเวลา 5 min พบว่าสามารถจางสี MB กลายเป็นสีใส โดย F- TiO_2 /AC และ TiO_2 /AC มีค่าคงที่เวลาในการจางสี MB ที่ 0.260 และ 0.340 ตามลำดับ

(5) หลังการฉายแสง UV ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เวลาฉายแสง UV ที่ 5 และ 30 min. พบว่าเงื่อนไข F- TiO_2 /AC แบบผง คือเงื่อนไขที่มีความสามารถในการจางสีของ MB ได้ดีที่สุดภายใต้การเตรียมสารละลาย MB ความเข้มข้น 0.05 mmol อัตราส่วนระหว่างสารละลาย MB ต่อ สารตัวอย่างคือ $400 \text{ ml}:0.15 \text{ g}$ ซึ่งสารละลาย MB เกิดการจางสีจนกลายเป็นสีใสที่เวลาฉายแสงที่ 5 min.

(6) ภายใต้เงื่อนไขเวลาการฉายแสงเดียวกันที่เงื่อนไข F- TiO_2 /AC Powder มีความสามารถในการจางสีของ MB มากกว่า TiO_2 /AC Powder อันเกิดจากผลของการเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวของ TiO_2 เพื่อเพิ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ แคทไอออนิกซึ่งในที่นี้ได้ใช้ MB เป็นตัวทดสอบ

(7) ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ F- TiO_2 /AC มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า TiO_2 /AC ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลของการจางสี MB และเมื่อพิจารณาการจางสีพบว่าที่อัตราส่วน F- TiO_2 /AC จำนวน 10 g ต่อ น้ำเสีย 150 ml F- TiO_2 /AC สามารถจางสีจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอได้อย่างสมบูรณ์กลายเป็นสีใสภายในเวลาเพียง 6 hr.

5.1.2 การออกแบบกังหันน้ำ

การออกแบบกังหันได้มีการประยุกต์ใช้ TiO_2 และ F- TiO_2 /AC มาเป็นส่วนองค์ประกอบที่เป็นใบพัด ในการออกแบบได้ออกแบบให้ใบพัดสัมผัสกับน้ำเสียและแสงยูวีให้มากที่สุด โดยกังหันที่ออกแบบมีใบพัดทั้งหมด 24 แผ่น ขนาดใบพัด $10.0 \times 10.5 \text{ cm}^2$ โดยระบบได้ออกแบบให้มีมอเตอร์ควบคุมการหมุนเพื่อให้ใบพัดกังหันเติมอากาศเข้าสู่ น้ำเสียที่ต้องการบำบัด ด้วยระบบสามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราเร็วในการหมุนได้ ในการควบคุมอัตราการหมุนเพื่อบำบัดน้ำเสียในระบบเปิดซึ่งเป็นอัตราเร็วควบคุมให้น้ำในระบบคงที่ไม่ให้สูญเสียปริมาณน้ำเสียจากการติ้น้ำของใบพัด

5.1.3 การเตรียมใบพัดกังหันน้ำ

1) การเตรียมใบพัดกังหันเคลือบ TiO_2 ใช้วิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง การเคลือบลงบนแผ่นสแตนเลสขนาด $10.0 \times 10.5 \text{ cm}^2$ ทำได้โดยใช้ โซล-เจล 1.5 ml และอัตราการเร็วรอบในการเคลือบ 1500 rpm ฟิล์มจะกระจายตัวทั่วแผ่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 400°C ในแต่ละรอบซึ่งจำนวนรอบในการเคลือบทั้งหมดคือ 10 รอบ

2) การเตรียมใบพัดกังหัน F-TiO₂/AC โดยเตรียม F-TiO₂/AC ที่มีเงื่อนไขที่มีการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดที่ได้จากการตรวจสอบคุณลักษณะ ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่าง TTIP:2PP คือ 1:30 ความเข้มข้นสารละลาย NaF 30 mmol ที่ pH = 2 หลังจากนั้นจึงนำไปเตรียมในตาข่ายสแตนเลสขนาด 10.0 x 10.5 cm²

5.1.4 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้ในการทดลองคือน้ำเสียจากโรงงาน จงสกลิต์ จำกัด ซึ่งเป็นน้ำเสียจากการย้อมผ้าและเป็นน้ำเสียหลังจากออกจากระบบหล่อเย็นก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเติมอากาศ การบำบัดน้ำเสียทำภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง UV ความเข้มแสงเฉลี่ย 0.22 mW/cm² เปรียบเทียบระหว่างกังหันเคลือบ TiO₂ และมี F-TiO₂/AC เป็นองค์ประกอบ ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของกังหันที่มี F-TiO₂/AC เป็นองค์ประกอบของใบพัดนั้นที่เวลาในการบำบัด 24 hr. ให้ผลการบำบัดจากการจางสีที่ดีกว่ากังหันที่มีใบพัดเคลือบ TiO₂ และน้ำขุ่นออกจากโรงงาน จงสกลิต์ ที่ใช้เวลาในการบำบัด 24 hr. เท่ากันซึ่งผลการบำบัดที่ดีนั้นเกี่ยวข้องกับความสามารถดูดซับของ AC และความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ F-TiO₂

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาวิธีการเตรียม TiO₂ เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานนั้นพบว่ามีความน่าสนใจและควรศึกษาทำวิจัยเพิ่มเติมต่อไป เช่น การสร้างผิวเคลือบในรูปแบบต่าง ๆ การเจือสารเพื่อเพิ่มความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

5.2.2 ในส่วนของ F-TiO₂ นั้นยังคงต้องศึกษาและพัฒนาวิธีการนำ F-TiO₂ ไปใช้งานในส่วนของการบำบัดต่อไป โดยดูผลของฟลูออรีนว่าเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยแค่ไหนเมื่อเวลาในการบำบัดผ่านไปและมีการบำบัดหลายรอบ

5.2.3 การออกแบบกังหันควรมีการศึกษาการออกแบบเพิ่มเติมให้ตัวอย่างมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแสงและน้ำเสียให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

5.2.4 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมที่มาจากหลากหลายแหล่งโรงงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้นและควรศึกษาเพิ่มเติมในด้านค่าคุณลักษณะของน้ำเสียภายหลังการบำบัดตามมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ

รายการอ้างอิง

1. J. Arana, J. M. Dona-Rodriguez, E. Tello Rendon, C. Garriga i Cabo, O. Gonzalez-Diaz, J. A. Herrera-Melian, J. Perez-Pena, G. Colon, and J. A. Navio, "TiO₂ activation by using activated carbon as a support: Part I. Surface characterisation and decantability study," *Applied Catalysis Environmental*, vol. 44, no. 2, pp. 161–172, 2003.
2. S. S. M. Asilturk, "TiO₂-activated carbon photocatalysts: Preparation, characterization and photocatalytic activities," *Chemical Engineering Journal*, vol. 180, pp. 354–363, 2012.
3. A. Ahmadpour and D. D. Do, "The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation," *Carbon*, vol. 35, no. 12, pp. 1723–1732, 1997.
4. X. Zhang and L. Lei, "Effect of preparation methods on the structure and catalytic performance of TiO₂/AC photocatalysts," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 153, no. 1–2, pp. 827–833, 2008.
5. Y. Li, M. Ma, S. Sun, X. Wang, W. Yan, and Y. Ouyang, "Preparation and photocatalytic activity of TiO₂-carbon surface composites by supercritical pretreatment and sol-gel process," *Catalysis Communications*, vol. 9, no. 7, pp. 1583–1587, 2008.
6. K. S. W. Sing, "Overview of Physical Adsorption by Carbons," in *Adsorption by Carbons*, E. J. Bottani and J. M. D. Tascon, Eds. Amsterdam: Elsevier, pp. 3–14, 2008.
7. J. Lyklema, "Discrimination between physical and chemical adsorption of ions on oxides," *Colloids and Surfaces*, vol. 37, pp. 197–204, 1989.
8. L. Youji, M. Mingyuan, S. Shuguo, W. Xiaohong, Y. Wenbin, O. Yuzhu, "Preparation and photocatalytic activity of TiO₂ carbon surface composites by supercritical pretreatment and sol-gel process" *Catalysis Communications* 9, pp. 1583–1587, 2008.
9. M. A. Barakat, "Adsorption and photo degradation of Procion yellow H-EXL dye in textile wastewater over TiO₂ suspension," *Journal of Hydro-environment Research*, 2011.

11. S. Chin, E. Park, M. Kim, and J. Jurng, "Photocatalytic degradation of methylene blue with TiO₂ nanoparticles prepared by a thermal decomposition process," Powder Technology, vol. 201, no. 2, pp. 171–176, 2010.
12. U. Diebold, "The surface science of titanium dioxide", Surface Science Report 48, 2003.
13. F.Akira, N.R.Tata ,and A. Donald , "Titanium dioxide photocatalysis", Journal of Photochemistry and Photobiology,2000.
14. K.Y.Foo, B.H.Hameed , "Decontamination of textile wastewater via TiO₂/activated carbon composite materials", Advances in Colloid and Interface Science, pp.130–143, 2010.
15. P.Zeman, S.Takabayashi , "Nano-scale photocatalytic TiO₂ thin films prepared by magnetron sputtering", Thin Solid Films, 2003.
16. M. Yamagishi, S.Kuriki, P.K. Song and Y. Shigesato, "Thin films TiO₂ photocatalyst deposited by reactive magnetron sputtering",Thin Solid Films, 2003.
17. P.Zeman and S.Takabayashi, "Effect of totol and oxygen patial pressures on structure of photocatalytic TiO₂ films sputtered on unheated substrate",Surface and Coatings Technology,2002.
18. S. Qourzal, A. Assabbane, and Y. Ait-Ichou, "Synthesis of TiO₂ via hydrolysis of titatiumtetraisopropoxide and its photocatalytic activity on a suspended mixture with activated carbon in the degradation of 2-naphthol",Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry ,2004.
19. N.M. Igor and J.K. Kenneth., "Comparative study of TiO₂ particles in powder form and as a thin nanostructured film on quartz",Journal of Catalysis, 2004.
20. J. Yu, X. Zhao and Q. Zhao. , " Photocatalytic activity of nanometer TiO₂ thin films prepared by the sol–gel method",Materials Chemistry and Physics, 2001.
21. D.J. Kim, S.H. Hahn, S.H. Oh and E.J. Kim, "Influence of calcinations temperature on structural and optical properties of TiO₂ thin films prepared by sol–gel dip coating",Materials Letters, 2002.

22. S.K. Zheng, G. Xiang, T.M. Wang, F. Pan, C. Wang, and W.C. Hao, “ Photocatalytic activity studies of TiO_2 thin films prepared by r.f. magnetron reactive sputtering”, *Vacuum*, 2004.
23. J.M. Wu, and T.W. Zhang, “ Photodegradation of rhodamine B in water assisted by titania films prepared through a novel procedure”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2004.
24. J.Y. Zhang, I.W. Boyd, B.J. O’Sullivan, P.K. Hurley, P.V. Kelly and J.-P. Senateur, “ Nanocrystalline TiO_2 films studied by optical, XRD and FTIR spectroscopy”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002.
25. I.Chuasontia, K. Hathaisamit and S. Pudwat, “Effect of Surface Fluorination on Photocatalytic Activity of Titania Nano-Powder”, 5th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2013 (ISEEC 2013), December 18-20, 2013.
26. S. Pudwat, I. Chuasontai, K. Hathaisamit, K. Aiempanakit, M. Horprathum and P. Limsuwan, “Preparation of Titanium Dioxide Films on Water Wheel for Domestic Wastewater Treatment”, International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2013), 20-22 FEB 2013.
27. S. Pudwat , I. Chuasontai, S. Kunapermsiri, T. Preansaythong and K. Hathaisamit “A Study of Photocatalytic Activity of TiO_2 Films on Water Wheel for MB Degradation”, 4th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2012 (ISEEC 2012), December 11-14, 2012.
28. D.G. Syarif, A. Miyashita, T.Yamaki, T.SumitaY. Choi, and H. Itoh, “Preparation of anatase and rutile thin films by controlling oxygen partial pressure”, *Applied Surface Science*, pp.287–292,2002.
29. A.C. Rodrigues, M. Boroski, N.S. Shimada, J.C. Garcia, J. Nozaki and N. Hioka, “Treatment of paper pulp and paper mill wastewater by coagulation-flucculation followed by heterogeneous photocatalysis”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2008.

30. P. A. Pekakis, N. P. Xekoukoulotakis and D. Mantzavinos, "Treatment of textile dyehouse wastewater by TiO_2 photocatalysis", *WATER RESEARCH*, pp.1276–1286, 2006.
31. W. S. Kuo and P.H. Ho, "Solar photocatalytic decolorization of dyes in solution with TiO_2 ", *Dyes and Pigments* , pp.212-217, 2006.
32. M.Toyoda, Y.Nanbu ,T.Kitob , M.Himnob and M.Inagakib , " Preparation and performance of anatase-loaded porous carbons for water purification, *Desalination* 159, pp.273-282, 2003.
33. Li Y., Li J., Ma M.Y., Ouyang Y.Z. and Yan W.B, "Prepaaration of TiO_2 /active carbon with Fe ions doping photocatalyst and its application to photocatalytic dedradation of reactive brilliant red K2G", *Science in China Series B: Chemistry*, pp.1113-1119, 2009.
34. รัชณิญา ทับปลา, เฉลิมพันธ์ งามโสภาสิริสกุล และอภิสิทธิ์ ศงสะเสน, "การบำบัดสีย้อมเมทิลลีนบูลโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยึดเกาะบนถ่านจากขี้ข้าวโพด", ในการสัมมนาทางวิชาการเรื่อง The 35th Congress on Science and Technology of Thailand (STT35), มหาวิทยาลัยบูรพา , 2552.
35. M.Kaneko and I.Okura. "Photocatalysis science and technology", Kodansha and springer, 2002.
- [36. G.Parker, "Introductory semiconductor device physics", Prentice Hall Europe (UK), 1994.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวจันทร์จิรา ศิวะประทานกุล
วันเดือนปีเกิด	วันจันทร์ที่ 10 กันยายน พ.ศ.2533
ทุนการศึกษา	ทุนผู้ช่วยวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2556 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

งานประชุมวิชาการ

J.Sivapatarnkun, N.Singhamarasri and S. Pudwat, “Films-Spreading and Photocatalytic Activities of F-TiO₂ Films on Stainless Steel Coated by Spin Coating Method”, The 8th Annual Conference of The Thai Physics Society, Siam Physics Congress (SPC2013), Mach 22-23, 2013.

J.Sivapatarnkun, K.Hathaisamit and S. Pudwat, “Surface Morphology and Pholtocatalytic Activity of F-TiO₂/AC Prepared by Sol-Gel and Dipped Coating Technique”, Pure and Applied Chemistry International Conference 2014 (PACCON 2014), January 8-10, 2014.

J.Sivapatarnkun, K.Hathaisamit and S. Pudwat “Enhancement for Photocatalytic Activity of TiO₂ Combined with Activated Carbon under Surface Fluorination (F-TiO₂/AC)”, The 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA 2015), 28 –30 May 2015.

ผลงานระดับนานาชาติ

J.Sivapatarnkun, K.Hathaisamit and S. Pudwat, “Surface Morphology and Photocatalytic Activity of F-TiO₂/AC Prepared by Sol-Gel and Dipped Coating Technique”, Pure and Applied Chemistry International Conference 2014 (PACCON 2014).

J. Sivapatarnkun, K. Hathaisamit, S. Pudwat, "Enhancement for Photocatalytic Activity of TiO₂ Combined with Activated Carbon under Surface Fluorination (F-TiO₂/AC)", Key Engineering Materials, Vols. 675-676, pp. 560-563, 2016.



