การกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

COLOR REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY PHOTOCATALYTIC PROCESS WITH TiO_2-NANOTUBES PHOTOCATALYST

กาญจนา ลอยทะเล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

กาญจนา ลอยทะเล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์
	Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process with TiO_2-nanotubes Photocatalyst
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวกาญจนา ลอยทะเล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์, วศ.ด.)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์
ชื่อ -นามสกุล	นางสาวกาญจนา ลอยทะเล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว มีองค์ประกอบที่ยากต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

โดยการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยกระบวนการแอโนไดเซชัน ที่ค่าความต่างศักย์แตกต่างกัน 4 ค่า โดยใช้สี 2 ชนิด ได้แก่ IC และ RB5 รวมถึงศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ FE-SEM และ XRF ซึ่งระบุองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาและ แสดงให้เห็นพื้นที่ผิว เป็นหลุมในลักษณะท่อ (Nanotubes)

สำหรับการศึกษา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสี IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาข้างต้น และกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,580 $\mu W/cm^2$ พบว่า กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสี เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุดของสี IC เท่ากับ 0.8 μM , RB5 เท่ากับ 2.0 μM โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสีของ IC และ RB5 เท่ากับ 76.19% และ 65.59 % ตามลำดับ สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดย สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสี IC และ RB5 มีค่าเท่ากับ 0.0176 min^{-1} และ 0.013 min^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ : แอโนไดเซชัน โฟโตออกซิเดชัน นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Thesis Title	Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process with TiO_2-nanotubes Photocatalyst
Name - Surname	Miss Kanjana Loytala
Program	Civil Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Thammasak Rojviroon, D.Eng.
Academic Year	2018

ABSTRACT

This research aimed to study the performance of color removal from synthetic wastewater by photocatalytic process with TiO_2-nanotubes.The characteristics of synthetic wastewater comprised of non-biodegradable.

The study compared the color removal efficiencies titanium dioxide nanotubes photocatalyst that prepared by the anodizing process with four different electric potentials with and using two types of colors, i.e. IC and RB5.The physical characteristics of the prepared photocatalysts were investigated by XRF and FE-SEM that identified the elements of the catalysts and revealed nanotube characteristic of the surface.

The results indicate that the crystalline structure of TiO_2. For the photocatalytic activity test , the color removal efficiency of IC and RB5 by this process with TiO_2- nanotubes photocatalyst under UVA light source of 1,580 $\mu W/cm^2$ revealed that the highest efficiency percentages were 76.19% and 65.59%, respectively for IC and RB5 with the initial concentrations of IC and RB5 of 0.8 μM and RB5 2.0 μM, respectively. The kinetics of the color removal from synthetic wastewater by photocatalytic process with TiO_2-nanotubes photocatalyst under UVA light source were described by the 1st-order equation kinetics model. The specific rates of the color removal for IC and RB5 were 0.0176 min^{-1} and 0.013 min^{-1}, respectively.

Keywords : Anodization, Photo-oxidation, Nano-TiO_2

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษางานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรวรรณ โรจน์วิรุฬห์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรุงวิทย์ บุญโนรัตน์ ประธานกรรมการสอบ รวมถึงขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในการสอบครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ และมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ นางอารมณ์ ลอยทะเล (คุณแม่) และครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยนี้ ร่วมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ ร่วมถึงภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมถึงขอขอบคุณบุคลากรเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธาที่ให้ความช่วยเหลือในสิ่งต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจหากงานวิจัยในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

กาญจนา ลอยทะเล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	13
1.2 วัตถุประสงค์	14
1.3 ขอบเขตการศึกษา	14
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic Process)	15
2.2 ปฏิกิริยาไทเทียมไดออกไซด์	17
2.3 สมบัติเฉพาะตัวของไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2)	20
2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก	21
2.5 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	24
2.6 กระบวนการแอโนไดเซชัน	28
2.7 สีย้อม	32
2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	37
2.9 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก	38
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	47
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.. 48

3.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน 49

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

TiO_2 Nanotubes…………………………………………………………………... 50

3.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสี IC และ RB 5... 51

3.6 การหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก 52

3.7 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในน้ำเสียสังเคราะห์........ 53

3.8 สถานที่ทำการศึกษา.. 53

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.. 54

4.1 การวิเคราะห์หาลักษณะสัณฐานและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

TiO_2 Nanotubes………………………………………………………………….. 54

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 ด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.............. 60

4.3 จลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ สี RB5 ด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา................. 66

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.. 74

5.1 สรุปผลการทดลอง.. 74

5.2 ข้อเสนอแนะ.. 75

บรรณานุกรม... 76

ภาคผนวก.. 83

ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.. 74

ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐาน.. 95

ภาคผนวก ค อุปกรณ์วิเคราะห์ผลการทดลอง และคุณสมบัติทางกายภาพ................. 97

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.. 102

ภาคผนวก จ สี IC และ RB5.. 104

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ TiO_2...	20
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติลักษณะของ TiO_2..	20
ตารางที่ 2.3 แสงอัลตราไวโอเลตสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วงคลื่น.....................................	23
ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของการเคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจล ……………………	26
ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสี Indigo Carmine.......................	36
ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสี Reactive Black 5.....................	36
ตารางที่ 3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่แปรผันค่าความต่างศักย์...............	49
ตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes............................	49
ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่เตรียมขึ้น.......................	59
ตารางที่ ก.1 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.8 μM.....	75
ตารางที่ ก.2 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.0 μM….	75
ตารางที่ ก.3 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.2 μM….	76
ตารางที่ ก.4 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.4 μM….	76
ตารางที่ ก.5 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.6 μM….	77
ตารางที่ ก.6 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 2.0 μM..	77
ตารางที่ ก.7 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 4.0 μM..	78
ตารางที่ ก.8 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 6.0 μM..	78
ตารางที่ ก.9 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 8.0 μM..	79
ตารางที่ ก.10 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 10.0 μM..	79

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.... 18

รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์........ 19

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนกระบวนการโซล–เจล และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ........ 26

รูปที่ 2.4 ลักษณะอนุภาคนาโนจากกระบวนการโซล – เจล........ 27

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง........ 28

รูปที่ 2.6 ลักษณะเส้นใยนาโนจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง........ 28

รูปที่ 2.7 ลักษณะ Nanotubes จากกระบวนการแอโนไดเซชัน........ 29

รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบในกระบวนการแอโนไดเซชัน........ 29

รูปที่ 2.9 กลไกลการก่อตัวของ TiO_2 แบบ Nanotubes........ 32

รูปที่ 2.10 โครงสร้างสี IC........ 35

รูปที่ 2.11 โครงสร้างสี RB5........ 35

รูปที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์........ 46

รูปที่ 3.2 วิธีการทำความสะอาดแผ่น Ti........ 47

รูปที่ 3.3 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน........ 48

รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes........ 50

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน....... 50

รูปที่ 3.6 ชุดทดลอง Photoreactor........ 51

รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี IC ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย 53
กระบวนการโฟโตคะตะลิติก........

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก........ 55

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย 2 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ FE-SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า........ 56

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ FE-SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า........ 57

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ XRF................................ 58
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี IC ที่ผ่านการบำบัดด้วย
กระบวนการโฟโตคะ ตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes...... 60
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี RB5 ที่ผ่านการบำบัดด้วย
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes......... 60
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับ
ความเข้มข้นของ สี IC โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.................... 61
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับ
ความเข้มข้นของสี RB5 โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา................. 62
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสีย........ 64
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสีย........ 64
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสี IC ที่ใช้ในการทดลอง 81
รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสี RB5 ที่ใช้ในการทดลอง 81
รูปที่ ค.1 แผ่น Ti 83
รูปที่ ค.2 แผ่นแกรไฟต์.. 83
รูปที่ ค.3 ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า.. 84
รูปที่ ค.4 ชุดทดลอง Photoreactor 84
รูปที่ ค.5 สเปกโตโฟโตมิเตอร์ รุ่น HACH DR/2010.. 85
รูปที่ ค.6 เครื่องอัลตราโซนิค.. 85
รูปที่ ค.7 เครื่อง FE-SEM.. 86
รูปที่ ค.8 เครื่อง XRF 86
รูปที่ จ.1 การบำบัดสี IC ที่ความเข้มข้น 1.6 μM เมื่อเวลาผ่านไป 90 min 89
รูปที่ จ.2 การบำบัดสี RB5 ที่ความเข้มข้น 10 μM เมื่อเวลาผ่านไป 90 min 89

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส
cm	เซนติเมตร
e^{-}_{A}	พลังงานเข้าสู่แถบไฟฟ้า
F^{-}	ฟลูออไรด์ไอออน
FE-SEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
$g.mol^{-1}$	กรัมต่อโมล
hr	ชั่วโมง
$h\nu$	ไม่ใช่ตัวนี้
IC	Indigo Carmine
$m^{2}.g^{-1}$	ตารางเมตรต่อกรัม
min	นาที
min^{-1}	ต่อนาที
μM	ไมโครโมลาร์
μm	ไมโครเมตร
$\mu W.cm^{-2}$	ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
nm	นาโนเมตร
$\bullet O_2^{-}$	Superoxide anion
OH^{-}	Hydroxyl ion
•OH	Hydroxyl radical
RB5	Reactive Black 5
λ	ความยาวคลื่นแสง
Ti	ไทเทเนียม
Ti^{4+}	ไทเทเนียมไอออน
TiF_6^{2-}	ฟลูออไรด์ไอออนในน้ำ
TiO_2 Nanotubes	ไทเทนียมนาโนทิวบ์
V	โวลต์
XRF	X-Ray Fluorescence

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำและสารเคมี ในกระบวนการผลิตเป็นปริมาณมาก น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจึงมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียปนเปื้อนออกมา มีสีที่น่ารังเกียจ และมีกลิ่นที่แรง นอกจากนี้ยังพบว่า สีที่พบในน้ำเสียมีอนุภาคคอลลอยด์มีผลให้แสงอาทิตย์ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำได้ไม่ดี และมีผลกระทบกับพืชในน้ำ ทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำลดลง มีผลต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำอาจตายได้ [1]

การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่ไม่สามารถบำบัดสีย้อมได้ เนื่องจากสีย้อมมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อนยากต่อการบำบัด นอกจากนี้เมื่อในบางกรณีน้ำเสียที่มีสีย้อมเป็นองค์ประกอบเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแล้วอาจก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษได้ โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายกระบวนการ ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [2] การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี [3] กระบวนการโฟโตคะตะลิติก [4] เป็นต้น สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียได้ดี โดยกระบวนการดังกล่าวจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [4] เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมากที่สุด เนื่องจาก TiO_2 มีช่องว่างพลังงานที่แคบ ดูดกลืนแสง และแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดี สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ คงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี อีกทั้งยังไม่มีความเป็นพิษและราคาถูก [5-6] สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสงในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้การพัฒนาวิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไฮโดรเทอร์มอล [7] โซลเจล [8] และแอโนไดเซชัน [9] เป็นต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้สี 2 ชนิด ได้แก่ Indigo Carmine (IC) และ Reactive Black 5 (RB5) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ (TiO_2 Nanotubes) ที่เตรียมขึ้นโดยวิธีแอโนไดเซชัน แล้ววิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.2.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.2.3 หาประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.2.4 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ TiO_2 Nanotubes ซึ่งเตรียมขึ้นด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

1.3.2 ค่าความต่างศักย์ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes มีการแปรผันในช่วงค่าความต่างศักย์ 20 -50 V

1.3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบ เตรียมจากสี 2 ชนิด คือ IC และ RB5

1.3.4 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอดอัลตราไวโอเลตชนิด UVA มีความเข้มแสง 1,580 $\mu W/cm^{-2}$

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

1.4.2 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.4.3 ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

1.4.4 ทราบค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic Process)

เป็นกระบวนการที่ใช้แสง (Photo) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อเพิ่มความเร็วอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยสามารถจำแนกประเภทตามหลักการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ดังนี้ [10]

1) Homogeneous คือ ตัวเร่งปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ต้องการบำบัดอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น

2) Heterogeneous คือ ตัวเร่งปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ต้องการบำบัดอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของแข็งกับของเหลว เป็นต้น

ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ต้องการบำบัด มีสถานะที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะของแข็ง ส่วนสารที่ต้องการบำบัดจะอยู่ในสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลว ซึ่งข้อดีของการใช้แบบ Heterogeneous คือ สามารถคัดแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารอินทรีย์ที่ต้องการบำบัดได้ อีกทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย [14]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการดูดติดผิว (Adsorption) และ กระบวนการฉายแสง (Irradiation) ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และ โลหะแทรนซิชัน (Transition Metal) ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แถบพลังงาน 2 แถบ คือแถบการนำไฟฟ้า (Conduction) ที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะปกติ และแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ซึ่งในชั้นนี้ มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มแถบพลังงานทั้งสองจะมีระยะห่างกันซึ่งเป็นช่องว่าง เรียกช่องว่างแถบพลังงาน (Band Gap Energy)

จากการกระตุ้นด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (e^-_{vb}) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้วส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (Electron-Hole Pairs) ดังแสดงในสมการที่ 2.1 สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบการนำและแถบวาเลนซ์ได้อย่างรวดเร็วและเกิดได้ง่าย โดยระดับศักย์ของพลังงานที่กระตุ้นอิเล็กตรอนสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ที่เกิดโฮล อธิบายได้ว่า อิเล็กตรอนจากสารประกอบอินทรีย์ที่เรียกว่าตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) สามารถเคลื่อนที่ไปยังโฮลที่แถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และ

โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ในน้ำเสียเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ($\cdot OH$) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ซึ่งสามารถใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ อีกทางด้านหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาที่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) กล่าวคือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปหาตัวรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ออกซิเจน (O_2) ที่ถูกดูดซับจะกลายไปเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นซูปเปอร์ออกไซด์เรดิคอล ($\cdot O_2^-$) ดังแสดงในสมการที่ 2.4 จากนั้น $\cdot O_2^-$ จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำ (H_2O) จะเกิดเป็นไฮโดรเปอโรซิลเรดิคอล ($\cdot HO_2^-$) ดังแสดงในสมการ 2.5 ในกรณีที่ $\cdot HO_2^-$ เกิดการรวมกันจะเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.6 โดยที่ H_2O_2 สามารถรับอิเล็กตรอนจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลหรือแถบการนำได้เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.7 และ 2.8 ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจากไฮดรอกซิลเรดิคอลสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำได้ และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการย่อยสลายจะอยู่ในรูปที่เป็นก๊าซกับน้ำ [11], [12]

ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง

$$TiO_2 \xrightarrow{\text{Photon (E)}} e^- + h^+ \qquad (2.1)$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

$$h^+ + OH^- \longrightarrow \cdot OH \qquad (2.2)$$

$$h^+ + H_2O \longrightarrow \cdot OH + H^+ \qquad (2.3)$$

ปฏิกิริยารีดักชัน

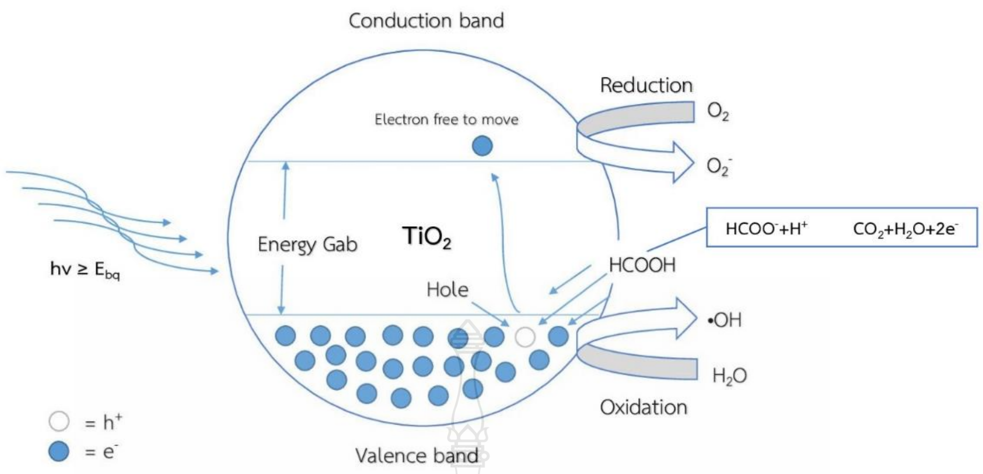
$$O_2 + e^- \longrightarrow O_2^- \qquad (2.4)$$

$$\cdot O_2^- + H^+ \longrightarrow \cdot HO_2 \qquad (2.5)$$

$$2\cdot HO_2 \longrightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (2.6)$$

$$H_2O_2 + e^- \longrightarrow \cdot OH + OH^- \qquad (2.7)$$

$$H_2O_2 + O_2^- \longrightarrow \cdot OH + OH^- + O_2 \qquad (2.8)$$



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ดัดแปลงมาจาก [13]

2.2 ปฏิกิริยาไทเทียมไดออกไซด์

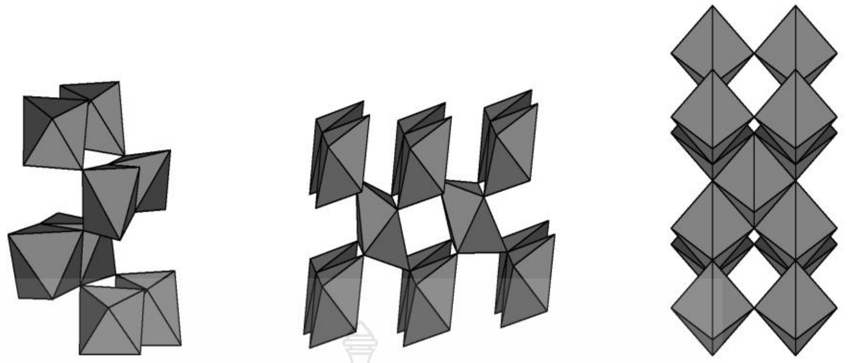
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากไทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติที่ทนทานต่อสารเคมี มีประสิทธิภาพสูง ไม่มีอันตราย สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ในปริมาณสูง และราคาถูก โดยมีค่าช่องว่างระดับพลังงาน (Eg) ต่ำ (Eg = 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 รูปแบบได้แก่

1) รูไทล์ (Rutile) สามารถทำให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโครงสร้างชนิดนี้เป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร

2) อนาเทส (Anatase) สามารถทำให้มีเสถียรภาพมากโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง

3) บรูคไคต์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และโครงสร้างเป็นออโทรอมบิค (Orthorhombic)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [14], [15]

โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ คือ โครงสร้างผลึกของรูไทล์ และของอนาเทส ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอม TiO_2 เป็นแบบของ Orthorhombic

โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจาก TiO_2 มีโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับ TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า - 889.50 $kJ.mol^{-1}$ รวมทั้งค่าความหนาแน่นของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.89 $g.cm^{-3}$ ในขณะที่ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.25 $g.cm^{-3}$ คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้ผลึกโครงสร้างแบบรูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 eV ค่าความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ 3.23 eV ในขณะที่ อนาเทสมีค่าความกว้างของแถบพลังงานเท่ากับ 3.23 eV ทำให้ TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และโครงสร้างผลึกแบบบรุ๊คไคท์ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า TiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส การทำให้บริสุทธิ์นั้นสามารถทำได้ค่อนข้างที่จะยาก เนื่องจากส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะทำการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน และโฮล ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส แต่ในปัจจุบันจึงนิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าผลึกรูปแบบอื่น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ TiO_2 [16]

คุณสมบัติทางเคมี	คุณสมบัติทางกายภาพ
1.ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.90	1.ไม่มีกลิ่น
2.พีเอช 7-8 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	2.มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.90
3.ไม่ละลายน้ำ	3.ดรรชนีหักเหเท่ากับ 2.52
4.จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส	4.ลักษณะเป็นของแข็ง, สีขาว
5.จุดหลอมเหลว 1,840 องศาเซลเซียส	5.มีความแข็ง 5.5-6.0
6.มีค่าความหนาแน่น 3.84-4.26 $g.m^{-3}$	6.ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.70
	7.พื้นที่ผิว 50 $g.m^{-2}$
	8.มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 20 nm
	9.มีความหนาแน่น 130 $g.L^{-1}$

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติลักษณะของ TiO_2 [17]

คุณสมบัติ	หน่วย	Anatase	Brookite	Rutile
ดัชนีหักเห	-	2.52	-	2.71
ช่องว่างของพลังงาน	eV	3.20	-	3.03
ความหนาแน่น	$g.cm^{-3}$	3.894	4.17	4.25
ความแข็ง	Mohs	5.50-6.0	7.0-7.50	6.0-7.0
ลักษณะของผลึก	-	เตตระโกลนอล	ออร์โธรอมบิค	เตตระโกลนอล
จุดหลอมเหลว	^{o}C	เปลี่ยนเป็นผลึก Rutile @915 ^{o}C	-	1,858
พลังงานอิสระกิบส์, $\Delta G^{o}f$	$Kcal.mole^{-1}$	-211.40	-	-212.60
แลคติคคอนสแตนท์, a	Å	3.784	9.184	4.593
แลคติคคอนสแตนท์, b	Å	-	5.447	-
แลคติคคอนสแตนท์, c	Å	9.515	5.145	2.959

2.3 สมบัติเฉพาะตัวของไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) [18]

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyts) เป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีคุณสมบัติในการถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyts) เมื่อได้รับแสง UV ที่ความยาวคลื่นประมาณ 400 nm โดยกลไกในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นจากการที่ e^- ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้รับพลังงานจากแสงจะมีพลังงานสูงขึ้น และย้ายจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และโฮล (h^+) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับสารต่างๆ ที่สัมผัสกับอนุภาคไทเทเนียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากคุณสมบัติของปฏิกิริยามีความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ อากาศและสิ่งมีชีวิตจึงนำมาผลิตเป็นเสื้อผ้านาโนเคลือบอนุภาค TiO_2 เพื่อกำจัดเชื้อโรคและกลิ่นอับ

2) ค่าความหนืด อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แพร่กระจายสู่พอลิเมอร์หลอมเหลวนั้น สามารถเปรียบเทียบได้ว่าเป็นสารแขวนลอย โดยความหนืดของสารแขวนลอยขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของอนุภาค ปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 ปริมาตรบางส่วนรูปร่าง และความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว เป็นต้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Volumic fraction จนกระทั่งถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งที่วัสดุจะไม่สามารถไหลได้อีก ความเข้มข้นของ filler สูง ทำให้อนุภาคเข้าใกล้กันมากขึ้น ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการชนกันสูงขึ้น ภายใต้การเฉือนและทำให้เกิดการไหลไปรวมกัน สำหรับ Volumic fraction ที่สูงมากๆ รวมตัวกันจะเริ่มสัมผัสกันและกันมากขึ้น เพื่อสร้างโครงสร้างตาข่าย 3 มิติขึ้น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และวัสดุจะไม่ไหลได้อีก

3) ความทึบแสงและความขาว (Opacity and whiteness) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทำให้เกิดการกระจายตัวของแสงที่มองเห็นออกไป โดยการกระจายของแสงนี้เนื่องจากผงสีขาวของ TiO_2 สามารถทำให้แสงเลี้ยวเบนออกไปได้ โดยเมื่อแสงผ่าน อนุภาคของผงสีบางส่วน ก็อาจจะดูดซับเอาไว้ แสงส่วนที่เหลือ ก็จะหักเหสะท้อนกระจายออกไป จากความสัมพันธ์ของค่าความแข็งของสีวัดได้โดยการแพร่กระจายของ TiO_2 ไปสู่เม็ดสีเข้มข้นตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยพบว่าตัวอย่างที่เติม TiO_2 จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวแข็งที่สุด

4) ความทึบแสงและความแข็งแรงของสี ความทึบแสงและความแข็งแรงของสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลาในการกระจายมากขึ้น โดยการรวมตัวกันของผงสีก็จะค่อยๆลดลงด้วย วิธีการใช้วัดการแพร่กระจายจะเป็นความสัมพันธ์ แบบตรงกับคุณสมบัติที่ต้องการตัวอย่างเช่น การรวมตัวกันของอนุภาคหลายๆขนาดที่เกาะกลุ่มกัน สามารถวัดได้โดยการใช้ Screen pack test ความทึบแสงและความแข็งของสีจะเป็นของคุณภาพการแพร่กระจาย

5) การแพร่กระจายของ TiO_2 ค่าของไทเทเนียมไดออกไซด์จะดีที่สุดที่จะนำไปใช้ต่อเมื่อมีการแพร่กระจายที่ดี ของอนุภาคของผงสีมักติดกันในระหว่างการผลิตและจัดเก็บ จะเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากขึ้น มีหลากหลายเทคนิคที่สามารถใช้เพื่อลดเกาะตัวกันเหล่านี้เพื่อให้ได้ขนาดที่ได้รับ ได้ราคาเหมาะสม

6) ความสามารถในการทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ปฏิกิริยาทางแสงตามธรรมชาติของ TiO_2 อาจมีสาเหตุจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่เป็นสารอินทรีย์เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์และสภาพแวดล้อม ผลที่ตามมาก็คือสูญเสีย ความแข็งแรงทางกายภาพ และการสูญเสียชั้นพื้นผิวที่เป็นสีขาวไป (เกิดการสูญเสียของ TiO_2 และเรซินที่แยกตัวออกมาซึ่งสามารถถูกลบออกจากผิวหน้าได้)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่สำคัญที่สุดคือ คือ การนำไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผง เพื่อใช้เป็นเม็ดสีสำหรับสร้างความขาวและความทึบแสงให้กับผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น พลาสติก สีหรือสารเคลือบต่างๆ เส้นใย หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง อาหาร ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ใช้ผลิตเป็นเม็ดสีขาวมากที่สุด ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความขาวมาก และมีดัชนีหักเหสูงมากรองจากเพชร ดัชนีหักเหแสงนี้เป็นตัวกำหนด ความทึบแสงของสารที่มีเม็ดสีนี้อยู่ด้วย ค่าดัชนีหักเหที่สูงของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงไม่จำเป็นต้องมีเม็ดสีจำนวนมาก เพื่อทำให้เกิดสีขาวทึบบนวัตถุที่ต้องการ ค่าดัชนีการหักเหที่สูงและสีขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้มันเป็นตัวทึบแสงที่มีประสิทธิภาพสูง

2.4 ปัจจัยที่มีผลกระทบในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก[19,20]

1) ความเข้มของแสง (Light intensity)

การเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มโฟตอนให้มีปริมาณมากขึ้นด้วย ดังนั้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถระบุอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานจากแสงในรูปของโฟตอน (Photon energy) ที่มากพอจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนไปอยู่ที่แถบการนำไฟฟ้าจึงจะเกิดปฏิกิริยาได้ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.9

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.9}$$

เมื่อ E = ค่าพลังงานโฟตอน (จูล)

h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135x10-15 eV.S^{-1})
v	=	ค่าความถี่ (วินาที$^{-1}$)
c	=	ค่าความเร็วแสง 299x10^6 เมตรต่อวินาที (m/s)
λ	=	ค่าความยาวคลื่น (nm)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ การฉายแสงที่เป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นต้องเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Band gap) ซึ่งเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.9 จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(4.135\text{x}10^{-15} eV - s)\text{x}(299x10^{6}\ \ m/s)}{3.2\ eV} \tag{2.10}$$

$$\lambda = 386 \text{ nm}$$

แสดงว่าต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 386 nm ซึ่งรังสียูวีมีความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตรสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วงคลื่นดังตารางที่ 2.3 แต่เนื่องจากความเข้มของแสงอัลตราไวโอเลตที่ส่องจากแสงอาทิตย์มายังโลกจะลดลงอย่างมากโดยชั้นบรรยากาศของโลก จึงต้องมีการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ 2.3 แสงอัลตราไวโอเลตสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วงคลื่น

ชื่อช่วงของแสงอัลตราไวโอเลต	ช่วงความยาวคลื่น(nm)
UVA	315-400
UVB	280-315
UVC	200-280
Vacuum UV or VUV	100-200

2) ปริมาณตัวคะตะลิสต์ (Catalyst dosage)

จะทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นที่ผิวของคะตะลิสต์ ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวคะตะลิสต์จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้นอีกด้วย

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกโดยตรง เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกลดลงด้วย รวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นของสารภายในสารละลายก็จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ส่งผลทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารประกอบอินทรีย์ที่ต้องการบำบัดไม่ทั่วถึงจึงทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลงอีกด้วย

4) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการศึกษาพบว่าการลดลงของ pH จะมีผลต่อปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก แบ่งออกได้เป็น 3 สาเหตุ คือ

ก.ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

ข.การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโฮล และเกิดขึ้นเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล

ค.ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันแต่เป็นไปได้ยากที่จะสรุปได้ว่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกแต่บางสารประกอบมีผลเกิดขึ้นน้อยมาก

5) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ

ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก รีดักชันของไนเตรตปริมาณออกซิเจนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา จะพบว่าหากมีปริมาณออกซิเจนละลายในสารละลายทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชันมีอัตราการลดลงหรืออาจจะไม่มีการเกิดขึ้นของปฏิกิริยา

6) ตัวเร่งปฏิกิริยา

มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำหรือโลหะตัวนำ ที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นๆ ได้โดยจะต้องมีพื้นที่เพียงพอเนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดติดมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น จะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นด้วย และส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้นไปอีกด้วย

7) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนของสารบางชนิดอาจถูกดูดติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้ ก็ถือว่าเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา ดังนั้นไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

8) ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งในการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสมจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสง UV และมลพิษที่ใช้ในการบำบัดเพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา

9) อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาของ h^+_{vb} และ e^-_{cb} กับสารปนเปื้อนที่ต้องการบำบัดมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ h^+_{vb} และ e^-_{cb} เนื่องจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีจำนวนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้นาน

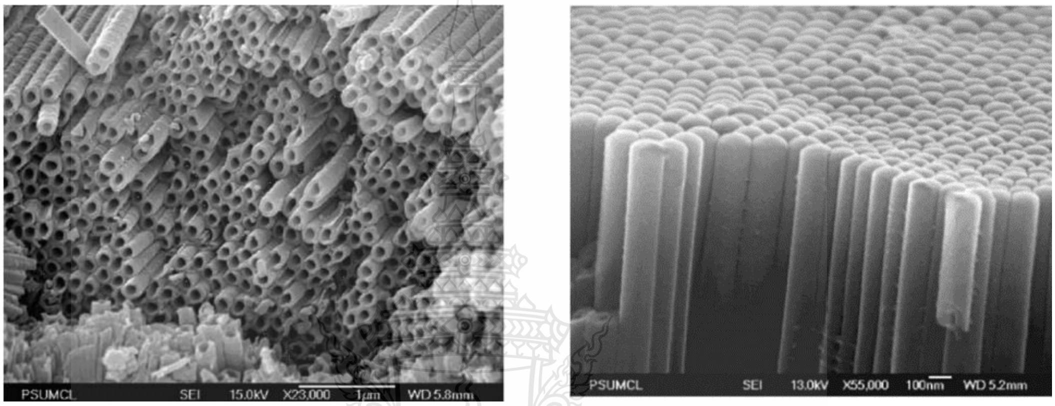
2.5 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติในการออกซิไดส์ที่ดี มีเถียรภาพสูง ไม่เป็นพิษ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเคลือบผิวของวัสดุ เป็นต้น โดยกระบวนการเตรียมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีเทคนิคในการสังเคราะห์หลากหลายวิธีและก่อให้เกิดโครงสร้างของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ อนุภาคนาโน (Nanoparticles) เส้นใยนาโน (Nanofibers) และท่อนาโน (Nanotubes) เป็นต้น [3, 10-11] วิธีการสังเคราะห์เตรียมได้หลายกระบวนการ ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการแอโนไดเซชัน (Anodization Process) เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี วิธีนี้ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic cell) ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลาย โดยหลักการของวิธีแอโนไดเซชันจะเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยกระแสไฟฟ้า

แล้วทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่เสถียรและมีรูพรุนขนาดเล็กมากเคลือบอยู่บนผิวของโลหะ หรือเรียกได้ว่าวิธีเคลือบผิวโดยใช้ไฟฟ้า

ในขณะทำแอโนไดเซชัน ไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ในขณะที่ขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยไอออนลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนด เกิดเป็นออกไซด์เคลือบอยู่บนผิวของโลหะไทเทเนียม ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของกรรมวิธีที่เรียกว่าการทำแอโนไดเซชันหรือแอโนดิกออกซิเดชัน (anodic oxidation) ของโลหะไทเทเนียมแสดงดังรูปที่ 2.3

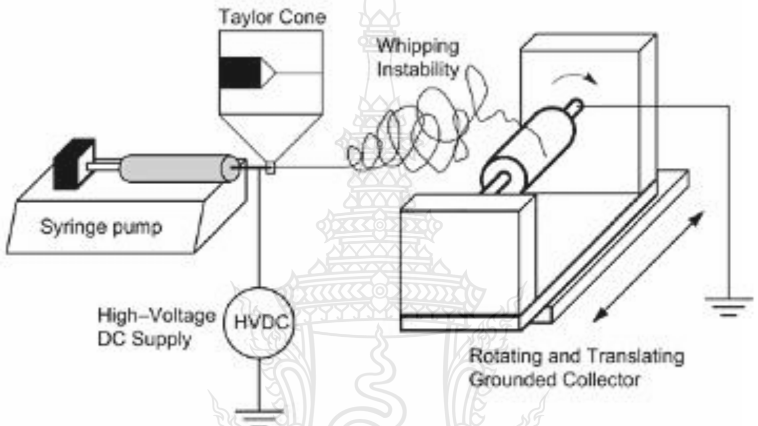


รูปที่ 2.3 ลักษณะ Nanotubes จากกระบวนการแอโนไดเซชัน [9]

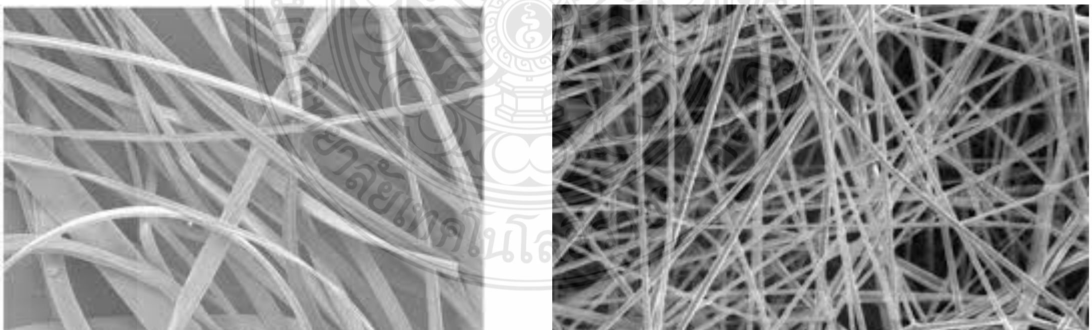
2) กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง (Electrospinning Process) เป็นกระบวนการในการเตรียมวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ โดยการหลอมเหลวจากท่อหรือฉีดสารละลายหนืดออกมาเป็นเส้นใยบาง โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่งจะใช้การฉีดเส้นใยที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร ซึ่งมีความแตกต่างจากกระบวนการฉีดเส้นใยแบบดั้งเดิม ตรงที่ใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงขับดันแทนการดึงยืดเชิงกล กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ทำให้สารละลายพอลิเมอร์กลายเป็นนาโนไฟเบอร์ ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง(high voltage dc supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with metal needle) และวัสดุรองรับ (collector) แสดงดังรูปที่ 2.4 เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น โดยการควบคุมกระบวนการและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของนาโนไฟเบอร์นี้เอง ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น ใช้ผลิตวัสดุทางการแพทย์ วัสดุสำหรับกรองสาร

ด้านอิเลคโทรนิค เกษตรกรรม อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอื่นๆทางด้านเภสัชกรรมก็มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบนำส่งยา เป็นต้น [26-28] จะได้เส้นใยนาโนที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.5

ถึงแม้ว่าอิเล็กโตรสปินนิ่งจะเป็นวิธีสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ง่ายและสะดวกแต่อย่างไรก็ตามในระหว่างที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้น จะเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกันหลายอย่างโดยเฉพาะการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนได้

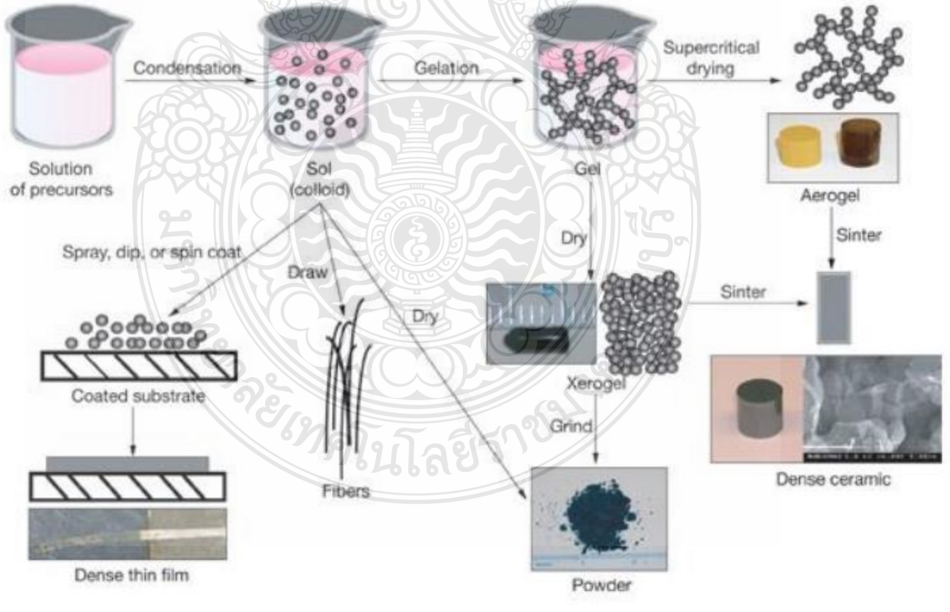


รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง ดัดแปลงมาจาก [8]

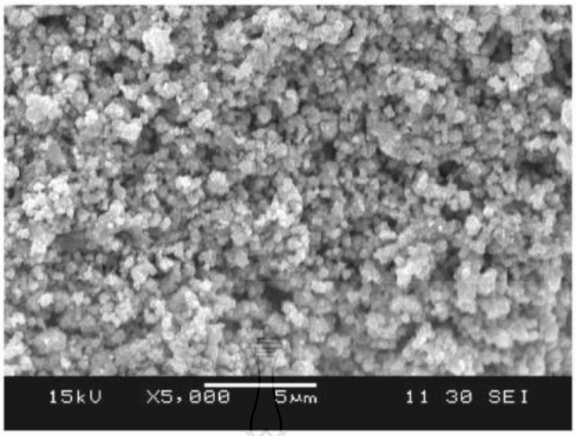


รูปที่ 2.5 ลักษณะเส้นใยนาโนจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่ง [29]

3) กระบวนการโซล-เจล (sol-gel technology) เป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “Sol” ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียก ว่า “Gel” โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกัน เป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็น Sol และ Gel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (fiber) แอโรเจล (aerogel) ซีโรเจล (xerogel) อนุภาคผง (powder) และการเคลือบฟิล์ม (coating film) สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์(alcohol condensation) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน ดังแสดงในรูป 2.3 [21-24]



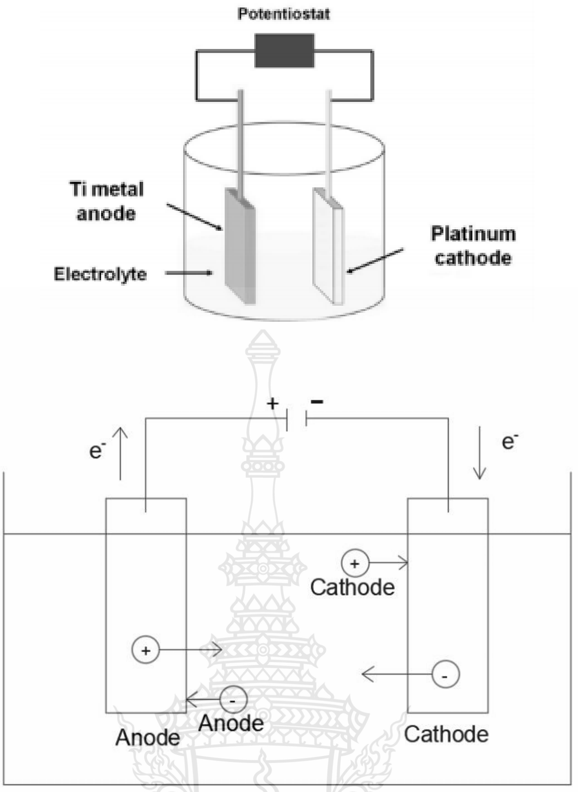
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนกระบวนการโซล–เจล และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดัดแปลงมาจาก [23]



รูปที่ 2.4 ลักษณะอนุภาคนาโนจากกระบวนการโซล – เจล [25]

2.6 กระบวนการแอโนไดเซชัน

กระบวนการแอโนไดเซชัน เป็นเทคนิคการทำให้พื้นผิวของโลหะเกิดออกไซด์ โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสที่สามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ เพื่อสร้างความแข็งแรงให้กับโลหะ โดยการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะ ทำให้ผิวของโลหะเกิดการกัดกร่อนจนเกิดเป็น รูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้น โดยการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า (DC Power Supply) โดยขั้วบวก (Anode) ต่อกับแผ่นไทเทเนียม (Ti) และขั้วลบ (Cathode) ต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ (Graphite) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และทนต่อการกัดกร่อน จุ่มลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบในกระบวนการแอโนไดเซชัน

อิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปจับกับขั้วบวกของโลหะ (Ti) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนให้ให้เกิดเป็น TiO_2 ทำให้เกิดเป็นชั้นออกไซด์ที่ผิวของ

กระบวนการแอโนไดเซชัน จะเกิดกลไกลการก่อตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยเริ่มด้วยการก่อตัวของออกไซด์ที่ผิวโลหะไทเทเนียม จากการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) กับออกซิเจนไอออน (O^{2-}) หรือไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยเริ่มต้นจากก่อตัวของชั้นออกไซด์ก่อน เนื่องมาจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยมีกลไกในการเกิด 6 ขั้นตอน ดังนี้ [31-36]

(1) เมื่อป้อนความต่างศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้ Ti ที่ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แตกตัวเป็นไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) กับอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด ดังสมการที่ 2.11

$$Ti \longrightarrow Ti^{4+} + 4e^- \qquad (2.11)$$

จากนั้น Ti^{4+} จะไปทำปฏิกิริยากับ O^{2-} ไอออนที่ได้มาจากสารละลายที่มีการแตกตัวของน้ำ เนื่องจากความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไป ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 ทำให้เกิด TiO_2 ดังสมการที่ 2.14 เกิดขึ้นบริเวณ แผ่น Ti กับสารละลายอิเล็กโตรไลท์ และ O^{2-} สามารถแทรกตัวเข้าไปเกิดชั้นออกไซด์ ระหว่างชั้น TiO_2 กับ แผ่น Ti ดังรูปที่ 2.9

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4e^- + 4H^+ \quad (2.12)$$

$$2O_2 + 2e^- \longrightarrow 2O^{2-} \quad (2.13)$$

$$Ti^{4+} + 2O^{2-} \longrightarrow TiO_2 \quad (2.14)$$

และจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่างไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดรวมกันเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการ 2.15

$$4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2 \quad (2.15)$$

(2) ชั้น TiO_2 ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ Ti จะถูกกัดออก ด้วยฟลูออไรด์ไอออนที่ได้มาจากการแตกตัวของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ดังสมการ 2.16 แต่การละลายจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเค้น(stress) ของชั้นออกไซด์ทำให้เกิดรู

$$TiO_2 + 6F^- + 4H^+ \longrightarrow [TiF_6]^{2-} + 2H_2O \quad (2.16)$$

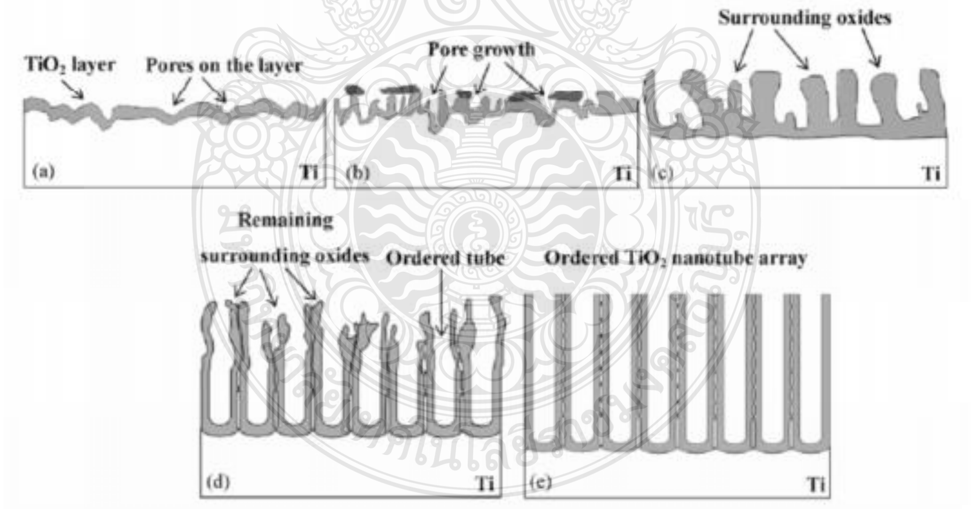
(3) นอกจาก F^- จะกัดชั้น TiO_2 ทำให้เกิดรูแล้วความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้พันธะ ระหว่าง Ti-O เกิดการสลายตัวของออกไซด์ ที่บริเวณระหว่างชั้นออกไซด์กับสารละลายอิเล็กโตรไลท์ที่บริเวณข้างรู ทำให้บริเวณดังกล่าว แตกตัวเป็น Ti^{4+} จึงละลายลงในสารอิเล็กโตรไลท์แล้วทำปฏิกิริยากับ F^- ดังสมการ 2.17 ส่วน O^{2-} สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้น TiO_2 ที่ใต้รูทำปฏิกิริยากับ Ti^{4+} ที่ชั้นระหว่างแผ่น Ti กับ TiO_2 เมื่อปฏิกิริยาผ่านไปรูจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาของ TiO_2 ด้านล่างรูใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการเจาะชั้นออกไซด์ ลงไปด้านล่างของแผ่น Ti ทำให้เกิดเป็นชั้นของ TiO_2 ที่มีความหนาด้านล่างรู เรียกชั้นแบริเออร์ (barrier)

$$Ti^{4+} + 6F^{-} \longrightarrow [TiF_6]_{2-} \qquad (2.17)$$

(4) ปฏิกิริยาละลาย TiO_2 ด้วยฟลูออไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน กับการเกิดชั้น TiO ที่บริเวณใต้รู ในระหว่างการแอโนไดเซชัน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดท่อหลุมไทเทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเกิดชั้น TiO_2 ที่ชั้นระหว่าง Ti กับ TiO_2 ต้องเท่ากันกับอัตราการถูกละลายของ TiO_2 ดังนั้น ความหนาของชั้น TiO_2 ที่ใต้รูจะคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง

(5) ในขณะที่รูถูกกัดลึกลงไปอย่างต่อเนื่อง สนามไฟฟ้าทำให้ฟลูออไรด์ไอออนสามารถเริ่มกัด TiO_2 ที่บริเวณข้างรูทำให้เกิดเป็นช่องว่าง (Void) เมื่อกระบวนการเกิดและ การละลายของ TiO_2 ดำเนินต่อไปจนถึงจุดสมดุลโดยชั้นความหนาของ TiO_2 มีความหนาที่ค่าคงที่ ขนาด รู และช่องว่าง จะไม่เปลี่ยนแปลงแม้ใช้เวลาในการแอโนไดเซชันนานขึ้น

(6) เมื่อกระบวนการเกิดและการกัดของ TiO_2 ดำเนินต่อไปจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรูและรูก็จะถูกพัฒนาต่อไปเป็นโครงสร้าง ท่อหลุมไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 2.9 กลไกลการก่อตัวของ TiO_2 แบบ Nanotubes

2.7 สีย้อม [37,38]

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมฟอกย้อม สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น แอนทราซีน โทลูอีน และไซลีน เป็นต้น โดยสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อดูดกลืนแสง ทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความคงทนจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม และพันธะในการยึดติดนั้นๆ

โครงสร้างของสีย้อมมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ โครโมฟอร์ (chromophore) และออกโซ โครม (auxochrome) โครโมฟอร์ คือ หมู่ฟังก์ชันที่ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร เช่น หมู่ไนโตรโซ (nitroso group) หมู่ไนโตร (nitro group) และหมู่อะโซ (azo group) เป็นต้น สีย้อมจะต้องมีหมู่โครโมฟอร์อย่างน้อย 1 หมู่ภายในโมเลกุล นอกจากนี้ในโครงสร้างโมเลกุล จะต้องมีลักษณะพันธะคู่แบบคอนจูเกต (conjugated) เช่น วงแหวนแอโรมาติก และเกิดเรโซแนนซ์ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลได้ [37] ส่วนออกโซโครมเป็นหมู่ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อมที่มีผลต่อ การเกิดสีความยาวคลื่น ที่ดูดกลืนแสง และ ความสามารถในการละลายของสีย้อม ตัวอย่างเช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่อะมิโน (amino group) เป็นต้น

สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปคตรัมต่างกัน สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป ซึ่งสายตาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาออกมาเป็นต่างกันไป

สีย้อมส่วนใหญ่ละลายนำได้ดีแต่ย่อยสลายยาก เนื่องจากทนทานต่อแสงและความเป็นกรดด่าง ทำให้ยากต่อการบำบัด พบว่า ประมาณ 10-15% ของสีย้อมจะถูกปล่อยไปสู่สิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการย้อมสีสารตั้งต้นต่างๆ เช่น เส้นใยสิ่งทอที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ พลาสติก หนัง กระดาษ น้ำมันถ่านหิน ขี้ผึ้ง และที่สำคัญคือ อาหารและเครื่องสำอาง สีย้อมบางชนิดพบว่าเป็นสารพิษ หรือสารกัดกร่อน เป็นต้นเหตุของโรคภูมิแพ้ และเมื่อได้รับสะสมไปเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคมะเร็ง

2.7.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม

ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ

1) สีไดเร็กท์ (Direct Dye) หรือเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้เป็นสารประกอบอะโซ น้ำหนักโมเลกุลสูง ละลายน้ำได้ด้วยหมู่กรดซัลโฟนิค มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย จึงทำให้สีติดเส้นใยได้ และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีทนแสง ตกง่าย และไม่ทนต่อการซักน้ำ

2) สีดิสเพิร์ส (Disperse Dye) มีสมบัติกระจายได้ดี แต่เป็นสีทีไม่ละลายน้ำ การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้ความดัน และอุณหภูมิสูง สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์

3) สีเอซิด (Acid Dye) ละลายน้ำได้ดี มีประจุลบ เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อม ที่มีสภาพเป็นกรดเจือจางสีเอซิดบางตัว สามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ไนลอน ป่าน ไหมใยขนแกะ และอะคริลิกได้ดี สีเอซิด ไม่ทนเหงื่อไม่ทนการซัก

4) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75^{o}C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติสีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

5) สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย เป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนแสงและการซัก

6) สีอะโซอิค (Azoic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิคใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิคเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

7) สีมอร์แดนท์ (Mordant Dye) สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ ต้องใช้สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก หรืออะลูมิเนียม เป็นสารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สีมอร์แดนท์เกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะ จึงเป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งทำให้ย้อมได้ง่าย ใช้ย้อมเส้นใยพอลีเอไมด์และเส้นใยโปรตีนได้ดี

8) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

9) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นคอลลอยด์ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมฝ้าย

10) สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำ โดยหลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำจะเกิดเป็นคอลลอยด์ ทำให้สีติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนของผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และฝ้าย

11) สีแว็ต (Vat Dye) ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ต ละลายน้ำโดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศ สีในเส้นใยจะถูกออกซิไดซ์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

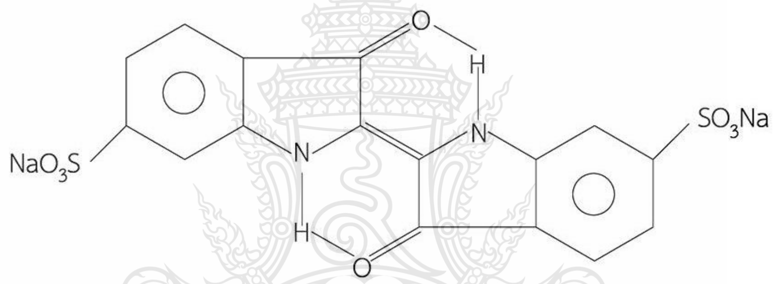
2.7.2 ความเป็นพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางคือทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหารที่กิน สีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจาก สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงาน สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ส่งผลให้การผลิตออกซิเจนลดลง ทำให้สัตว์น้ำขาด

ออกซิเจน สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง และพบว่าสีย้อมหลายชนิดจัดเป็นสารก่อมะเร็ง [38]

2.7.3 สี IC

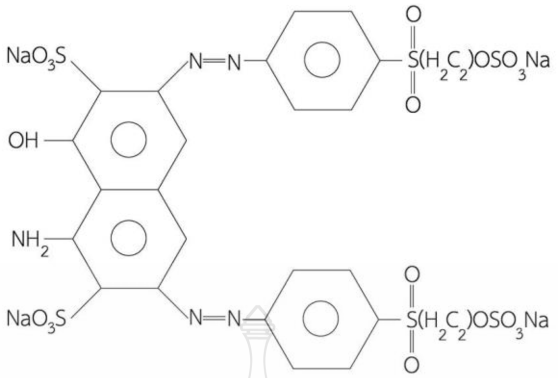
สีอินดิโกคาร์มีน จัดเป็นสีแอซิด (acid dye) เป็นสารสีสังเคราะห์สีน้ำเงินเข้มละลายในน้ำได้เล็กน้อย แต่มีความคงตัวต่อความร้อนมีค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นที่ 597 nm เกิดจากการนำสีครามไปทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ทำให้เกิดซัลโฟเนตอินดิโก (Sulfonate Indigo) เป็นสารที่มีชื่อว่า Saxon Blue หรือ IC สีน้ำเงินอมเขียว คุณสมบัติทางเคมีของสีคราม ซึ่งสีครามเป็นสีน้ำเงินเข้มที่อยู่ในรูปผงผลึก มีจุดเดือดอยู่ที่ 390-392 °C ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ หรืออีเทอร์ แต่ละลายในคลอโรฟอร์มไนโตรเบนซีน และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น มีสูตรโครงสร้างทางเคมีว่า $C_6H_{10}N_2O_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างสี IC ดัดแปลงจาก [39]

2.7.4 สี RB5 [39]

สี RB5 จัดเป็นสีรีแอกทีฟ (reactive dye) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีว่า $C_{26}H_{25}N_{54}NaO_{19}S_6$ มวลโมเลกุลเท่ากับ 991.82 $g.mol^{-1}$ มีค่าดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นที่ 597 nm ค่า LD_{50} > 5,000 $mg.kg^{-1}$ มีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็ง มีสีน้ำเงิน ไม่มีกลิ่น จุดหลอมเหลว ไม่ได้จัดเป็นประเภทสารอันตรายจากการบริโภค การสูดดมเข้าไปอาจทำให้เกิดการอักเสบเรื้อรัง กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75°C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่สวยทุกสีติดทนในทุกสภาวะ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างสี RB5 ดัดแปลงจาก [39]

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสี Indigo Carmine

คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ	
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	น้ำเงิน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
มวลโมเลกุล (g/mol)	466.35
จุดหลอมเหลว (°F)	> 300
จุดวาบไฟ	ไม่มี
อุณหภูมิสลายตัว (°F)	ไม่มี
อุณหภูมิติดไฟได้ (°F)	ไม่มี
ความหนืด	ไม่เหมาะสม
สารละลายน้ำ (g/L)	ละลายน้ำได้

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสี Reactive Black 5

คุณสมบัติทางทางเคมีและกายภาพ	
ลักษณะ	ของแข็ง
สี	น้ำเงิน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
มวลโมเลกุล (g/mol)	991.82
จุดหลอมเหลว (°F)	> 572
จุดวาบไฟ	ไม่มี
อุณหภูมิสลายตัว (°F)	ไม่มี
อุณหภูมิติดไฟได้ (°F)	ไม่มี
ความหนืด	ไม่เหมาะสม
สารละลายน้ำ (g/L)	ละลายน้ำได้

2.8 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการทดสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes นั้นทำได้โดยการหาลักษณะโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิวของผลึก ปริมาณของธาตุ และมุมสัมผัส ดังนี้

2.8.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM) [40]

FE-SEM กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อีมิสชัน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ขนาดรูปร่างของอนุภาค และลักษณะการกระจายของเฟสในโครงสร้างจุลภาค กำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้ สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ โดยไม่จำกัดความลึกที่วัด

2.8.2 X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) [41]

XRF เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ (Qualitative) ทั้งที่เป็นของแข็ง (Solid) และ

ของเหลว (liquid) โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ใช้ได้กับงานวิจัยในหลายสาขา เช่น ทางการแพทย์, สิ่งแวดล้อม, วัสดุศาสตร์ และในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น

2.8.3 สภาพความชอบน้ำ (Hydrophilicity)

การศึกษาสภาพความชอบน้ำ ทำการวิเคราะห์ได้โดยการหาค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle) ซึ่งจะวิเคราะห์ลักษณะความชอบน้ำของ TiO_2 Nanotubes โดยการวัดมุมตกกระทบของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางโดยที่ Contact Angle มีค่าน้อยกว่า 90° แสดงถึงการดูดซับหยดน้ำที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ส่งผลให้มีสภาพความชอบน้ำที่ดี (Hydrophilicity) ดังรูปที่ 2.11

2.9 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [42-44]

สามารถอธิบาย Model การดูดติดที่ผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาของสาร 2 ชนิด คือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ และ สารออกซิแดนซ์ (ไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ)โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{kK_c}{1+K_c} \quad (2.18)$$

โดยที่ r = อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ (mg.L^{-1} min^{-1})

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (mg.L^{-1})

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ที่จุดสมดุลการดูดติดบนสารกึ่งตัวนำ (mg.L^{-1})

k = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mg.L^{-1} min^{-1})

K_c = ค่าคงที่จุดสมดุลของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนสารกึ่ง (mg.L^{-1} min^{-1})

t = เวลา (min)

จากสมการที่ 2.18 สามารถจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{r}$ และ $\frac{1}{C_0}$ ดังสมการ 2.19 เพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้ [45]

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k} = \frac{1}{kK_0C} \quad (2.19)$$

ซึ่งกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{r}$ และ $\frac{1}{C_0}$ จากสมการที่ 2.38 ค่าจุดตัดบนแกน Y คือ k^{-1} และความชันคือ $(Kk)^{-1}$ สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้เป็นไปตามสมการจลนพลศาสตร์ได้ทั้งปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์และหนึ่งของ L-H

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์จะเกิดเมื่อ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น (C_0) มีค่ามากจนทำให้ $KC_0 \gg 1$ ปฏิกิริยา มีสมการดังนี้

$$r = \frac{dC}{dt} = k(I)(C) \quad (2.20)$$

C = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ($mg.L^{-1}$)

I = ความเข้มของแสงที่ส่องผ่าน ($\mu W.cm^{-2}$)

เนื่องจากไม่ทราบค่าที่แน่นอนของ (I) จึงให้ k’ แทนค่า k(I)(C) แล้วจัดรูปแบบสมการใหม่เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง C และ t ดังสมการ 2.21

$$\int_{C}^{C_0} \frac{dC}{dt} = -k' \int_{t_0}^{t} t \quad (2.21)$$

จากสมการ 2.21 สามารถจัดรูปดังแสดงในสมการ 2.22 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\frac{C}{C_0})$, t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ มีสมการดังนี้

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -k't \tag{2.22}$$

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liang [45] ทำการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาแอโนไดเซชันโดยใช้ฟอยด์ไทเทเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วบวก และแพลตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วลบ ซึ่งวางขั้วไฟฟ้าทั้งสองห่างกัน 2 เซนติเมตร และจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ประกอบด้วยสารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยบรรจุภายใน chamber สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่ บนแผ่นฟอยด์ไทเทเนียมได้ เมื่อเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ เท่ากับ 300, 500 และ 800°C เป็นเวลา1 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวไปศึกษาอัตราการย่อยสลาย สารประกอบ 2,3-ไดคลอโรฟีนอล ภายใต้แสง พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับลักษณะความเป็นผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ความยาว และ ความหนาของผนัง จากภาพถ่ายของกล้อง FE-SEM พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนสูง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าผนังของท่อนาโนมีความยาวและความบางเหมาะสมที่จะทำให้การย่อยสลายมีประสิทธิภาพดี นอกจากนี้ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกสูง ที่อุณหภูมิในการเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุณหภูมิอื่น

Mor [46] ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในลักษณะที่เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยการดีโพสิตท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียม และเกิดเป็นท่อนาโนที่แสงส่องผ่านได้ (transparent) เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า และ สภาวะความเป็นกรด-ด่าง ต่างกัน สำหรับการทำแอโนไดเซชันท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน จากนั้นนำฟิล์มโปร่งแสงประยุกต์ใช้สำหรับเป็นตัวเคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการสะท้อน (anti-reflection coatings) เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง และใช้เป็นตัวตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มและ ลักษณะของงานที่ใช้

S.Wang และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติผลึกกชนิดอนาเทส และรูไทล์ของ Fe-doped TiO_2 แบบผงโดยเทคนิคโซล-เจล บำบัดสี Methyl orange ความเข้มข้น 20 mg/L ฉายแสงที่ความยาวคลื่น 350-450 nm พบว่า TiO_2 แบบผงชนิดผลึกรูไทล์ 28.76% เผาที่ 550 C° มีประสิทธิภาพการบำบัด Methyl orange มากที่สุด และ Fe-doped TiO_2 0.1 at% (Fe^{3+}/Ti^{4+}) แบบผง ผลึกชนิดอนาเทส 79.36% ผสมแบบผลึกชนิดรูไทล์ 20.64% มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี Methyl orange ได้มากเช่นกัน

Narakorn Chanprasert และคณะ[48] ทำการศึกษาปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยใช้แสงของสารละลายสีย้อมอินทรีย์โครซีนออเรนจ์จี และเมทิลีนบลูด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แสง 3 ชนิด ที่แตกต่างกัน คือ ถังสัมผัสอากาศธรรมดา แบบอากาศยกเครื่อง และแบบถังกวน วิธีโซล-เจล คือวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้ โดยใช้ไทเทเนียมไอโซโพรพรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น จากผลการทดสอบสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ที่เตรียมขึ้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยเฟสอนาเทส และมีอยู่เพียงเล็กน้อยที่เป็นเฟสบรูคไลท์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีผลึกของเฟสอนาเทสขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร และมีพื้นผิว 170 ตารางเมตรต่อน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) การทดลองนี้ทำการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายในของเครื่องปฏิกรณ์แบบอากาศยกอัตราการป้อนอากาศ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายสีย้อม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และชนิดของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แสง ผลการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายในของเครื่องปฏิกรณ์แบบอากาศยก ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้นเมื่อ อัตราการป้อนอากาศเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายสีย้อมแต่ละชนิดนั้นเหมาะสม และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมลดลง จากการศึกษาผลของเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้แสงทั้ง 3 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพดีที่สุดคือเครื่องแบบอากาศยก ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่มาก เครื่องปฏิกรณ์มีการผสมและการหมุนเวียนที่ดี นอกจากนี้สามารถอธิบายข้อมูลทางจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาได้โดยแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของแลงเมียร์ฮินเชลวูด เหมาะสมกับการทดสอบนี้ได้เป็นอย่างดี

วุทธินันท์ ศิริพงศ์ [49] ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ ในการบำบัดน้ำเสียจากสีรีแอกทีฟ จำนวน 2 สี คือ สีรีแอกทีฟพลู 19 และสีรีแอกทีฟเยลโล 17 ซึ่งมีโครงสร้างแอนทราควินอน และ โครงสร้างโมโนอะโซ ตามลำดับ ทำการทดลองเหมือนกันทั้ง 4 ขั้นตอน โดยเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้น ความเข้มแสง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และ ค่าพีเอช ในการทดลองแต่ละครั้ง ใช้เวลา 120 นาที ขั้นตอนแรกค่าพีเอชที่เหมาะสม พบว่า ช่วงค่าพีเอชที่เป็นด่าง (พีเอชประมาณ 10) อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจะมีค่าสูงสุด ขั้นตอนที่สองเป็นการ เป็นการหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสม พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัม/ลิตร เป็นปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้นที่เหมาะสม โดยให้ค่าประสิทธิภาพและค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสีย้อมสูงสุด ส่วนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เริ่มต้น 1 กรัม/ลิตร จะให้ค่าสัดส่วนปริมาณสีย้อมผ้าที่ถูกบำบัดต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ มีค่าสูงสุด ขั้นตอนที่สามเป็นการหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผ้าที่เหมาะสม พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุด จะอยู่ที่ค่าความเข้มข้นสีย้อมผ้าเริ่มต้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนความเข้มข้นสีย้อมผ้าเริ่มต้น 40 มิลลิกรัม/ลิตร จะให้ค่าสัดส่วนปริมาณสีย้อมผ้าที่ถูกบำบัดต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้มีค่าสูงสุด และขั้นตอนที่สี่เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการทดลอง ทำการทดลองโดยเปลี่ยนความเข้มแสงยูวีจาก 9.10 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร เป็น 1.08 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพและอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลง และเมื่อไม่มีการฉายแสงยูวี ปฏิกิริยาจะไม่เกิดขึ้น ผลการทดลองทั้ง 4 ขั้นตอน ของสีทั้ง 2 ชนิด เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่สีย้อมผ้าที่มีโครงสร้างแบบ โมโนอะโซจะสามารถบำบัดได้ดีกว่า สีย้อมที่มีโครงสร้างแบบแอนทราควิโนน

สรายุทธ แสวงผล [50] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการแอโนไดเซชันและทดสอบวิธีการอิเล็กตรอนบีมลิโทกราฟี โดยสารละลายอิเล็กโตรไลต์ประกอบด้วยเอทิลีนไกลคอล, NH_4F ร้อยละ 0.38 และน้ำ 1.79 โดยมวล และใช้แผ่นTi ขนาดกว้าง×ยาว 1×6 cm โดยมีส่วนที่อยู่ในสารละลาย 4 cm ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงกระแสตรง มีความต่างศักย์และเวลาดังนี้ ความต่างศักย์ 20 V เป็นเวลา 3 hr ความต่างศักย์ 40 V เป็นเวลา 2 hr และความต่างศักย์ 60 V เป็นเวลา 1 hr ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า

ที่ความต่างศักย์ 20, 40 และ 60 V สามารถสร้าง TiO_2 Nanotubes บนแผ่น Ti โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 34.57±3.30, 65.33±4.25 และ 98.97±5.66 nm ตามลำดับ

อติพล สว่างอารามย์ [51] ทำการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะลิติกของ TiO_2 Nanotubes และ TiO_2 Nanotubes ที่เคลือบอนุภาคทองคำ โดยทดสอบการสลายตัวของเมทิลีนบลูภายใต้การฉายแสง สารเคมีที่ใช้ คือ เอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$), แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F), โปแตสเซียมโกลด์ไซยาไนต์, เมทิลีนบลู, กาวเงิน, ผงขัดอะลูมินา, อีพ๊อกซี, เรซิ่น, น้ำกลั่นและน้ำปราศจากไอออน ใช้แผ่น Ti กว้าง × ยาว × หนา เท่ากัน 1 × 1 × 1 cm ผลการตรวจวิเคราะห์ SEM พบว่า TiO_2 Nanotubes จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ มีความสม่ำเสมอโดยมีความยาวท่อประมาณ 500 - 600 nm เส้นผ่านศูนย์กลางวงในเฉลี่ย 45 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเฉลี่ย 65 nm

อัครินทร์ บุญประเสริฐ [52] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพของ TiO_2 Nanotubes ที่ทำสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน และมีความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำปราศจากไอออนและ NH_4F TiO_2 Nanotubes ที่ดีที่สุดจากกระบวนการนี้คือ NH_4F ร้อยละ 20 โดยปริมาตร โดยท่อจะมีลักษณะกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งการเกิดท่อจะเริ่มจากการเกิดหลุมเล็กๆ จำนวนมาก หลุมเหล่านั้นก็จะรวมตัวกันเป็นหลุมที่โตและลึกขึ้นจนกลายเป็นท่อ

Guo-jian CAO. และคณะ [53] ได้ศึกษารายละเอียดการสังเคราะห์ TiO_2 Nanotubes บนแผ่นTi และ TiO_2 Nanotubes บนแผ่น Ti ที่มีรูพรุน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด คือ ชนิดแรก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก+0.5% HF ในอัตราส่วน 1:7 ที่ความต่างศักย์ 20 V เป็นเวลา 40 min และอีกชนิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วย เอทิลีนไกลคอล+0.5% NH_4F ในอัตราส่วน 4:1 เป็นเวลา 2 hr ผลการตรวจวิเคราะห์ SEM พบว่า TiO_2 Nanotubes บนแผ่น Ti ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดแรกมีเส้นผ่ายศูนย์กลาง 100 nm ผนังหนา 14 nm และมีความยาว 350 nm ในส่วน TiO_2 Nanotubes บนไทเทเนียมที่มีรูพรุนไม่มีการเกิดท่อ ส่วนชนิดที่ 2 นั้น พบว่า TiO_2 Nanotubes บน Ti มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 78 nm และ 19 nm มีความยาว 2.5 μm จากผลพบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี HF กัดกร่อนได้ดีกว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี NH_4F และTiO_2 Nanotubes บนไทเทเนียมที่มีรูพรุนที่ 60% มีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมากที่สุด

Wei Zhu และคณะ [54] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ TiO_2 Nanotubes ที่เจือจางด้วยอนุภาคนาโนนิกเกิลโดยใช้ เทคนิค Electrodeposition เป็นการทดลองที่ใช้ต้นทุนที่ไม่แพงมาก จากผลการศึกษาพบว่า TiO_2 Nanotubes สามารถใช้เป็นฐานเพื่อรองรับโลหะเจือจางได้ เปรียบเทียบ TiO_2 Nanotubes ที่ไม่มีการเจือจางกับ TiO_2 Nanotubes เจือจาง จะพบว่าท่อนาโนผสมจะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจือจาง ด้วยออกไซด์ของโลหะหรืออโลหะจะทำให้อิเล็กตรอนไปรวมตัวกับโฮลมีค่าลดลง แสดงลักษณะของ TiO_2 Nanotubes ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ยประมาณ 250 nm ส่วนลักษณะของ TiO_2 Nanotubes ที่เจือด้วยนิกเกิลที่มีระยะห่างของนิกเกิลเท่าๆ กันจะแสดง TiO_2 Nanotubes จะผสมกันภายในและภายในก็จะประกอบไปด้วยนาโนนิเกิลเชน (Nano Ni chain) บรรจุอยู่ภายในผนังของท่อนาโน และระยะเวลาก็เป็นตัวบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการเคลือบจะทำให้ได้สายโซ่ที่มีความยาวเพิ่มขึ้น

Lianjie Qin และคณะ[55] ได้ศึกษาผลของการสังเคราะห์ TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยการนำแผ่น Ti จุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ประกอบไปด้วย 0.24% โดยน้ำหนักของ NH_4F, เอทิลีนไกลคอล 47 mL และ น้ำ 2% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20° C ที่ความต่างศักย์ 30, 40, 50 และ 60 V เวลา 1 hr ทำการเพิ่มเวลาที่ความต่างศักย์ 40 V เป็นเวลา 0.5, 1 และ 1.5 hr เพื่อสังเกตความลึกของท่อ และการบำบัดสี MB ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ผลการทดลองพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความต่างศักย์ 30, 40, 50 และ 60 V ประมาณ 30-90 nm และมีความลึกท่อ 55.9, 59.6, 65.5 และ 64.1 nm ในส่วนที่มีการเพิ่มเวลาที่ 40 V พบว่าเพื่อสังเกตความลึกท่อ สามารถคำนวณอัตราการเจริญเติบโตเป็น 4.17 μm และค่าคงที่การบำบัดสี MB เท่ากับ $k = 0.4266\ h^{-1}$.

Wilaiwan Chanmanee [56] ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะและการขึ้นรูปของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้งบวกและลบบนแผ่นโลหะไทเทเนียม ความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 แบบด้วยกัน กล่าวคือ 20 โวลต์ สลับกับ -4 โวลต์ และ 20 โวลต์ สลับกับ 0 โวลต์ และมีการแปรเปลี่ยนระยะเวลาในการใช้ศักย์ไฟฟ้าลบและศูนย์ตั้งแต่ 2 วินาที ถึง 16 วินาที การขึ้นรูปไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเกิดขึ้นในสารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ และ ส่วนประกอบอื่น ๆ ในสารละลาย (กรีเซอรอล โพลีเอธทิลลีนไกลคอล หรือเอธทิลลีนไกลคอล) จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การขึ้นรูปแบบใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้งบวกและลบนั้น ทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์

ลักษณะ เป็นท่อขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีค่าการตอบสนองต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสูงกว่า การใช้เพียงศักย์ไฟฟ้าบวกเพียงอย่างเดียวโดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการขึ้นรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบท่อนาโนคือ การใช้ศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ สลับกับ -4 โวลต์ และใช้ระยะเวลาในการใช้ศักย์ไฟฟ้าลบ 2 วินาที เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าลบทำให้แอมโมเนียมไอออน ในสารละลายสามารถเกาะติดผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการถูกทำลายของไทเทเนียมไดออกไซด์จากฟลูออไรด์ไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกรีดักชัน และ ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงต่อการตอบสนองต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่อมีการเติมโลหะไอออนและสารประกอบอื่น ๆ ในสารละลาย ซึ่งจากการทดลองพบว่าการเลือกใช้โลหะไอออนกับสารประกอบอื่นๆ ที่เหมาะสมนั้น สามารถ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ในการตอบสนองต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกรีดักชั่น และปฏิกิริยาเคมี โดยการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของโครเมียม ประจุบวก 6 ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ได้ทำการทดสอบทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน และไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีการเติมไอออนโลหะ ผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีการเติมไอออน กลีเซอรอลและนิเกิลโลหะให้ค่าควอนตัมยิวสูงถึง 3.2×10^{-2}

อารียา เอี่ยมบู่ และคณะ [57] ศึกษาผลของตัวแปรเสริมในการแอโนไดเซชันได้แก่ ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ เวลา และ ความต่างศักย์ ต่อลักษณะสัณฐานของพื้นผิวไทเทเนียมในกรดซัลฟิวริก ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานด้วยเครื่องมือ FE-SEM ตัวแปรเสริมแรกในการแอโนไดเซชันคือ ความต่างศักย์ในการแอโนไดเซชันระหว่าง 10 ถึง 80 โวลต์ พบว่า ที่ความต่างศักย์ต่ำ ลักษณะสัณฐานพื้นผิวมีลักษณะคล้ายท่อนาโน และเมื่อความต่างศักย์สูงกว่า 70 โวลต์ จะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ตัวแปรเสริมที่สองในการแอโนไดเซชันคือ ความเข้มข้นของกรด ซัลฟิวริก มีค่าระหว่าง 1 ถึง 18 โมลาร์ พบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ เกิดฟิล์ม ออกไซด์ที่มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นท่อนาโน ความเข้มข้น 5 ถึง 15 โมลาร์ เกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีโครงสร้าง ลักษณะเป็นก้อนออกไซด์ ความเข้มข้น 18 โมลาร์ เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษะเรียบปกคลุมอยู่บนพื้นผิว ตัวแปรเสริม ที่สามคือ เวลาในการแอโนไดเซชันระหว่าง 0.5 ถึง 12 ชั่วโมง พบว่าลักษณะสัณฐานพื้นผิวมีลักษณะดังนี้ เวลาในการแอโนไดเซชัน 0.5 และ 2 ชั่วโมง ลักษณะพื้นผิวจะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นท่อนาโน เมื่อเวลาใน

การแอโนไดเซชัน 1 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่า เกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีโครงสร้างที่มีลักษณะ เป็นก้อนออกไซด์ที่ปกคลุมทั่วพื้นที่ผิว จากผลข้างต้นแสดงว่า ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ เวลา และความต่างศักย์ ในการแอโนไดเซชันมีบทบาทสำคัญต่อลักษณะสัณฐานของพื้นผิวไทเทเนียม

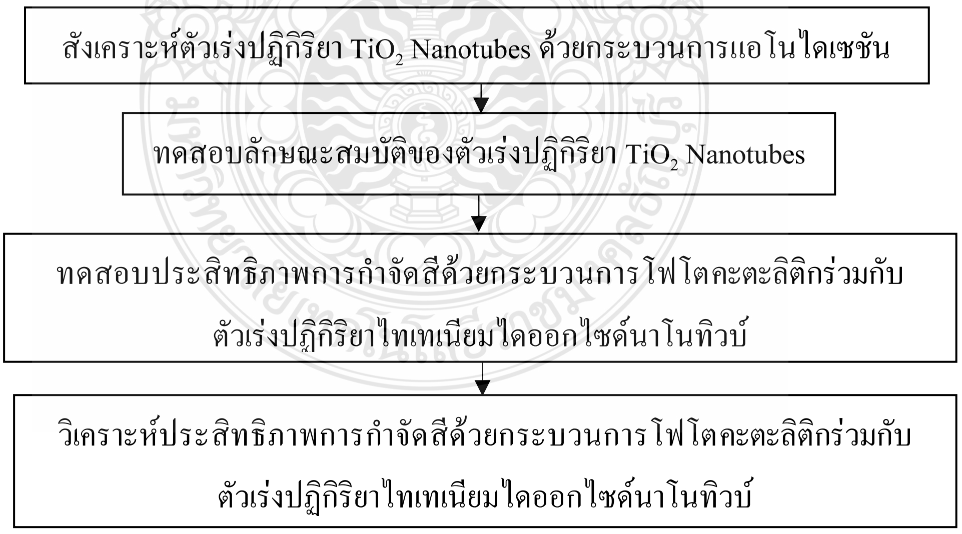
Liang [58] ทำการศึกษาปฏิกิริยาแอโนไดเซชัน โดยสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ฟอยด์ไทเทเนียมเป็น ขั้วไฟฟ้าขั้วบวก และแพลตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าขั้วลบ ซึ่งวางขั้วไฟฟ้าทั้งสองห่างกัน 2 เซนติเมตร และจุ่มใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ประกอบด้วยสารละลายแอมโมเนียม-ฟลูออไรด์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยบรรจุภายใน chamber สามารถสังเคราะห์ท่อนาโน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่ บนแผ่นฟอยด์ไทเทเนียม เมื่อเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ เท่ากับ 300, 500 และ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวไปศึกษาอัตราการย่อยสลาย สารประกอบ 2,3-ไดคลอโรฟีนอลภายใต้แสง พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับลักษณะความเป็นผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ความยาว และ ความหนาของผนัง จากภาพถ่ายของกล้อง FE-SEM พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนสูง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าผนังของท่อนาโนมีมีความยาวและความบาง เหมาะสมที่จะทำให้การย่อยสลายประสิทธิภาพดี นอกจากนี้ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกสูง ที่อุณหภูมิในการเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพสูงกว่าอุณหภูมิอื่น

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการศึกษาและการดำเนินงาน ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน และทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสี 2 ชนิด ได้แก่ IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่เตรียมขึ้น รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดังกล่าว โดยมีขั้นตอนการศึกษาต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์นั้น มีขั้นตอนการดำเนินการขั้นแรก คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน จากนั้นทำการทดสอบลักษณะ สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผล แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 สารเคมี

1) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) ยี่ห้อ QREC

2) แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ยี่ห้อ Ajax Finechem.

3) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ยี่ห้อ QREC

4) อะซิโตน (Acetone) ยี่ห้อ QREC

5) เอทานอล (Ethanol) ยี่ห้อ QREC

6) น้ำปราศจากไอออน (Deionization Water, DI)

7) แก๊สไนโตรเจน (N_2)

3.2.2 อุปกรณ์

1) เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ยี่ห้อ TRU-SWEEP รุ่น 690HT

2) กระดาษทรายเบอร์ 240, 500, 1,000 และ 1,500

3) บีกเกอร์ขนาด 100 mL

4) แท่งแก้วคนสาร

5) เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น BSA224S

6) ปิเปตอัตโนมัติ

7) เครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ รุ่น HACH DR/2010

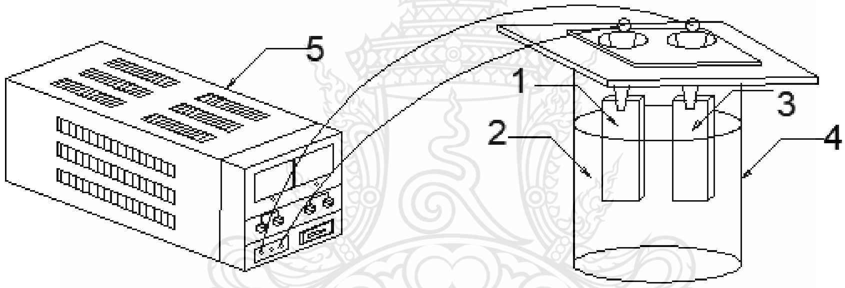
8) อุปกรณ์ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น versat3D (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

9) อุปกรณ์ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

10) อุปกรณ์ Contact Angle ยี่ห้อ Dataphysics รุ่น Contact Angle System OCA TBU90E (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

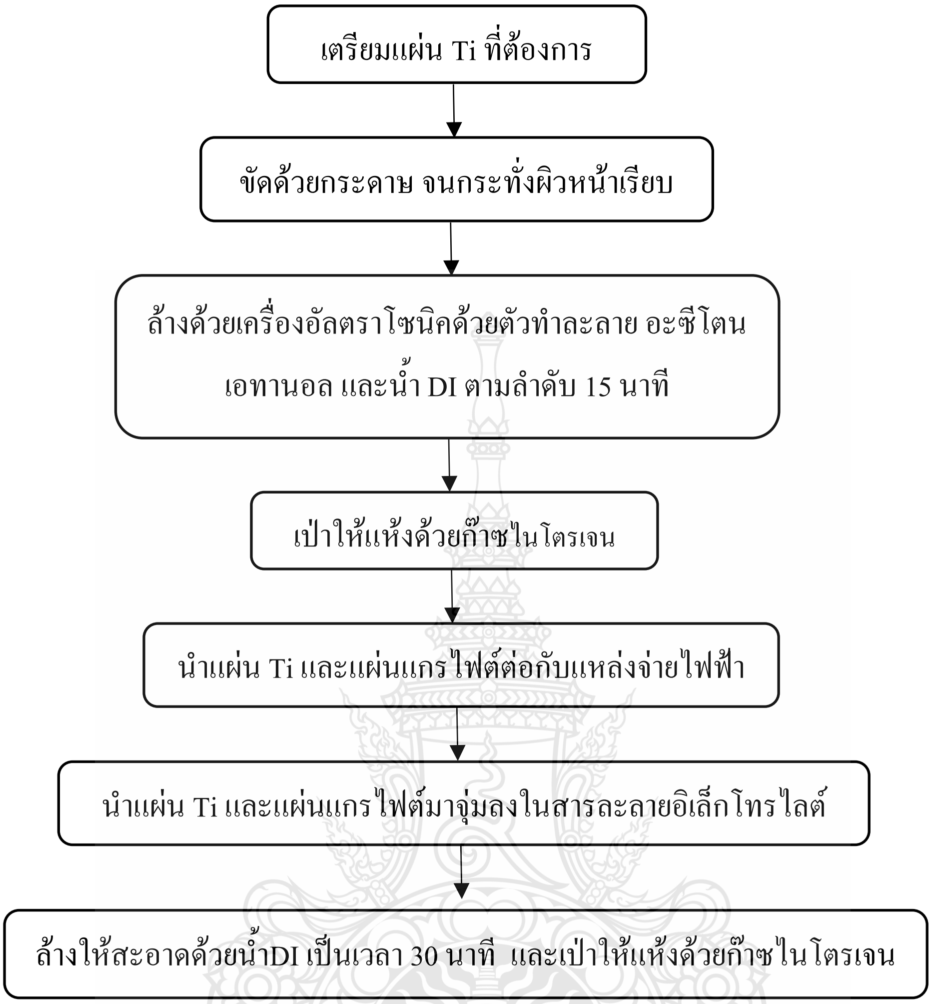
3.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน เริ่มจากการเตรียมแผ่นไทเทเนียมขนาด 3 x 4 x 0.08 เซนติเมตร นำมาขัดด้วยกระดาษทรายให้ผิวหน้าเรียบ แล้วนำแผ่นไทเทเนียมที่ขัดแล้วมาล้าง ในตัวทำละลายอะซีโตน เอทานอล และ น้ำ DI ตามลำดับ ด้วยเครื่อง Ultrasonic โดยใช้เวลาครั้งละ 15 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ในการเริ่มต้นกระบวนการแอโนไดเซชันนั้น เริ่มจากนำแผ่นไทเทเนียมต่อกับขั้วบวกและแผ่นแกรไฟต์ต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า จุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วย Ethylene Glycol, NH_4F และ HF แสดงดังรูป 3.2 ปรับความต่างศักย์ให้มีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 20, 30, 40 และ50 V เป็นเวลาตัวอย่างละ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เครื่อง Ultrasonic และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนการสังเคราะห์ ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ แสดงดังรูปที่ 3.4



1. แผ่นแกรไฟต์ขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 3×4 cm
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)
3. แผ่น Ti ขนาด 3×4×0.08 cm
4. บีกเกอร์ ขนาด 100 mL
5. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (DC Power Supply)

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน



รูปที่ 3.4 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

3.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) โดยใช้ผงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชัน ตามวิธีการในข้อ 3.3 นำผงไทเทเนียมอบที่อุณหภูมิ 500 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมโมเลกุลของ

สารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของท่อนาโนบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes โดยทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ version Image processing and analysis in Java

3.4.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) เป็นการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยอาศัยหลักการเรื่องรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง

3.4.3 การศึกษามุมสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

ในการศึกษามุมสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes วัดมุมตกกระทบของหยดน้ำบนพื้นผิวตัวกลางของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยเครื่อง Contact Angle

3.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสี IC และ RB 5

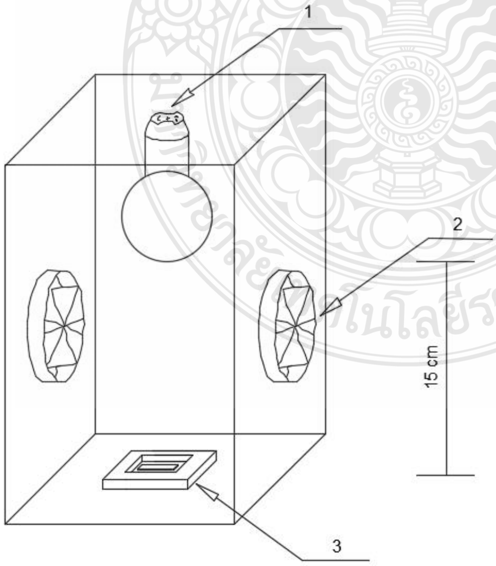
สำหรับการเตรียมสารละลายมาตรฐานสี IC ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 μM ตัวอย่างละ 50 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 nm สำหรับสารละลายมาตรฐานสี RB5 เตรียมที่ความเข้มข้น เท่ากับ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 μM ตัวอย่างละ 50 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 597 nm แล้วทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสีทั้ง 2 ชนิด

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นสีสำหรับการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นสี IC	ความเข้มข้นสี RB5
0.8 μM	2.0 μM
1.0 μM	4.0 μM
1.2 μM	6.0 μM
1.4 μM	8.0 μM
1.6 μM	10.0 μM

3.6 การหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้สี IC มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 μM ตัวอย่างละ 50 mL และวัดค่าสีเริ่มต้นในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI) แล้วทำการทดลองใน Photoreactor ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตรตัวอย่างละ 50 มิลลิลิตร ในจานแก้วแล้วใส่แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,580 $\mu W/cm^{-2}$ เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60 และ 90 min แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 610 nm ด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์เพื่อหาค่าสีและความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนแปลงไป ในส่วนของการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 μM แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองโดยใช้สี IC แตกต่างกันเพียงค่าความยาวคลื่นที่ใช้วิเคราะห์สำหรับสี RB5 จะนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 597 nm สำหรับความเข้มข้นของสี IC และ RB5 เริ่มต้นในการทดลองจะใช้ค่าความเข้มข้นที่มีความแตกต่างกันแต่ความเข้มสีในหน่วย ADMI ของสีทั้งสอบชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 3.5



1. หลอดอัลตราไวโอเลต
2. พัดลมระบายความร้อน
3. จานแก้ว ใส่แผ่น Ti ชุบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

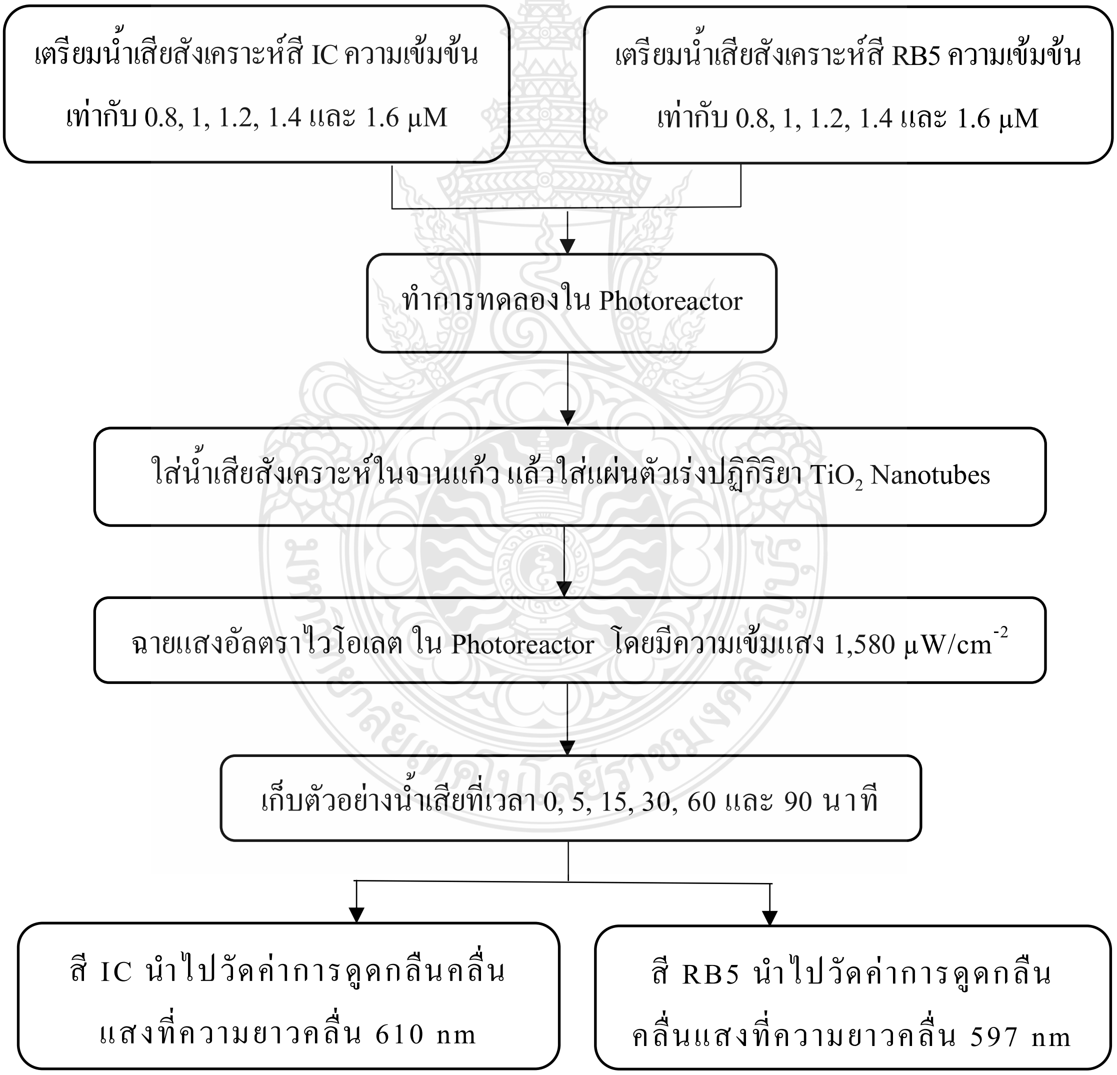
รูปที่ 3.3 ชุดทดลอง Photoreactor

3.7 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาจลนศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 ที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ ที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

3.8 สถานที่ทำการศึกษา

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี ICและสี RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานของงานวิจัยนี้จะนำเสนอ ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes โดยมีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ XRF และ FE-SEM รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ ซึ่งสีที่นำมาใช้ในการทดลองคือ IC และ RB5 และศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดสีทั้ง 2 ชนิด ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นจากกระบวนการข้างต้น

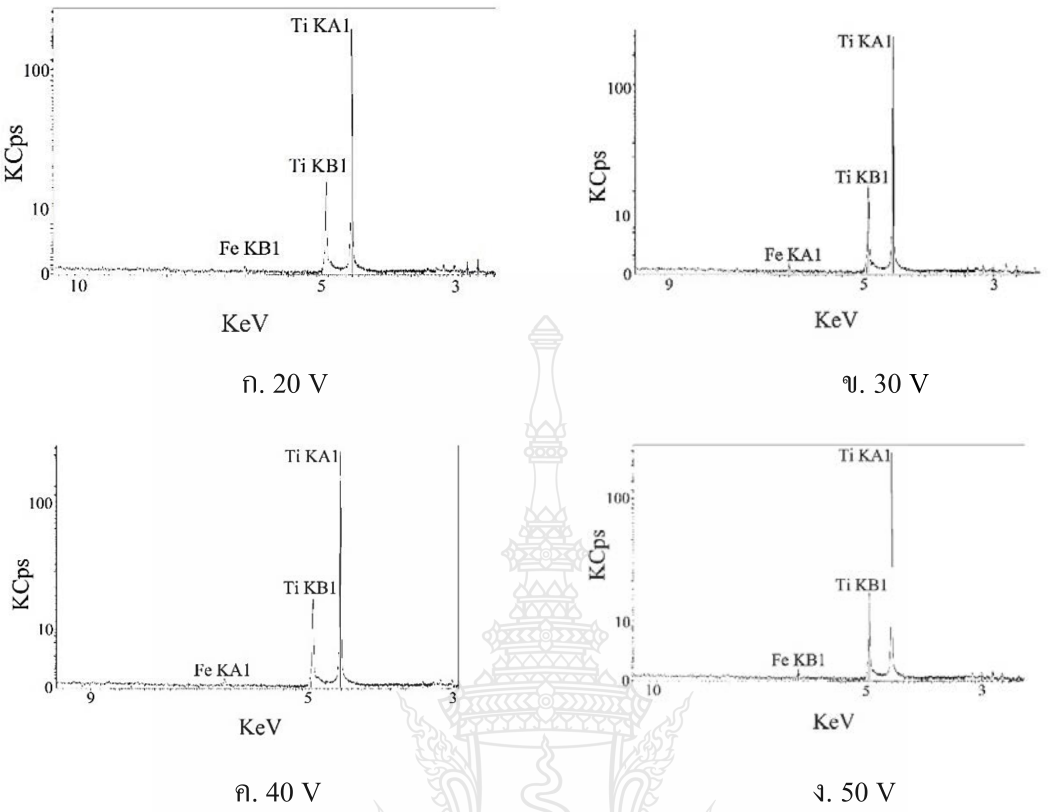
4.1 การวิเคราะห์หาลักษณะสัณฐานและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

4.1.1 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาตรธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ XRF

สำหรับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาตรธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยเครื่อง XRF โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ผลการวิเคราะห์แสดงดัง ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณธาตุที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่เตรียมขึ้น

ความต่างศักย์ (V)	ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ (ร้อยละ)		
	Ti	**Fe**	**อื่นๆ**
Blank	91.1	0.12	8.68
20	92.1	0.18	7.72
30	99.4	0.11	0.49
40	98.8	0.11	1.09
50	97.7	0.11	2.19



รูปที่ 4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ XRF

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่พบบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ XRF หลังจากผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน แสดงให้เห็นว่าอนุภาคดังกล่าวคือไทเทเนียม เพราะเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 พบพีคของ Ti เป็นองค์ประกอบ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีธาตุ หลัก 2 ชนิด คือ Ti และ Fe บนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes มีปริมาณธาตุ Ti มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นไทเทเนียม ซึ่งเป็นแผ่นไทเทเนียม grade 2 ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน (Blank) ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การนำกระบวนการแอโนไดเซชันที่มีการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์มาเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุที่อยู่ในแผ่น TiO_2 Nanotubes

4.1.2 ขนาด ความลึก และความชอบน้ำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของท่อนาโนบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Gwyddion version 2.53: และในส่วนของค่าความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าววัดได้จากการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำด้วยอุปกรณ์ Contact Angel โดยผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยโปรแกรม ImageJ

ตัวอย่างที่	ความต่างศักย์ (V)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	ความลึกท่อนาโน (nm)	มุมสัมผัส (°)
1	Blank	-	-	77.56
2	20	-	-	75.07
3	30	43.29	56.66	66.01
4	40	57.06	68.12	65.20
5	50	80.43	74.87	16.72

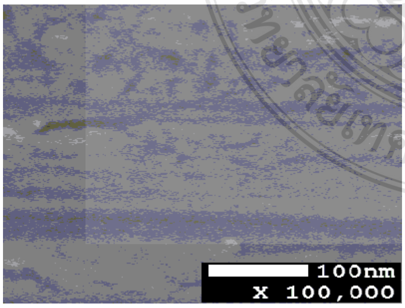
ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่ไม่ได้เตรียมด้วยกระบวนการ แอโนไดเซชัน (Blank) และตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่เตรียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันเมื่อใช้ความต่างศักย์เท่ากับ 20 V ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลง รวมถึงไม่สามารถระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกท่อนาโนได้ ในส่วนของการเตรียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันที่มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 30, 40 และ 50 V พบว่าค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความลึกของท่อนาโนบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนมีค่าเท่ากับ 40 - 80 nm ในส่วนของความลึกท่อนาโนที่มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าความลึกของท่อนาโนมีค่าเท่ากับ 50 – 80 nm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Macak และคณะ [59] กล่าวว่า หลังจากทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า 1 – 25 V ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นไป 15 -120 นาโนเมตร

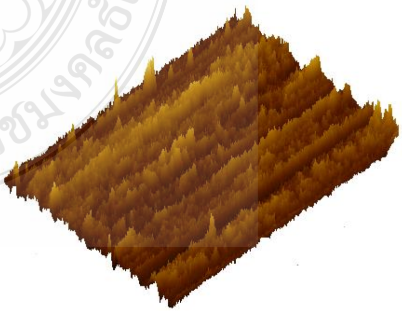
ในการศึกษาค่าความชอบน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes โดยการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle) ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ผลการวิเคราะห์ และแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes มีแนวโน้มลดลงดังตารางที่ 4.3 โดยขนาดมุมสัมผัสของท่อนาโนมีค่าเท่ากับ 77.56°, 75.07° , 66.01°, 65.20° และ 16.72° ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสหยดน้ำที่พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes แปรผกผันกับค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยเมื่อความต่างศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งมุมสัมผัสหยดน้ำที่พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน จะมีค่าน้อยกว่ามุมสัมผัสที่พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ไม่ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน (Blank) แสดงถึงลักษณะการเป็นรูพรุน (Porous) ของพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองของเวนเซล (Wenzel Model) [59]

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes จากกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20V, 30V, 40V และ 50 V เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง FE-SEM ผลการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงเป็นภาพถ่าย 2 มิติ และ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อนำแผ่นไทเทเนียมที่ผ่านการแอโนไดเซชันโดยใช้ความต่างศักย์ 20 V, 30 V, 40 V และ 50 V เวลาในการแอโนไดเซชัน 1 hr โดยท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันจากแผ่นไทเทเนียม ในสารละลายที่มีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ผสมอยู่ การใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์ไอออนเพียงอย่างเดียวจะทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีลักษณะการจัดเรียงของท่อไม่เป็นระเบียบ มีการกระจุกตัวของท่อ การเกิดท่อซ้อนกัน และ เกิดการสลายตัวของท่อในระยะเวลาการสังเคราะห์ไม่นาน [60] จึงมีการใช้สารเคมีที่มีความหนืดสูงมาผสมลงไปในสารละลาย เช่น กลีเซอรอลและเอทธิลีนไกลคอล เป็นต้น เพื่อชะลอปฏิกิริยาของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความรุนแรงต่อการเกิดออกไซด์ ทำให้การก่อตัวของออกไซด์ช้าลง ทำให้ท่อเกิดขึ้นอย่างราบรื่น มีแนวสันท่อที่ชัดเจน พร้อมทั้งปรับปรุงพื้นผิวออกไซด์ให้ราบเรียบเป็นระเบียบ [60] ซึ่งจะเกิดเป็นรูปทรงเมื่อเวลาในสังเคราะห์ประมาณ 25 นาที และจะเพิ่มความยาวท่อขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น [61] ลักษณะสัณฐานทางวิทยาของท่อที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE – SEM จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะสัณฐานของของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแอโนไดเซชัน (Blank) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) แผ่นไทเทเนียม มีลักษณะเรียบ ไม่มีรูพรุน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และไม่พบหลุมที่บริเวณพื้นผิว

ของทั้งนี้ เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์เท่ากับ ค่าความ 20 V, 30 V, 40 V และ 50 V ส่งผลให้ความขรุขระที่พื้นผิวของแผ่นไทเทเนียม มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข-จ) สอดคล้องกับการศึกษาของศรัญญา [60] ที่ทำการทดลองการแอโนไดเซชันในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F, Glycerol : H_2O (60:40) ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ มีลักษณะของท่อชัดเจน เป็นท่อที่แยกจากกันชัดเจน และมีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ การศึกษาของ Sun et al [61] ได้ทำการทดลองแอโนไดเซชันในสารละลาย 0.3 M NH_4F ใน ethylene glycol : H_2O (98 : 2) เป็นสารละลายนำไฟฟ้าความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 120 นาที จะทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนขึ้น และการศึกษาของ Kontos et al. [62] โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันในสารละลายนำไฟฟ้า 5.0 M NH_4F ใน ethylene glycol ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า จะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโน โดยความหนาของออกไซด์มีขนาด 7, 13.8 และ 24.8 μm ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1, 2 และ 4 hr ตามลำดับ

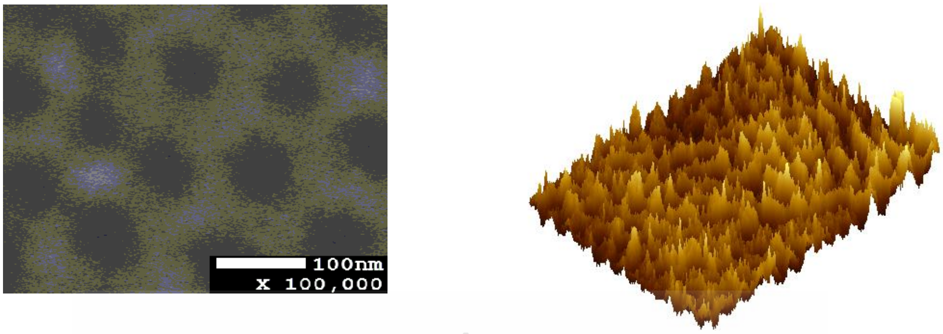
กระบวนการแอโนไดเซชันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของแผ่นไทเทเนียมได้ โดยเกิดเป็นหลุมในลักษณะท่อ (Nanotubes) ลึกลงไปจากพื้นผิวหน้าของแผ่นไทเทเนียมที่มีการเตรียมขึ้น ท่อนาโนมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีความสูงต่ำของท่อชัดเจน ไม่มีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเกิดกระจายอยู่ทั่วแผ่นไทเทเนียม เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของไอออนที่เข้าไปด้านล่างของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีน้อย ดังนั้น F^- จึงเกิดการสลายตัวทางเคมีอยู่ที่ขอบท่อ ทำให้ท่อเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ [60]



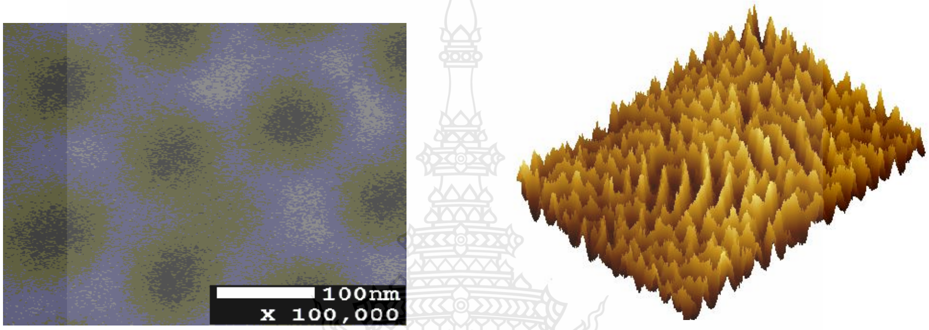


ก. Blank

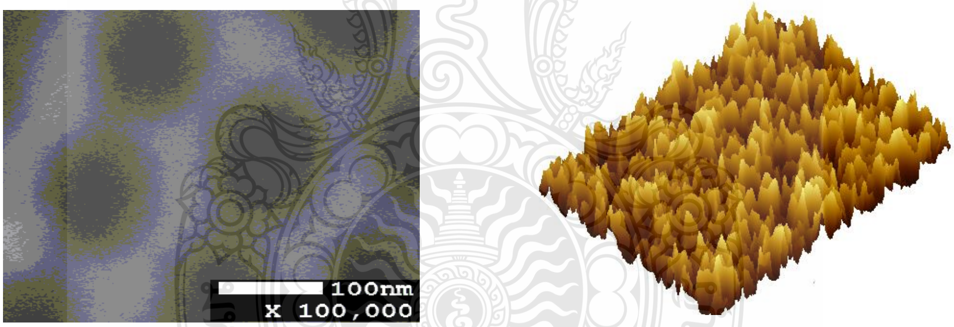
ข. 20 V



ค. 30 V



ง. 40 V

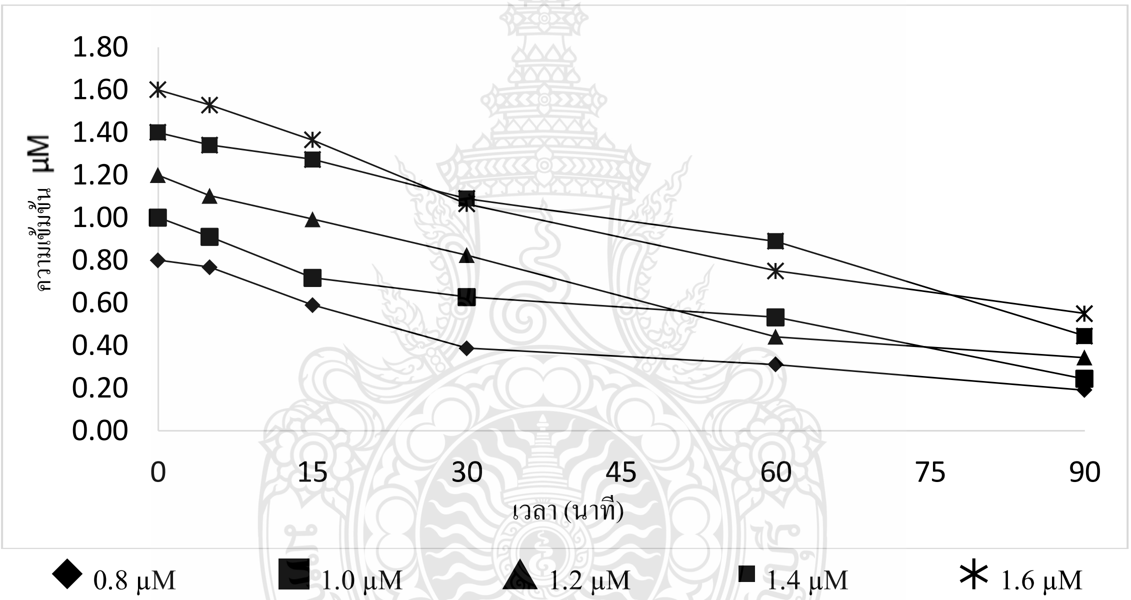


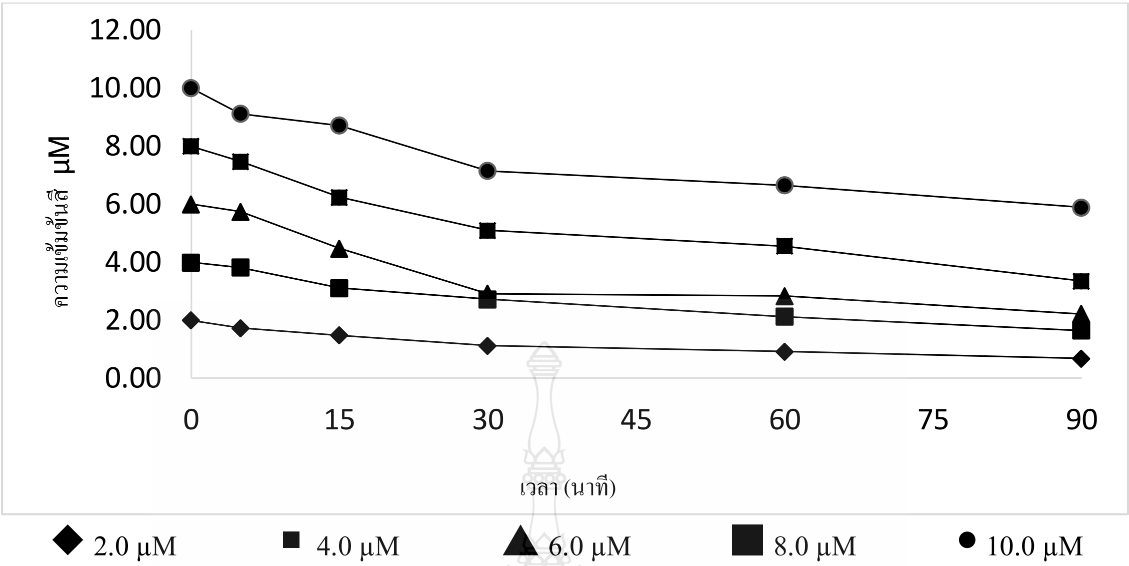
จ. 50 V

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes 2 มิติ ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ FE- SEM และ 3 มิติ ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ AFM

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และสี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ความเข้มแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ 1,580 $\mu W/cm^{-2}$ โดยใช้สี IC และสี RB5 มาทำการทดสอบเนื่องจากสี IC มีค่าการดูดกลืนแสง 610 nm และสี RB 5 มีค่าการดูดกลืนแสง 597 nm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของสีทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน





รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี IC และ RB5 ด้วย กระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes มากำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ทำให้ค่าความเข้มข้นของสีลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสงเพิ่มมากขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนส์จะไปกระตุ้นที่แถบการนำ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่บนแถบการนำจะดูดซับโมเลกุลของออกซิเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็น Superoxide radicals (•$O2^-$) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความว่องไว สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำที่มาดูดซับที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องและเกิดเป็น Hydroxyl radicals (•OH) ได้อีก ในขณะเดียวกันโฮลที่อยู่บนแถบวาเลนส์สามารถออกซิไดซ์หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็น •OH ได้เช่นกัน หมู่ •OH ที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นหมู่ว่องไวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์มลพิษได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปที่แถบการนำมากจะส่งผล ให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลจำนวนมาก และปริมาณของหมู่ •OH จะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดได้ดียิ่งขึ้น [63]

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสี IC โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

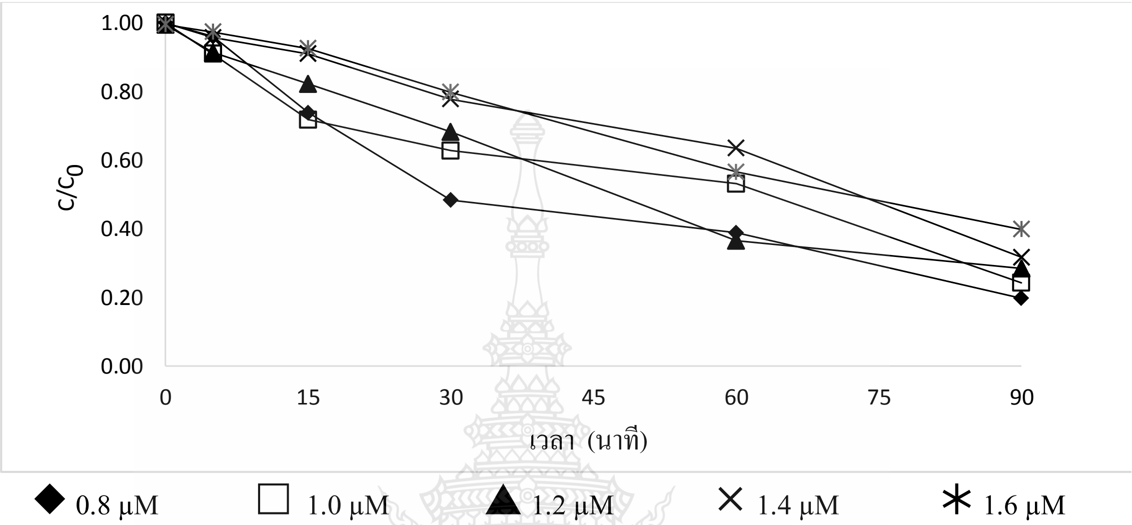
เวลาที่ใช้ในการทดลอง (min)	ความเข้มข้นของสี IC		ประสิทธิภาพการบำบัดสี IC
	เริ่มต้น (μM)	สุดท้ายเฉลี่ย (μM)	
90	0.8	0.19	76.19
	1.0	0.24	75.64
	1.2	0.34	71.35
	1.4	0.44	68.25
	1.6	0.55	65.63

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสี RB5 โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

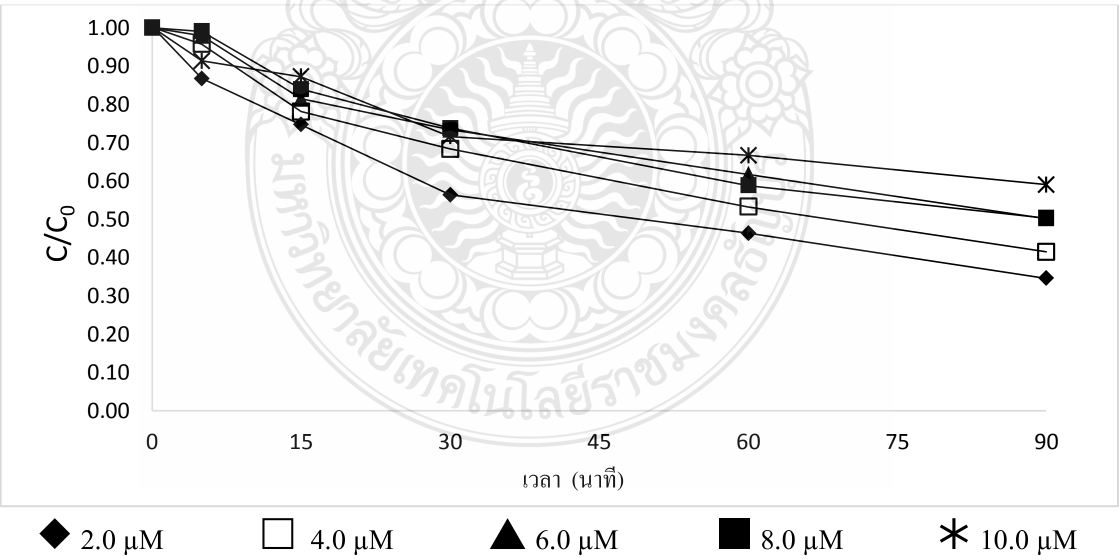
เวลาที่ใช้ในการทดลอง (min)	ความเข้มข้นของสี IC		ประสิทธิภาพการบำบัดสี RB5
	เริ่มต้น (μM)	สุดท้ายเฉลี่ย (μM)	
90	2.0	0.69	65.59
	4.0	1.65	58.66
	6.0	2.22	49.86
	8.0	3.36	49.75
	10.0	5.89	41.06

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี IC กับสี RB5 ที่ความเข้มข้น 0.8 – 1.6 μM และ 2.0 – 10.0 μM ที่เวลา 90 นาที ตามลำดับ พบว่าร้อยละของสีมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่า โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี IC ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.8 μM มีประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 76.19 สำหรับสี RB 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RB 5 ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.0 μM มีประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 65.59 ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงสีย้อมผสมจะมีสีเข้มขึ้น ทำให้แสงยูวีส่องกระทบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้น้อยลง ทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานกระตุ้นน้อยลง มีผลทำให้ปริมาณของอนุภาคไฮดรอกซิล มีปริมาณน้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีมีค่าน้อยลงเมื่อ

ความเข้มข้น ของสีเพิ่มขึ้น [62] ดังนั้น จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของสีต่ำ สามารถให้ค่าการสลายสีย้อมได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นสีสูง และในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสีย้อมโดยอนุมูลไฮดรอกซิลเข้ามาทำปฏิกิริยาการสลายของสีย้อม



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี IC ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี RB5 ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 และเวลา ของสี IC และ สี RB 5 ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes สำหรับผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี IC ในน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสี มีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว พบว่า สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีอย่างชัดเจนในช่วงแรก โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 5-30 นาทีแรก สำหรับการทดลองนี้มีข้อจำกัดเนื่องจาก เมื่อเวลาผ่านไปปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้าลง เกิดปัจจัยจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) [63] ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยต้องอาศัยกลไกการดูดติดผิวที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดย •OH ที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอนุภาคในช่วงแรกที่ถูกดูดติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยายังย่อยสลายไม่หมด ทำให้อนุภาคที่เหลืออยู่ไม่สามารถดูดติดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรก เนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกประกอบไปด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ได้แก่การดูดติดผิว และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ในขั้นตอนแรกอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC จะถูกดูดติดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตบนตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้น สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีได้ เนื่องจากอนุภาค TiO_2 มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลต และมีความสามารถการกระเจิงแสงที่ดี ประกอบกับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.25 eV ส่งผลให้ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยัง แถบการนำได้ดีขึ้น เนื่องจากขนาดช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าว เป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตได้ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบ เวเลนซ์(Valance band) ถูกกระตุ้นไปสู่แถบกระตุ้น หรือแถบการนำ (Conduction band) และลดอัตราการเกิดรีคอมบิเนชันของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นกลไกหลักต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [64] โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติดโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

โครงสร้างผลึก	สารอินทรีย์ที่ใช้ทดสอบ	ระยะเวลาการฉายแสง	ประสิทธิภาพการย่อยสลาย	เอกสารอ้างอิง
TiO_2- nanotubes	IC RB5	1 ชั่วโมง	TiO_2- nanotubes มีประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ดีที่ค่าความเข้มข้นสีต่ำ ประสิทธิภาพการกำจัดสี IC เท่ากับร้อยละ 76.19 และ สี RB5 เท่ากับร้อยละ 69.59	งานวิจัยนี้
TiO_2- nanotubes	Methylene blue	4 ชั่วโมง	TiO_2- nanotubes ทีความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีประสิทธิภาพในการสลายสีของ Methylene blue ดีกว่า TiO_2- nanotubes ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	[65]
TiO_2- nanotubes	Methyl orange	3 ชั่วโมง	TiO_2- nanotubes เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะทำให้ Methyl orange สลายตัวได้สูงสุดร้อยละ 76	[66]
TiO_2- nanotubes เจือทองคำ	Acid Orange 7		อนุภาคนาโนทองคำเจือในท่อไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการสลายตัวของ Acid Orange 7 ดีกว่าแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์	[51]

4.3 จลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ สี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และสี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 1,580 $\mu W/cm^{-2}$ จากการทดลองดังกล่าวข้างต้น จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first-order) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการ 4.1 และ 4.2

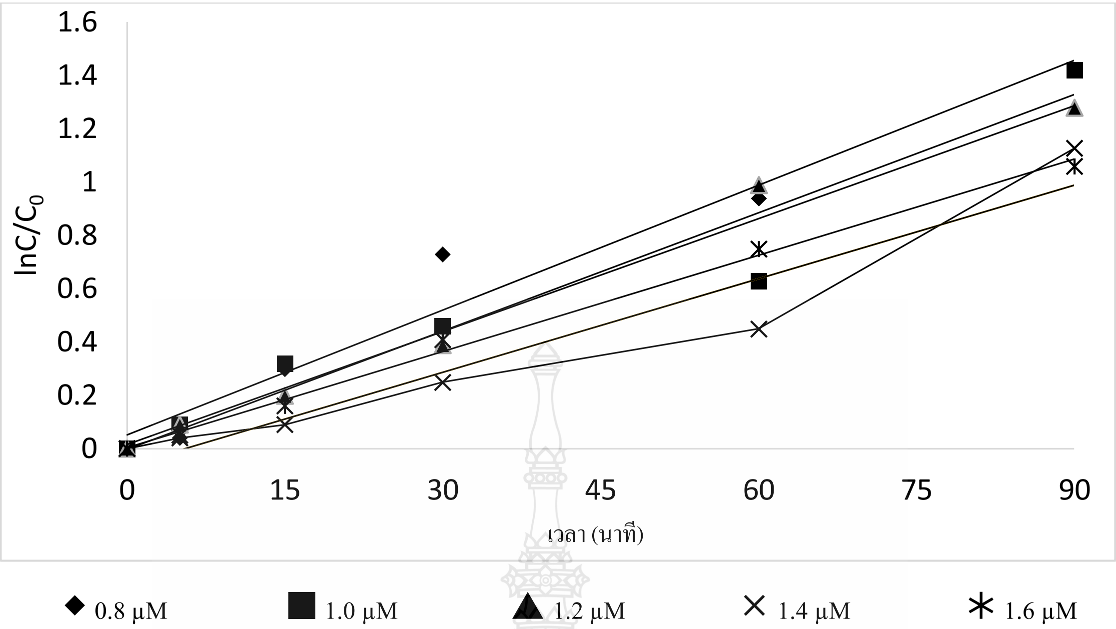
$$r = -\frac{dC_a}{dt} = k'A \qquad (4.1)$$

$$\ln\frac{C_0}{C} = -k't \qquad (4.2)$$

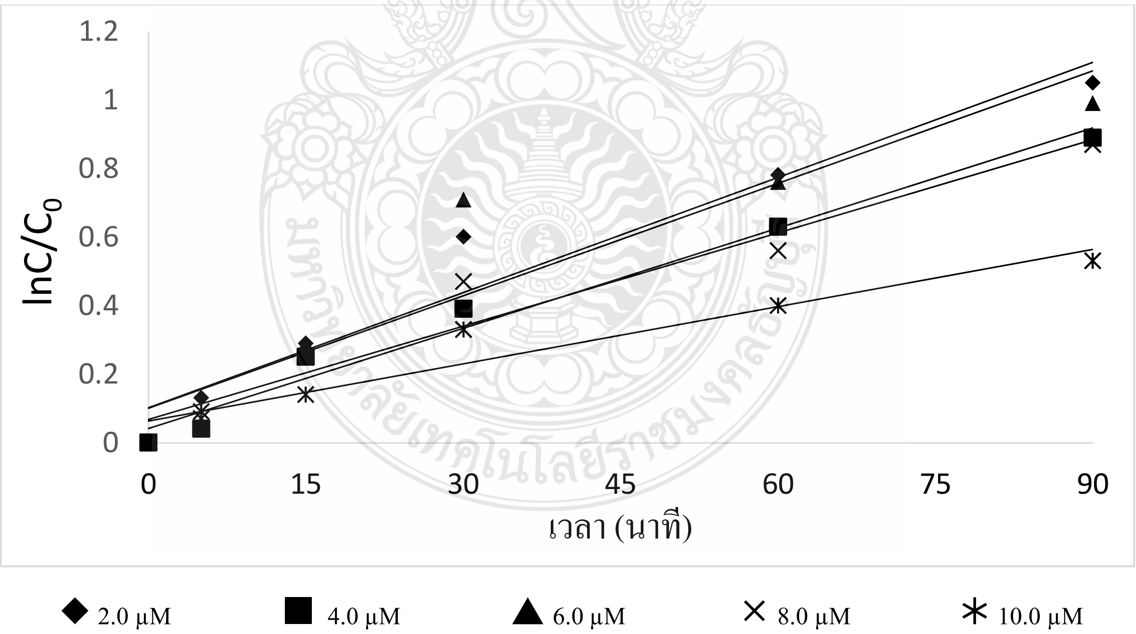
เมื่อ	r	คือ	อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่จุดสมดุล($\mu mol.L^{-1}min^{-1}$)
	C_0	คือ	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสี ($\mu mol.L^{-1}$)
	C_a	คือ	ค่าความเข้มข้นของสีที่เวลาใดๆ ($\mu mol.L^{-1}$)
	k'	คือ	ค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา ($\mu mol.L^{-1}min^{-1}$)
	t	คือ	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

จากสมการ 4.2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงและค่า ($\ln C/C_0$) มีจุดตัดแกนที่ (0,0) ดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k'=k_{app}$) ซึ่งสามารถนำคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสมการที่ 4.3 และตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \qquad (4.3)$$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5

ตารางที่ 4.6 ค่าจลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี IC ที่แตกต่างกัน

C_0 (μmol.L^{-1})	k_{app} (μmol.L^{-1}min^{-1})	r_0 (μmol.L^{-1}min^{-1})	r_0^{-1} (μmol.Lmin)	C_0^{-1} (μmol.Lmin)
0.8	2.17×10^{-3}	1.73×10^{-3}	576.04	1.25
1.0	1.84×10^{-3}	1.84×10^{-3}	543.48	1.00
1.2	1.73×10^{-3}	2.07×10^{-3}	481.70	0.83
1.4	1.62×10^{-3}	2.26×10^{-3}	440.92	0.71
1.6	1.76×10^{-3}	2.81×10^{-3}	355.11	0.63

ตารางที่ 4.7 ค่าจลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RB5 ที่แตกต่างกัน

C_0 (μmol.L^{-1})	k_{app} (μmol.L^{-1}min^{-1})	r_0 (μmol.L^{-1}min^{-1})	r_0^{-1} (μmol.Lmin)	C_0^{-1} (μmol.Lmin)
2.0	4.1×10^{-3}	8.2×10^{-3}	121.95	0.50
4.0	3.0×10^{-3}	12.0×10^{-3}	83.33	0.25
6.0	2.4×10^{-3}	14.4×10^{-3}	69.44	0.17
8.0	1.6×10^{-3}	12.8×10^{-3}	78.12	0.13
10.0	1.3×10^{-3}	13.0×10^{-3}	76.92	0.10

สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เป็นสมการที่อาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์ [67] ดังสมการที่ 4.4

$$\frac{C_{ads}}{C_{\max}} = \frac{K_L C}{1 + K_L C} \tag{4.4}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสีที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ณ เวลาใดๆ (μmol.L^{-1})

C_{ads} คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (μmol.L^{-1})

C_{max} คือ ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุดบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (μmol.L^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของสมการแลงเมียร์ (min^{-1})

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

แทนค่า C_a ในอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม สมการที่ 4.1 ด้วยค่า C_{max} จากสมการที่ 4.4 จะได้ดังสมการ ที่ 4.5

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'C_{ads} = \frac{k'C_{\max}K_L C}{1+K_L C} \tag{4.5}$$

k'Cmax (μmol.L^{-1}min^{-1}) คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถแทนด้วย k_r จะได้ดังสมการที่ 4.6

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'\mathrm{C}_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1+K_L C} \tag{4.6}$$

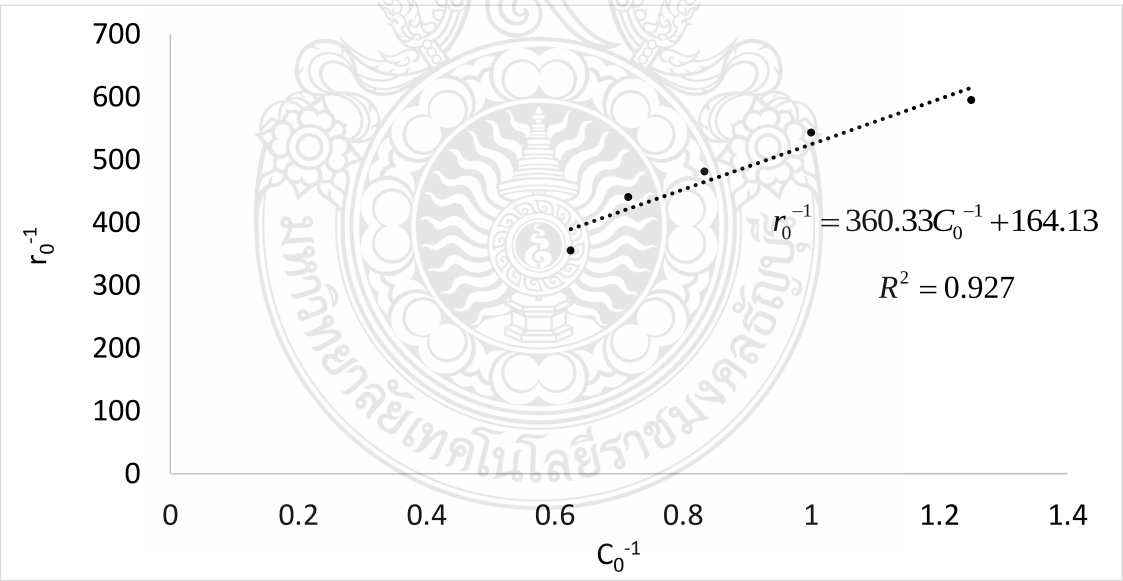
ในการคำนวณนั้นเลือกใช้จุดเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อหาค่าคงที่ของสมการเนื่องจากในระหว่างที่มีการบำบัดสี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นซับซ้อนมาก มีการเกิดปฏิกิริยาดูดซับและการบำบัดไปพร้อมๆกัน จึงเลือกช่วงที่มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ น้อยที่สุด

คือช่วงเริ่มต้นของการทดลองที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสีเริ่มต้น (C_0) กับค่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (r_0) ได้ดังสมการที่ 4.7

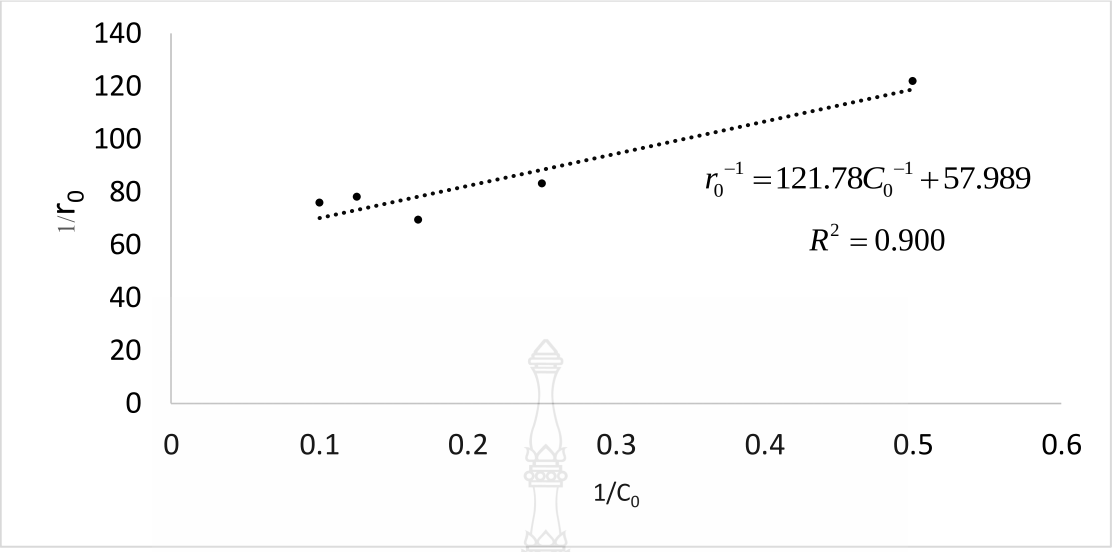
$$r_0 = \left(-\frac{dC_{ads}}{dt}\right)_{t=0} = \frac{k_r K_L C_0}{1+K_L C_0} \tag{4.7}$$

จากสมการที่ 4.7 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 4.8 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C_0$ กับ ค่า $1/r_0$ แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K_L}\cdot\frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \tag{4.8}$$

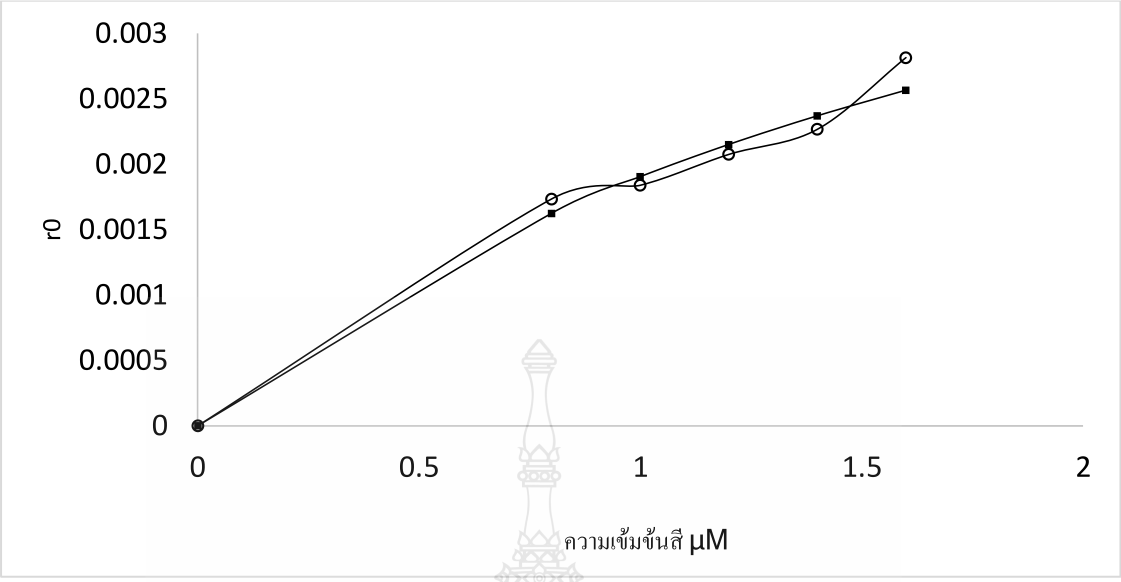


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง C_0^{-1} กับ r_0^{-1}ของสี IC



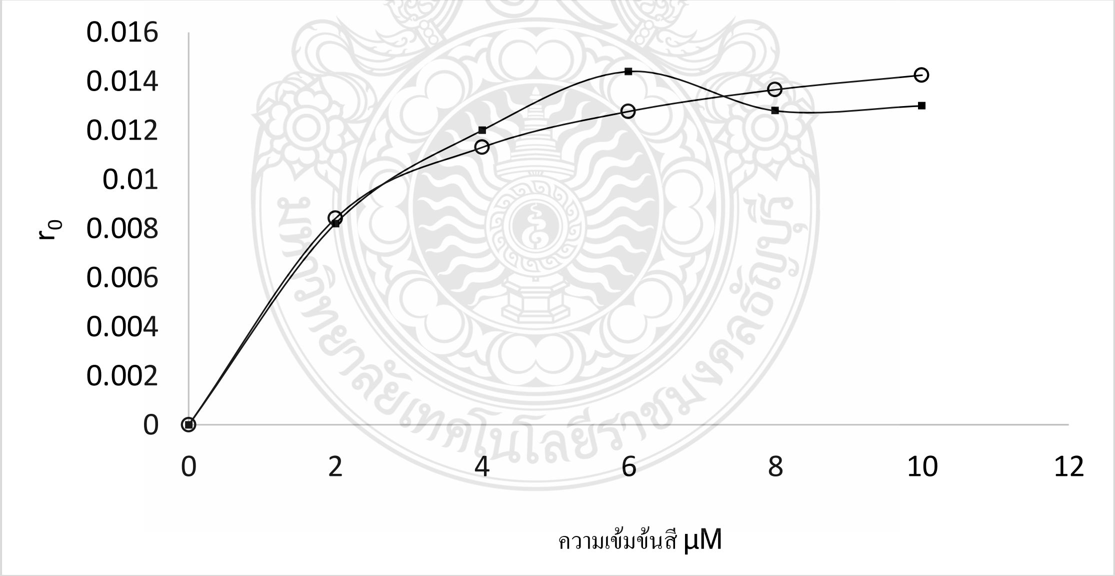
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่าง C_0^{-1} กับ r_0^{-1}ของสี IC ของสี RB5

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$ สี IC ได้กราฟเส้นตรง มีสมการเส้นตรงคือ y = 360.33x + 164.13 มีความชันของกราฟคือ $\frac{1}{k_r K_L}$ มีค่าเท่ากับ 360.33 และจุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_r}$ มีค่าเท่ากับ 164.13 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.0061 μmol.$L^{-1}min^{-1}$ และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.456 min^{-1}สำหรับสี RB5ได้กราฟเส้นตรง มีสมการเส้นตรงคือ y = 121.78x + 57.989 มีความชันของกราฟคือ $\frac{1}{k_r K_L}$ มีค่าเท่ากับ 121.78 และจุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_r}$ มีค่าเท่ากับ 57.989 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.017 μmol.$L^{-1}min^{-1}$และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.483 min^{-1}นอกจากนั้นสามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ r_0 ที่ได้จากสองสมการ แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.14 และ 4.5 โดยเฉพาะในช่วงความเข้มสี ต่ำๆ ที่ 0.8 -1.0 μM ของสี IC และที่ 2.0-4.0 μM ของสี RB 5 โดยมีการเปรียบเทียบค่าจลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ ดังตารางที่ 4.7



■ จากสมการ Langmuir-Hinshelwood ○ จากสมการ Pseudo first-order

รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (r_0) จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order ของสี IC



○ จากสมการ Langmuir-Hinshelwood ■ จากสมการ Pseudo first-order

รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (r_0) จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order ของสี RB5

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

สารมลทิน	ค่าจลนพลศาสตร์	สี	เอกสารอ้างอิง
Pd - TiO_2	$4.00 \times 10^{-3} min^{-1}$	Methylene blue	[50]
Au – TiO_2	5.20×10^{-3} min^{-1}	Methylene blue	[50]
C – TiO_2	$4.63 \times 10^{-4} min^{-1}$	Methylene blue	[50]
P25 – TiO_2	k_r = 0.06 μmol.$L^{-1}min^{-1}$ K_L = 0.88 min^{-1}	Methy orangre	[53]
TiO_2	1.88×10^{-3} min^{-1}	violet	[68]

บทที่ 5
สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes และประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดลองการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

การทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ ที่เตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันนั้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่เตรียมขึ้นที่ดีที่สุดมีการเตรียมที่ความต่างศักย์เท่ากับ 50 V ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีความสม่ำเสมอ และความหนาแน่นสูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 80.43 nm รวมถึงมีค่าความลึกที่มากที่สุดเท่ากับ 74.87 nm นอกจากนี้ผลการวัดค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ เท่ากับ 16.72° เป็นพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนที่มีขั้วได้ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes พบว่าบนแผ่นปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันพบค่า Ti สูงถึงร้อยละ 90 และ การแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุที่อยู่ในแผ่น Ti ทางผู้ศึกษาจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ที่ค่าความต่างศักย์ดังกล่าวมาทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

5.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ เตรียมด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ที่ความต่างศัย์ 50 V ความเข้มข้นของสี IC และสี RB5 ที่มีค่าแตกต่างกัน และแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสงเท่ากับ 1,580 $\mu W/cm^2$ พบว่าความเข้มข้นของสีมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสีเริ่มต้นต่ำ และเมื่อเพิ่มเวลาการส่องแสงมากขึ้น ปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีกว่า โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสี IC และ RB5 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่ำที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุดของสี IC และ RB5 เท่ากับร้อยละ 76.19 และร้อยละ 65.59 ตามลำดับ

5.1. ค่าจลนพลศาสตร์ในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียงสังเคราะห์โดยใช้สี IC และสี RB 5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน เมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เพื่อกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) ของสี IC และ RB5 เท่ากับ 0.0061 μmol.L^{-1}min^{-1} และ 0.017 μmol.L^{-1}min^{-1}ตามลำดับ และคำนวณค่าคงที่การดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) ของสี IC และ RB5 เท่ากับ 0.0061 min^{-1}และ 0.017 min^{-1}ตามลำดับ 0.456 กับ 0.483 ตาลำดับ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของสีในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood equation กับ r_0 ที่ได้จากสมการ Pseudo first-order พบว่ามีความสัมพันธ์กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่ำ จะมีค่าชิดกันมาก และจะเริ่มแยกออกจากกันเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ มีความซับซ้อนมาก มีทั้งปฏิกิริยาการย่อยสายสีและปฏิกิริยาการดูดซับสีไปพร้อมๆกัน ส่งผลให้เมื่อความเข้มข้นสูงๆ มีอนุภาคจำนวนมากที่ต้องการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์ ทำให้ปฏิกิริยาในการบำบัดช้ากว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ควรศึกษาผลการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่มากขึ้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่ดีขึ้น

5.2.2 ในการศึกษาการบำบัดสีสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ใช้น้ำเสียจากการสังเคราะห์จึงควรทดสอบกับน้ำเสียจริงจากภาคอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

[1] Walsh F. C, et al. 2006. "Synthesis of novel composite materials via the deposition of precious metals onto protonated titanate (TiO_2) nanotubes." **Transactions of the Institute of Metal Finishing**. vol. 84 : 293-299.

[2] Kavitha, D. & Namasivayam, C. (2007). Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by Coir Pith carbon Bioresource Technology, 98, 14-21.

[3] Barth V. H., Habs M., Klute R., Miiller S. and Tauscher B. 1982. Water treatment on Moringa oleifera. Chem. z. 106 (2): 75-78

[4] ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. "การกำจัดสีรีแอกทีฟเยลโล 17 และสีรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[5] ศรัญญา ทองอุ่น. 2555. "การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน". วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[6] ชลดา ธีรการุณวงศ์. 2555. "วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์โครงสร้างและการประยุกต์ใช้". วารสารวิทยาศาสตร์และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่14 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มีนาคม) : 44-52.

[7] Fu Y, et al. 2009. "Synthesis of Pd/TiO2 nanotubes/Ti for oxygen reduction reaction in acidic solution." Journal of Power Sources. vol. 189 : 982-987.

[8] ธนโชติ ธรรมชาติ. 2553. "การเตรียมและประเมินผลเส้นใยอิเล็กโทรสปันเชลแล็กที่บรรจุสารต้านจุลชีพ." ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการทางเภสัชศาสตร์ บัณฑิตวิทาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[9] สรพงษ์ ภวสุปรีย์ และคณะ. 2556. "การเตรียมท่อนาโนจากแร่อิลเมไนท์ของไทยโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและสมบัติการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงในช่วงคลื่นแสงที่สายตามองเห็น." คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[10] พิสิษฐ์พงษ์ หมื่นประเสริฐดี, “การใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์สลายของเสียโทลูอีนในน้ำทิ้งระดับห้องปฏิบัติการ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาเคมีประยุกต์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.

[11] M.A. Tarr, Chemical Degradation Methods for Wastes and. Pollutants, Marcel Dekker, New York, 2003. 5.

[12] W. Z. Tang, Physicochemical Treatment of Hazardous Wastes. CRC PRESS. New York.2004.

[13] Carp, O., Huisman, C.L. and Reller, A. (2003). Photoinduced reactivity of titanium dioxide, Progress in Solid State Chemistry, vol. 32, pp. 33-177.

[14] Brandon Chiou, et al. 2013. “Characterization of nano-porous TiO_2 film prepared by sol–gel process and its application to dye-sensitized solar cell” Journal of the Chinese Chemical Society. vol. 60 : 81–84.

[15] D. Regonini, et al. 2013. “A review of growth mechanism, structure and crystallinity of anodized TiO_2 nanotubes.” Materials Science and Engineering. vol. 74 : 377–406.

[16] Sonsa-ard , N.2007. “Effect of addition of second metal oxide on hydrophilic property of TIO_2 thin film” Master of Engineering Chemical Engineering Chulalongkorn University.

[17] สวนีย์ บรรพตพิทักษ์. 2551. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[18] สุกัญญา ศารทูลฑัต, วรรนิภา หงส์โต, และวราภรณ์ นันทพันธ์ “การศึกษาผลของปริมาณและขนาดอนุภาคที่มีผลของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการบดบังแสงของป้ายโฆษณาที่ผลิตจากโพลิเมทิลคริเลต.” ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2549.

[19] กาญจนา ลือพงศ์ และนงนุช ศศิพร. 2553. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตคะตะลิติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ” รายงานการวิจัย. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[20] วุฑธินันท์ ศิริพงศ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[21] หทัยทิพย์ พันฤทธิ์ดำ. 2556. "การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[22] Muhammad Imran, Saira Riaz and Shahzad Naseem. 2013. "Synthesis and characterization of titania nanoparticles by sol-gel technique." **Materials Today**. vol. 2 : 5455–5461.

[23] Alessandro Cannavale, et al. 2010. " Multifunctional bioinspired sol-gel coatings for architectural glasses. **Building and Environment**. vol. 45 : 1233–1243.

[24] ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์. 2555. "คุณสมบัติและจลพลศาสตร์ของการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโซลเจล." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[25] Y. Bessekhouad, D. Robert, and J. and V. Weber. 2003. "Preparation of TiO_2 nanoparticles by Sol-Gel route." Internation Journal of Photoenergy. vol. 5 : 153-157.

[26] Raja Thiyagarajan and Omprakash Sahu. 2014. "Preparation and Characterization of Polymer Nano Fibres Produced from Electrospinning." Journal of Optoelectronics Engineering. vol. 2 : 24-28.

[27] Jayesh Doshi and Darrell H.Reneker. 1995. "Electrospinning process and applications of electrospun fibers." Journal of Electrostatics. vol. 35 : 151-160.

[28] อรวรรณ สุวรรณทอง. 2558. "กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสาหรับประยุกต์ใช้ทาง การแพทย์ วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 43 ฉบับที่ 4 : 564-578.

[29] Bianca Caratão, et al. 2014. "Properties of Electrospun TiO_2 Nanofibers." Journal of Nanotechnology. vol. 2014 : 1-5.

[30] สรายุทธ แสวงผล. 2555. "การสร้างโครงสร้างระดับนาโนโดยวิธีอะโนไดซ์เซชั่นและอิเล็กตรอนบีลิโทกราฟีบนพื้นผิวไทเทเนียม." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[31] Gopal K. Mor, et al. 2006. "A review on highly ordered, vertically oriented TiO_2 nanotube arrays: Fabrication, material properties, and solar energy applications." Solar Energy Materials and Solar Cells. vol. 90 : 2011-2075.

[32] อัคริ นทร์ บุญประเสริฐ. 2557. “ผลของสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ที่มีต่อท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

[33] Sepideh Minagar, et al. 2012. “A review of the application of anodization for the fabrication of nanotubes on metal implant surfaces.” Acta Biomater. vol. 8 : 2875–2888.

[34] D. Regonini, et al. 2013. “A review of growth mechanism, structure and crystallinity of anodized TiO2 nanotubes.” Materials Science and Engineering R. vol. 74 : 377–406.

[35] Thomas Cottineau, et al. 2016. “TiO2 Nanotube arrays : Influence of tube length on the photocatalytic degradation of Paraquat” Applied Catalysis B: Environmental. vol. 194 : 1–6.

[36] Chen Shiyi, et al. 2017. “Morphology evolution of TiO2 nanotubes by a slow anodization in mixed electrolytes.” Surface & Coatings Technology. vol. 321 : 257–264.

[37] ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. “การกำจัดสีรีแอกทีฟเยลโล 17 และสีรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[38] นครินทร์ แพรชาย. 2549. “การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใช้แกลบที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี.” ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[39] T.Rojviroon, O.Rojviroon and S.Sirivithayapakorn. 2015. “Photocatalytic decolourisation of dyes using TiO_2 thin film photocatalysts.” Surface Engineering. vol. 32 : 562-569.

[40] Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM), [Online] Available : http://photometrics.net/field-emission-scanning-electron-microscopy-fesem/(1march 2018)

[41] X-ray Fluorescence (XRF), [Online] Available : http://web2.mfu.ac.th/center/stic/stic-information.html. (1 march 2018).

[42] กิตติยา สิงห์นาง และพลอย กัณหา. 2556. “การกำจัดสีในน้ำเสียโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก.” ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[43] ทัศนีย์ วรพิบูลพงศ์. 2548. "ผลของลักษณะฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกรีดักชันของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมโดยใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบแผ่นหมุน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[44] Ioannis K. Konstantinou and Triantafyllos A. Albanis. 2004. "TiO_2-assisted photocatalytic degradation of azo dyes inaqueous solution : kinetic and mechanistic investigations : A review" Applied Catalysis B: Environmental. vol. 49 : 1–14.

[45] Liang H-c., Li X-z. 2009. "Effects of structure of anodic TiO_2 nanotube arrays on photocatalytic activity for the degradation of 2,3-dichlorophenol in aqueous solution". J Hazard Mater. 162: 1415-1422.

[46] Mor G.K., Varghese O., Paulose M., Shankar K.,Grimes C. 2006. "A review on highly ordered, vertically oriented TiO2 nanotubes arrays:Frabrication, material properties, and solar energy applications". Solar Energy Materials & Solar Cells.90(14): 2011-2075

[47] Wang, et al. 2012. "Photocatalytic Property of Fe Doped Anatase and Rutile TiO_2 Nanocrystal Particles Prepared by Sol – Gel Technique." Applied Surface Science. vol.263 : 260-265

[48] Narakorn Chanprasert, et al. 2006. "Photocatalytic degradation of organic dyes by titanium dioxide in an air-lift reactor" Chemical Engineering Master of Engineering Chulalongkorn University.

[49] วุทธินันท์ ศิริพงศ์, 2544, "การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[50] สรายุทธ แสวงผล, 2555, "การสร้างโครงสร้างระดับนาโนโดยวิธีอะโนไดซ์เซชั่นและอิเล็กตรอนบีมลิโทกราฟีบนพื้นผิวไทเทเนียม" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[51] อติพล สว่างอารามย์ , 2557, "การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลู"วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[52] อัครินทร์ บุญประเสริฐ. 2557. "ผลของสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ที่มีต่อท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ สังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[53] Guo-jian CAO, et al. 2014. "Fabrication and photodegradation properties of TiO_2 nanotubes on porous Ti by anodization". Transactions of Nonferrous Metals Society of China. vol. 24 : 2581—2587.

[54] Wei Zhu, et al. 2009. "Metal nanoparticle chains embedded in TiO_2 nanotubes prepared by one-step electrodeposition." Electrochim Acta. vol. 55 : 480-484.

[55] Lianjie Qin, et al. 2015. "Effect of Anodization Parameters on Morphology and Photocatalysis Properties of TiO_2 Nanotube Arrays." Journal of Materials Science & Technology. vol. 31 : 1059–1064.

[56] Wilaiwan Chanmanee, et al. 2007. "Fabrication of TIO2 nanotube arrays by anodization and its applications in photoreduction of chromium(VI)" Environmental Management Chulalongkorn University.

[57] อารียา เอี่ยมบู่ และคณะ, 2011 , "ผลของปัจจัยตัวแปรเสริมของการแอโนไดเซชันต่อลักษณะสัณฐานพื้นผิวของไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า"วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[58] Liang, Hai-Chao; & Li, Xiang-Zhong. (2009). Effects of Structure of Anodic TiO_2 Nanotube Arrays on Photocatalytic Activity for the Degradation of 2,3-Dichorophenol in Aqueous Solution. J. Hazard. Mater. 162(2-3): 1415-1422.

[59] Macak, J.M. and Schmuki, P. Anodic growth of self-organized anodic TiO2 nanotubes in viscous electrolytes. Electrochimica Acta, 2006. 52(3): p. 1258- 1264

[60] ศรัญญา ทองอุ่น. (2555). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[61] Sun, L., Li, J., Wang, C.L., Li, S.F., Chen, H.B and Lin, C.J. (2009). An electrochemical strategy of doping Fe^{3+} into TiO_2 nanotube array films for enhancement in photocatalytic activity. Solar Energy Materials and Solar Cell 93: 1875-1880.

[62] Kontos, A.G., Katsanaki, A., Likodimos, V., Maggos, T., Kim, D., Vasilakos, C., Dionysiou, D.D., Schmuki, P. and Falaras, P. (2012). Continuous flow photocatalytic oxidation of nitrogen oxides over anodized nanotubular titania films. Chemical Engineering Journal 179: 151 – 157.

[63] Liu, F., Lu, L., Xiao, P., He, H., Qiao, L., & Zhang, Y. (2012). Effect of oxygen vacancies on photocatalytic efficiency of TiO_2 effect of oxygen vacancies on photocatalytic efficiency of TiO_2 nanotubes aggregation. Bulletin of the Korean Chemical Society, 33, 2255-2259.

[64] Zyoud, Ahed., Zaatar, Nida.,l Saadeddin, Iyad., Helal, Muath H., Campet, Guy., Hakim, Moulki.,Park, DaeHoon and Hilal, Hikmat S. 2011. Alternative natural dyes in water purification: Anthocyanin as TiO_2- sensitizer in methyl orange photodegradation. Solid State Sciences 13(6): 1268-1275.

[65] Bogatu C., Perniu D., Sau C., Iorga O., Cosnita M., and Duta A., 2017. "Ultrasound Assisted Sol-Gel Tio2 Powders and Thin Films for Photo- catalytic Removal of Toxic Pollut- ants", Ceramics International. 43, 11: 7963-7969. [16] Ola O. and Maroto-Valer M.M., 2015. "Review of Material Design and Reactor Engineering on TiO_2 Photo- catalysis for CO_2 Reduction", Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 24:16-42

[67] Bao, Y. & Zhang, G. (2012) Study of adsorption characteristics of methy- lene blue onto activated carbon made by Salix Psammophila. Energy Procedia, 16, 1141-1146.

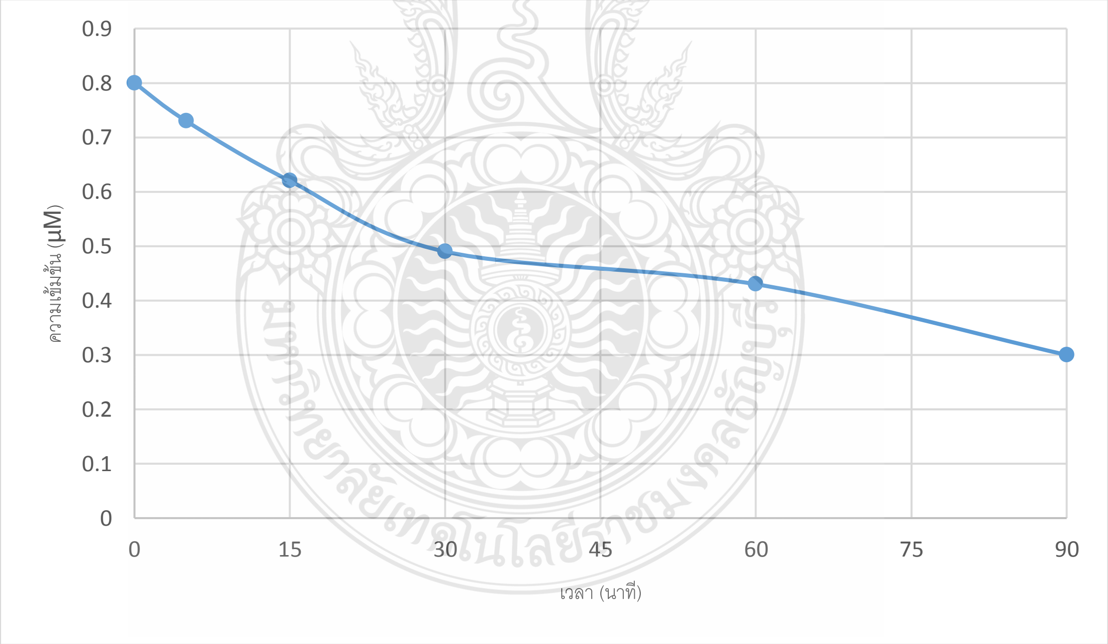
[68] Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J., Delgado-Regalado, A., Jurado-Bustos, C. 2009. Removal of Alizarin Violet 3R (anthraquinonic dye) from aqueous solutions by natural coagulants. J Hazard Mater. Oct 15, 170(1): 43-50.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.8 μM

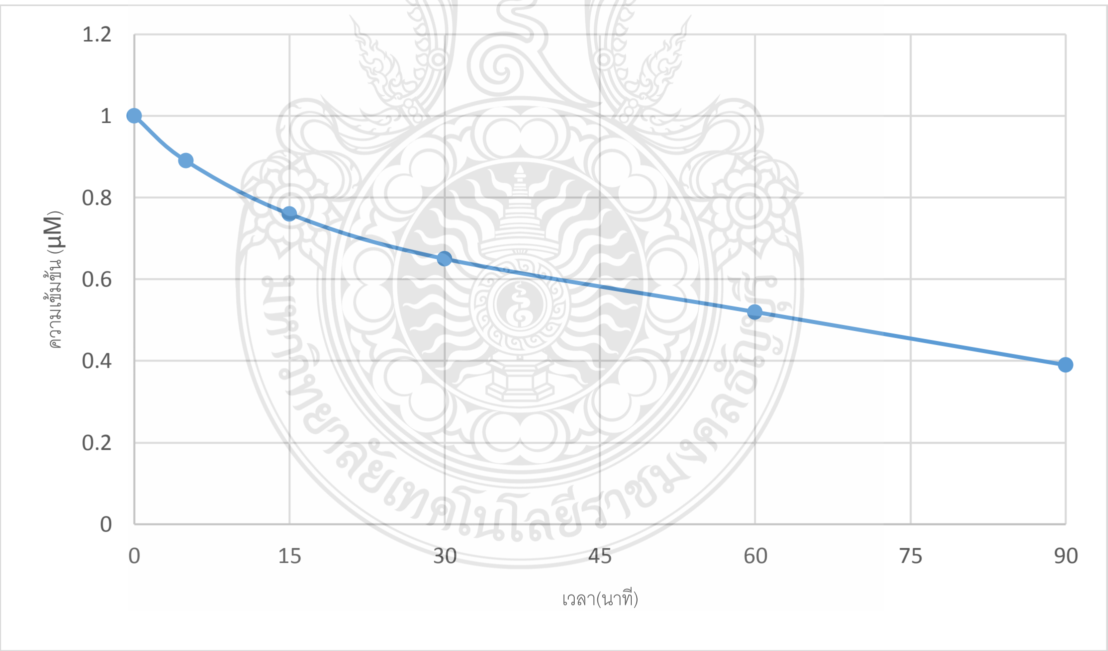
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	0.80	0.00	0.80	0.00	0.80	0.00
5	0.77	3.968	0.68	14.545	0.73	9.26
15	0.59	26.190	0.64	20.000	0.62	23.10
30	0.39	51.587	0.60	25.455	0.49	38.52
60	0.31	61.111	0.55	31.515	0.43	46.31
90	0.19	76.190	0.41	49.091	0.30	62.64



ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.8 μM

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.0 µM

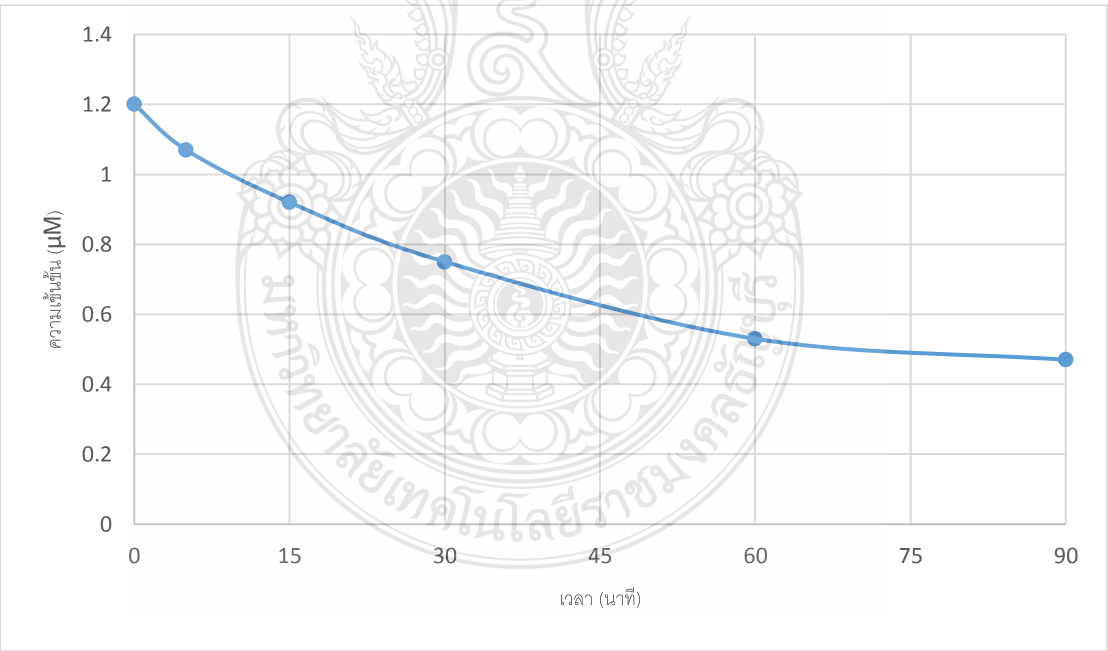
นาที (min)	การบำบัดสี					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
5	0.91	8.97	0.87	12.55	0.89	10.76
15	0.72	28.21	0.81	19.05	0.76	23.63
30	0.63	37.18	0.67	32.90	0.65	35.04
60	0.53	46.79	0.51	48.92	0.52	47.86
90	0.24	75.64	0.53	47.19	0.39	61.41



ภาพที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.0 µM

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.2 µM

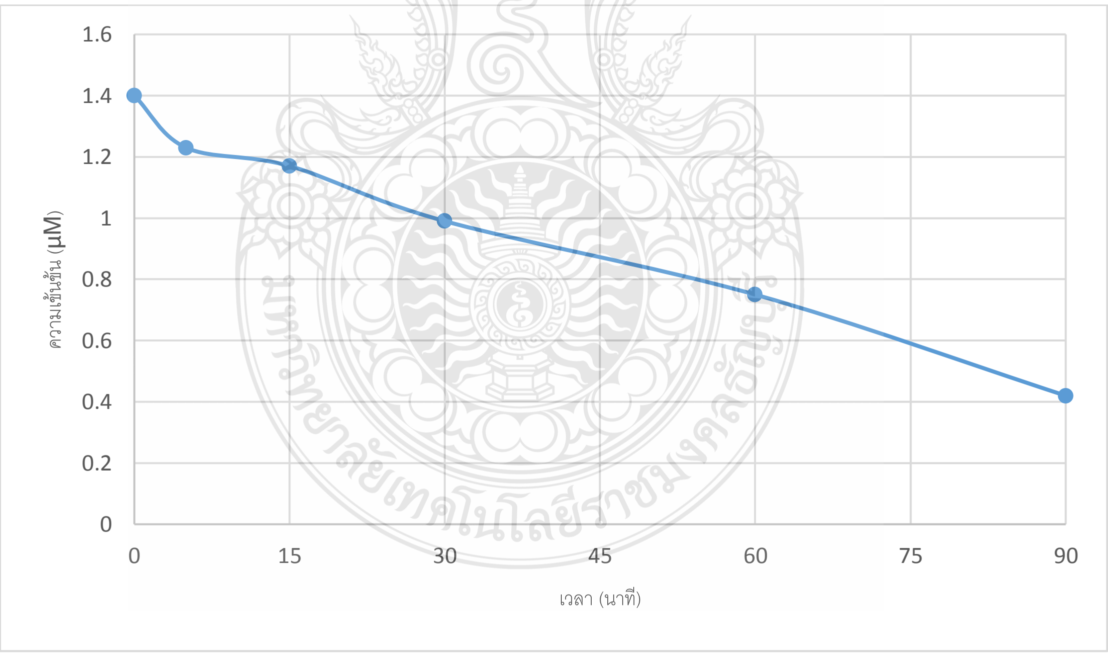
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	1.20	0.00	1.20	0.00	1.20	0.00
5	1.10	8.11	1.04	12.45	1.07	10.28
15	0.99	17.30	0.85	28.87	0.92	23.08
30	0.82	31.35	0.68	42.89	0.75	37.12
60	0.44	63.24	0.62	47.68	0.53	55.46
90	0.34	71.35	0.59	50.41	0.47	60.88



ภาพที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.2 µM

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.4 µM

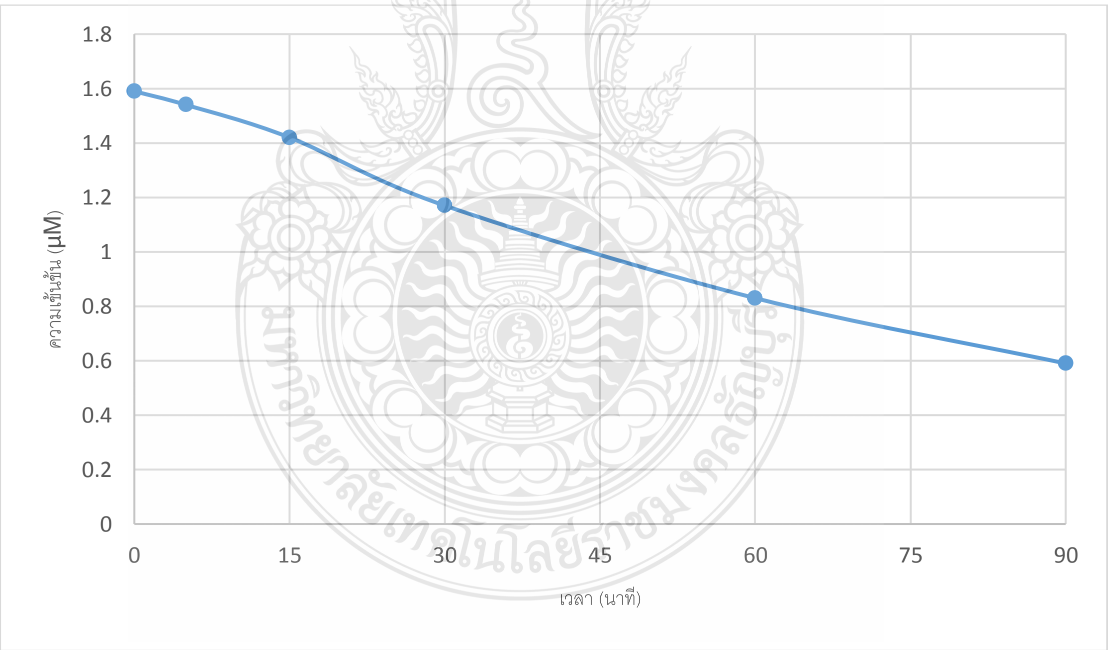
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	1.40	0.00	1.39	0.00	1.40	0.00
5	1.34	4.23	1.13	19.61	1.23	11.92
15	1.27	8.99	1.07	23.53	1.17	16.26
30	1.09	22.22	0.89	36.27	0.99	29.25
60	0.89	36.51	0.62	55.88	0.75	46.20
90	0.44	68.25	0.40	71.57	0.42	69.91



ภาพที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.4 µM

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.6 µM

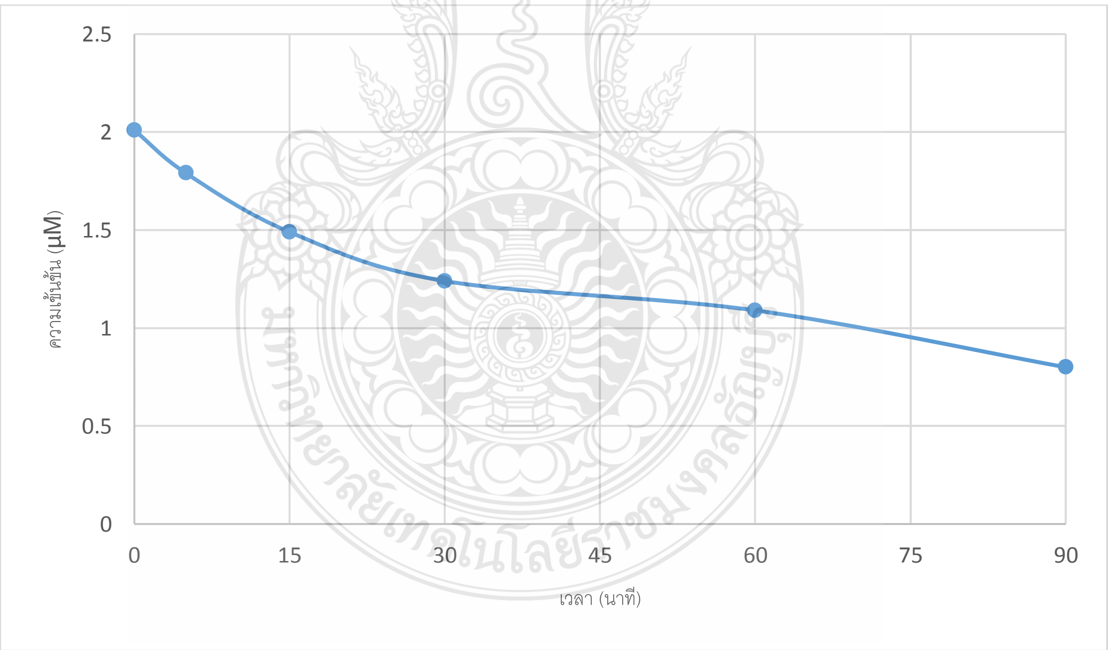
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	1.60	0.00	1.59	0.00	1.59	0.00
5	1.52	4.46	1.56	2.20	1.54	3.33
15	1.36	14.73	1.48	7.04	1.42	10.89
30	1.06	33.48	1.28	19.82	1.17	26.65
60	0.75	53.13	0.91	43.17	0.83	48.15
90	0.55	65.63	0.64	59.91	0.59	62.77



ภาพที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 1.6 µM

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 2.0 μM

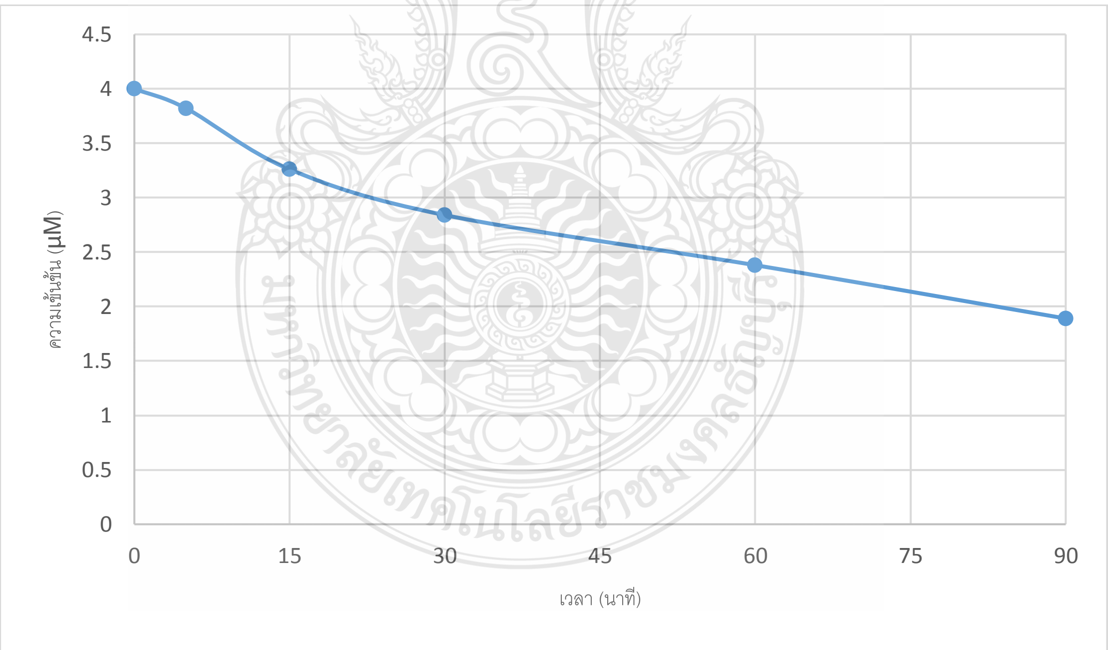
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	2.00	0.00	2.01	0.00	2.01	0.00
5	1.73	13.53	1.84	8.19	1.79	10.86
15	1.49	25.59	1.50	25.36	1.49	25.47
30	1.13	43.82	1.34	32.98	1.24	38.40
60	0.93	53.82	1.25	37.62	1.09	45.72
90	0.69	65.59	0.91	54.78	0.80	60.18



ภาพที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 2.0 μM

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 4.0 μM

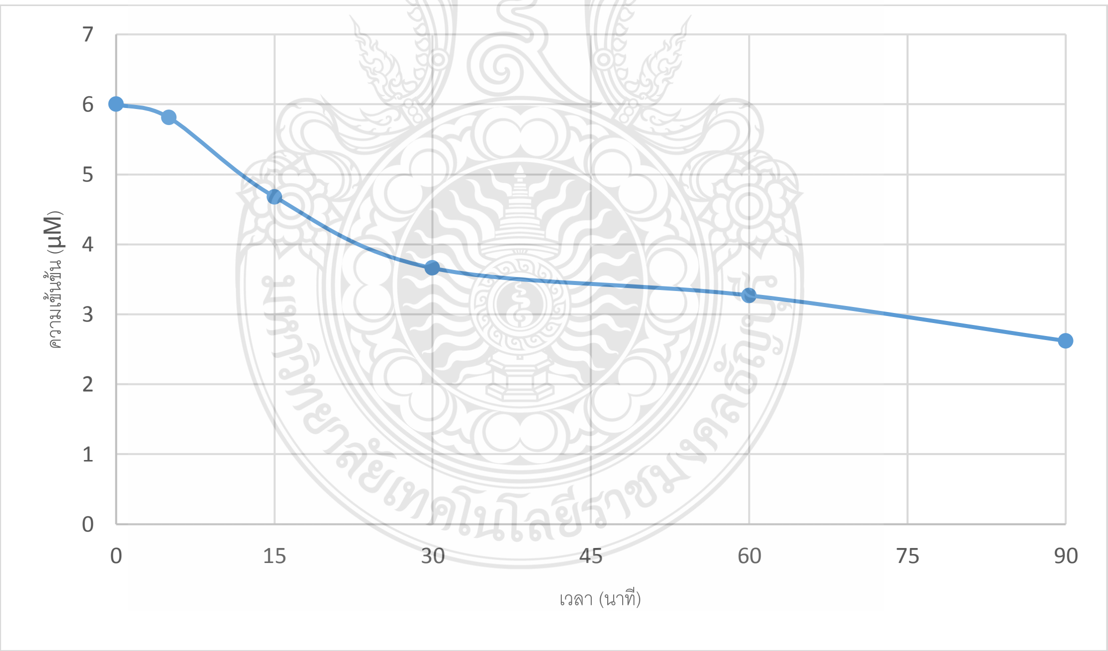
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00
5	3.83	4.48	3.81	4.78	3.82	4.63
15	3.12	22.09	3.41	14.91	3.26	18.50
30	2.73	31.79	2.94	26.63	2.84	29.21
60	2.13	46.87	2.64	34.16	2.38	40.51
90	1.66	58.66	2.12	47.18	1.89	52.92



ภาพที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 4.0 μM

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 6.0 μM

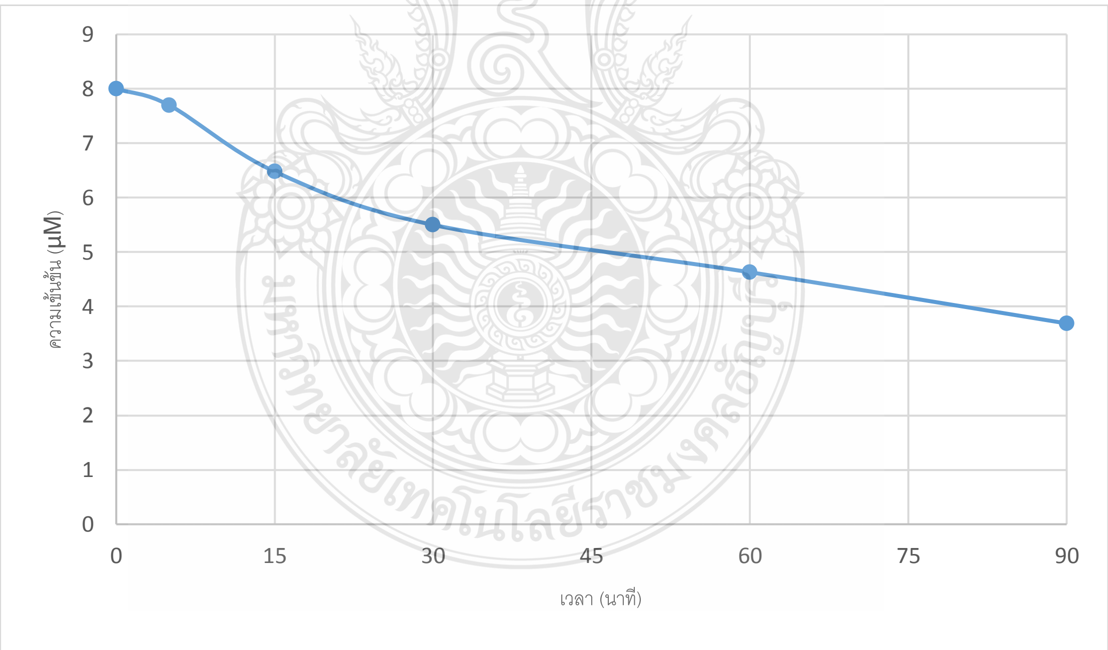
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	6.00	0.00	6.00	0.00	6.00	0.00
5	5.74	4.30	5.87	2.16	5.81	3.23
15	4.47	25.49	4.88	18.59	4.68	22.04
30	2.92	51.35	4.40	26.67	3.66	39.01
60	2.84	52.66	3.70	38.31	3.27	45.49
90	2.22	62.93	3.01	49.86	2.62	56.40



ภาพที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 6.0 μM

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 8.0 μM

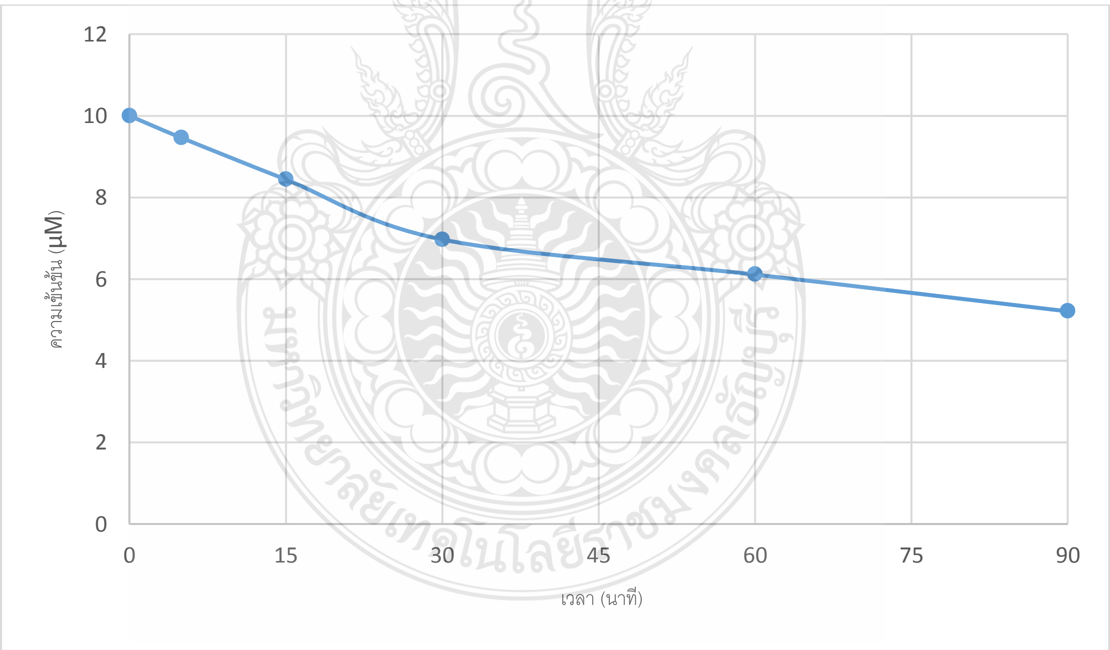
นาที (min)	การบำบัดสี					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (μM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	8.01	0.00	8.00	0.00	8.00	0.00
5	7.48	6.57	7.92	1.06	7.70	3.82
15	6.24	22.01	6.71	16.16	6.48	19.09
30	5.10	36.26	5.90	26.33	5.50	31.29
60	4.56	43.06	4.70	41.29	4.63	42.17
90	3.36	58.05	4.02	49.75	3.69	53.90



ภาพที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 8.0 μM

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 10.0 µM

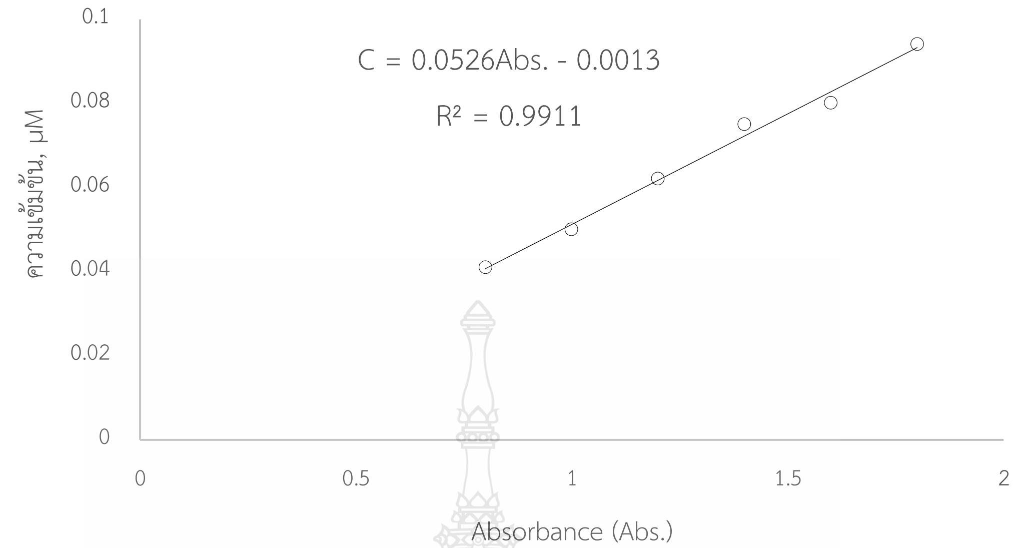
นาที (min)	**การบำบัดสี**					
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น (µM)	ประสิทธิภาพ (%)
0	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
5	9.13	8.76	9.80	2.07	9.46	5.42
15	8.72	12.85	8.15	18.52	8.44	15.68
30	7.16	28.45	6.78	32.28	6.97	30.37
60	6.66	33.43	5.55	44.50	6.11	38.97
90	5.90	41.06	4.52	54.88	5.21	47.97



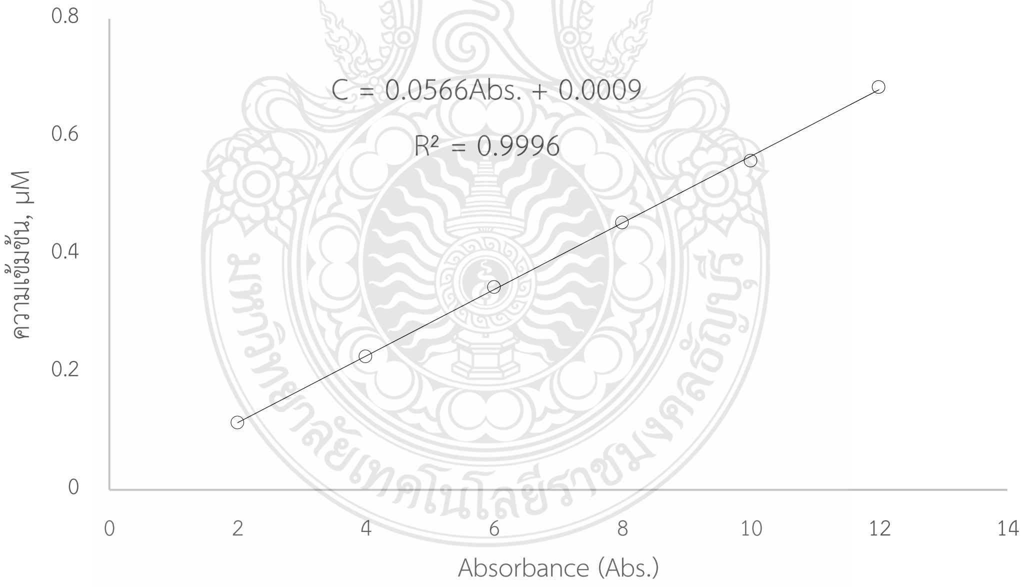
ภาพที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลาที่ใช้ในบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้น เท่ากับ 10.0 µM

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐาน



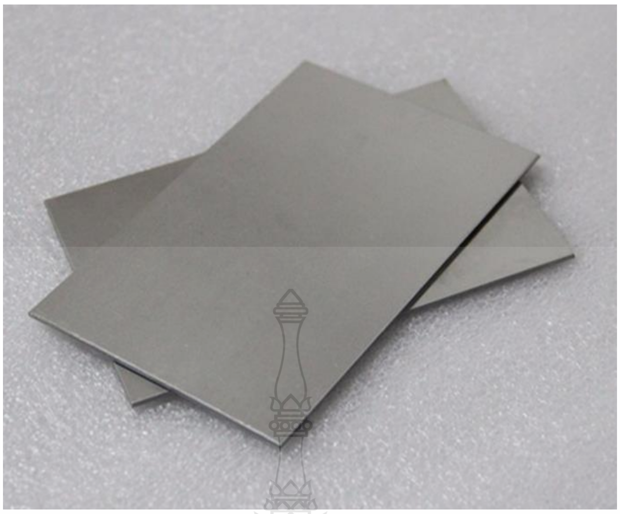
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสี IC ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสี RB5 ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค

อุปกรณ์วิเคราะห์ผลการทดลอง และคุณสมบัติทางกายภาพ



รูปที่ ค.1 แผ่น Ti

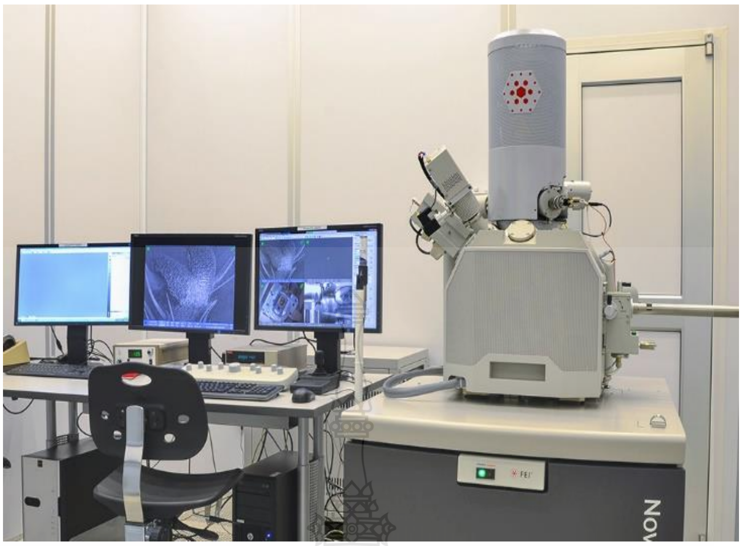
รูปที่ ค.2 แผ่นแกรไฟต์

รูปที่ ค.3 ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า

รูปที่ ค.4 ชุดทดลอง Photoreactor

รูปที่ ค.5 สเปกโตโฟโตมิเตอร์ รุ่น HACH DR/2010

รูปที่ ค.6 เครื่องอัลตราโซนิค



รูปที่ ค.7 เครื่อง FE-SEM

รูปที่ ค.8 เครื่อง XRF

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างรายการคำนวณ

1. การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นของสี IC

มวลโมเลกุลเท่ากับ 466.35 $g.mol^{-1}$ เตรียมที่ความเข้มข้น 100 μM (10^{-6} $mol.L^{-1}$)

$$= \quad 466.35\ g.mol^{-1} \times 100 \times 10^{-6}\ mol.L^{-1}$$
$$= \quad 0.047\ g.L^{-1}$$

ดังนั้น ที่ความเข้มข้น 100 μM ใช้สาร 0.047 g ละลายในน้ำกลั่น 1 L

2. การคำนวณการเตรียมความเข้มข้นของสี RB5

มวลโมเลกุลเท่ากับ 991.82 $g.mol^{-1}$ เตรียมที่ความเข้มข้น 100 μM (10^{-6} $mol.L^{-1}$)

$$= \quad 991.82\ g.mol^{-1} \times 100 \times 10^{-6}\ mol.L^{-1}$$
$$= \quad 0.099\ g.L^{-1}$$

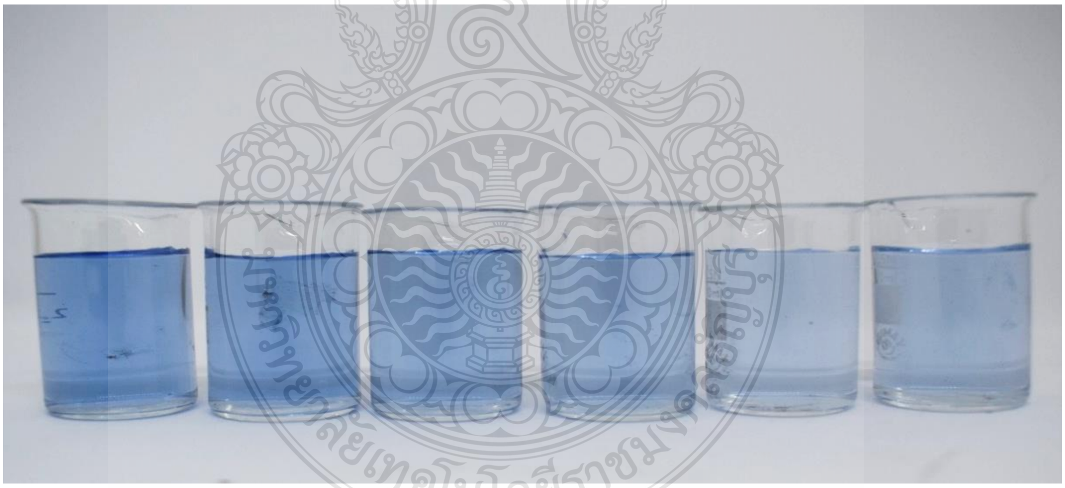
ดังนั้น ที่ความเข้มข้น 100 μM ใช้สาร 0.099 g ละลายในน้ำกลั่น 1 L

ภาคผนวก จ

สี IC และ RB5

0 min 5 min 15 min 30 min 60 min 90 min

รูปที่ จ.1 การบำบัดสี IC ที่ความเข้มข้น 1.6 μM เมื่อเวลาผ่านไป 90 min



0 min 5 min 15 min 30 min 60 min 90 min

รูปที่ จ.2 การบำบัดสี RB5 ที่ความเข้มข้น 10 μM เมื่อเวลาผ่านไป 90 min

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวกาญจนา ลอยทะเล

วัน เดือน ปีเกิด 14 เมษายน 2531

ที่อยู่ 22/11 หมู่ 4 ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เบอร์โทรศัพท์ 080-9833403

อีเมล์ Kanjana.l@rmutt.ac.th