



การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสและตัวเร่ง
ปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน
PHOTOCATALYSIS DEGRADATION OF METHYLENE BLUE USING
CARBON-BASED TITANIUM DIOXIDE

นายก้องภพ ยศแพง รหัสนิต 54362760
นางสาวมณีรัตน์ บุญดี รหัสนิต 54362876
นายสุทธิพงศ์ ประภาการ รหัสนิต 54362982

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายก้องภพ ยศแพง รหัส 54362760	
	นางสาวมณีรัตน์ บุญดี รหัส 54362876	
	นายสุทธิพงศ์ ประภาการ รหัส 54362982	
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร. ภมรรัตน์ จันทรธรรม	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2557	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....^{๑๖๐}.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(ดร. ภมรรัตน์ จันทรธรรม)

.....^{๑๖๑}.....กรรมการ
(ดร. นพวรรณ ไม้ทอง)

.....^{๑๖๒}.....กรรมการ
(ดร. ปณัฐพงศ์ บุญนวล)

.....^{๑๖๓}.....กรรมการ
(ดร. อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่ายโดยเฉพาะ ดร. ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายก้องภพ ยศแพง

นางสาวมณีนรัตน์ บุญดี

นายสุทธิพงศ์ ประภาการ

พฤษภาคม 2558



ชื่อหัวข้อโครงการ	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายก้องภพ ยศแพง	รหัส 54362760
	นางสาวมณีนรัตน์ บุญดี	รหัส 54362876
	นายสุทธิพงศ์ ประภาการ	รหัส 54362982
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร. ภมรรัตน์ จันธรรม	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2557	

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยวิธีโซลเจล เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงภายใต้แสงวิสิเบิล หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscope (TEM), X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TGA) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ถูกนำมาทดสอบกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู การทดลองได้ศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยการเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 วิธี การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลอต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลอเท่ากับ 1:1 1:2 และ 2:1 การเปรียบเทียบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.25 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร การเปรียบเทียบความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู และการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่าวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์วิธีที่ 3 สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 73 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลอต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลอ 1:1 ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส 71 เปอร์เซ็นต์และรูไทล์ 29 เปอร์เซ็นต์ สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงได้ 84 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาของไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากที่สุดสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH=3

สามารถย่อยสลายสี้อมเมทิลีนบลูลดลงได้ 97 เปอร์เซ็นต์ และอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการย่อย
สลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงคืออันดับสองเทียม ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา TC1 เท่ากับ 0.0013
ต่อกรัมนาที



สารบัญ

บทที่	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
บทคัดย่อ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไททานเนียมไดออกไซด์.....	3
2.2 การสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์.....	5
2.3 เรซิ่นอินทรีย์พอลิเมอร์ไฮดรอกซีแลต และคาร์บอนเจล.....	9
2.4 กระบวนการสลายสีด้วยแสง.....	14
2.5 จลนพลศาสตร์.....	21
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์.....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีดำเนินงานโครงการ.....	28
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	28
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติ.....	29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4 การสังเคราะห์ตั้งเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂).....	29
3.5 การสังเคราะห์เรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจล.....	30
3.6 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน.....	30
3.7 การศึกษาการย่อยสลายสี้อมเมทิลีนบลู.....	31
3.8 แผนภาพการทดลอง.....	33
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	34
4.1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์.....	34
4.1.1 การศึกษาสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์.....	35
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์..	38
4.1.3 การศึกษาปริมาณคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน.....	40
4.2 ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสี้อมเมทิลีนบลู.....	41
4.2.1 การเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 วิธี	41
4.2.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลเท่ากับ 1:1 1:2 2:1.....	44
4.2.3 การเปรียบเทียบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์.....	48
4.2.4 การเปรียบเทียบความเป็นกรด - ด่างของสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู.	49
4.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์กับงานวิจัยอื่น.....	51
4.2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์.....	52
5 สรุปผลการทดลอง.....	53
สรุปผลการทดลอง.....	53
ข้อเสนอแนะ.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	58



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของเรซอินอล ฟอร์มัลดีไฮด์เจล.....	11
2.2 แสดงผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติ ของเรซอินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล.....	12
2.3 แสดงผลกระทบของการไฟโลไรซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จากเรซอิน อลฟอร์มัลดีไฮด์เจล.....	13
4.1 ตารางการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์.....	51



สารบัญรูป

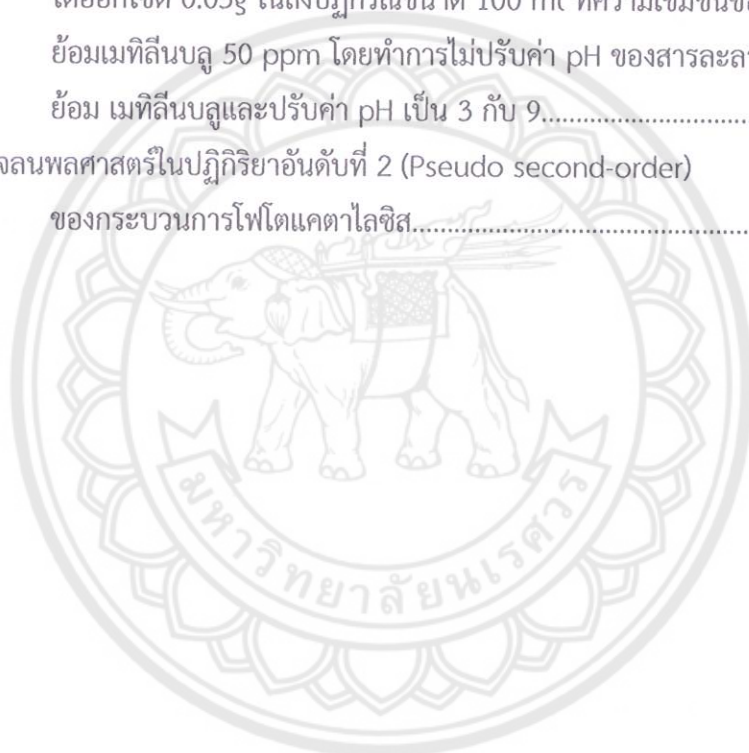
รูปที่		หน้า
2.1	ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์.....	3
2.2	โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์.....	4
2.3	โครงสร้างผลึกแบบเทอร์โกนอลและแบบออร์โธโรมบิก.....	4
2.4	กระบวนการโซลเจล.....	5
2.5	แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิดเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์เจล.....	10
2.6	การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์เจล.....	10
2.7	พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์.....	14
2.8	สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.9	องค์ประกอบหลักของรังสียูวี.....	16
2.10	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์.....	19
3.1	กล้องที่บแสง.....	31
3.2	แผนภาพการทดลอง.....	33
4.1	แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์โดยการสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์ต่อไททาเนียม ไดออกไซด์เจล a) TiO ₂ b) 1:1 c) 1:2 d) 2:1.....	35
4.2	SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์ต่อไททาเนียมไดออกไซด์ เจล เท่ากับ 1:1 1:2 2:1 a) TiO ₂ b) 1:1(TC1) c) 1:2 (TC2) d) 2:1(TC3)...	36
4.3	TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์ต่อไททาเนียมไดออกไซด์ เจลเท่ากับ 1:1 (TC1) โดยมีขนาดกำลังขยาย a) 135,000 เท่า b) 360,000 เท่า c) 650,000 เท่า d) การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในรูป c	37
4.4	TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วน โดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มมัลดีไฮด์ต่อไททาเนียมไดออกไซด์ เจลเท่ากับ 2:1 (TC3) โดยมีขนาดกำลังขยาย a) 195,000 เท่า b) 360,000 เท่า c) 650,000 เท่า d) การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในรูป c..	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบ X-ray Diffraction (XRD) ของผงไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) TiO ₂ (ข) TC1 (ค) TC2 และ (ง) TC3.....	40
4.6	ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค TGA.....	41
4.7	แสดงการย่อยสลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 T2 และ T3 ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	43
4.8	แสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 T2 และ T3.....	44
4.9	การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับ และกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3.....	44
4.10	กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับ และการย่อยสลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 TC2 และ TC3 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ 0.5 กรัมต่อลิตร.....	46
4.11	การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับ และโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC2..	47
4.12	การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับ และโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1..	47
4.13	การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับ และโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC3.....	48
4.14	กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับ และการย่อยสลายสีของสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันคือ 0.25 0.5 และ 1 กรัม ต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.05g ในถังปฏิกรณ์ขนาด 100 ml ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 ppm โดยทำการไม่ปรับค่า pH ของสารละลายสีย้อม เมทิลีนบลูและปรับค่า pH เป็น 3 กับ 9.....	50
4.16 จลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Pseudo second-order) ของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส.....	52



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันประเทศต่างๆ ตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นเนื่องจากความเจริญก้าวหน้าของวิทยาการสมัยใหม่ทำให้ผลจากเทคโนโลยีในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่องมลพิษอินทรีย์ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมทั้งในดินอากาศหรือแม้แต่แหล่งน้ำที่กำลังทวีความรุนแรงอย่างต่อเนื่องเช่นแหล่งน้ำที่มีสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) เจือปนจะส่งผลกระทบต่อระบบทางชีวภาพของระบบนิเวศน์เช่นปลาและแพลงก์ตอน [1] เพราะจะก่อให้เกิดสารผสมที่มีพิษหรือเมื่อไอของสารพิษที่ระดับเหนือผิวน้ำสัมผัสกับวัสดุที่สามารถก่อให้เกิดประกายไฟอาจเกิดการระเบิดได้ ทั้งนี้หากมีการใช้และจัดการสารเคมีอย่างเหมาะสมจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำทิ้งและต่อระบบนิเวศน์

กระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นประกอบด้วยวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา เช่นวิธีการตกตะกอนด้วยการกรอง การดูดซับกลั่นและสีด้วยถ่านกัมมันต์ [2] การแลกเปลี่ยนไอออน [3,4] และกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ [5,6] นอกเหนือไปจากเทคนิคที่กล่าวมา ปัจจุบันมีการนำเอาเทคนิคการย่อยสลายร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) มาเพื่อการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide:TiO₂) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลหลายประการ คือสามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เป็นสารดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไททาเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภทมีความเสถียรต่อสารเคมีไม่มีความเป็นพิษและราคาไม่แพงมาก วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคโซลเจล (Sol-gel) ซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ง่าย และสะดวกสามารถทำการสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย [7] ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมาก เป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำจะถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ได้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นผิวดำ ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับคาร์บอน ในงานวิจัยนี้ได้นำเรซอซินอลฟอรัมัลดีไฮด์ไฮดรอกไซด์ (RF gel) มาเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีความเหมาะสมในการเตรียมเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนในช่วงไมโครพอร์และ

เมโซพอร์ นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล จะช่วยให้ไททานเนียมไดออกไซด์ มีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น [8]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยวิธีโซลเจล

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.3.1 ตัวแปรต้น

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเป็นกรด-ด่าง 3-9

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ 0.25-1 กรัมต่อลิตร

1.3.2 ตัวแปรตาม

ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ที่ 500 องศาเซลเซียส

หลอดไฟ 9 วัตต์ (4 หลอด)

อัตราการให้ความร้อนในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไททาเนียมไดออกไซด์

2.1.1 ความหมายของไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันที่แข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนของคลอรีนและน้ำทะเล มีน้ำหนักเมื่อเป็นโลหะผสมที่ผสมกับเหล็กและอะลูมิเนียมมีสีเงินขาวเทาที่มีความแข็งแรงมาก โดยทั่วไปจะมีสีขาวทึบแสงดังรูปที่ 2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีที่มีสีขาวมีประโยชน์สำหรับการใช้งานได้หลากหลายเนื่องจากไม่มีกลิ่น และมีความสามารถในการดูดซับ ไททาเนียมไดออกไซด์ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสีที่มีความปลอดภัยจึงใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ยาสีฟัน เครื่องสำอาง สารเคลือบผิว มักจะใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของผงเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา : <http://nanoyothai.lnwshop.com/article>

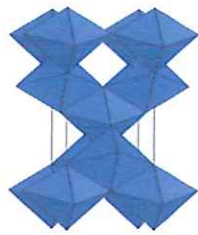
2.1.2 โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาตินั้นมีโครงสร้างผลึก 3 ชนิดหลักดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3

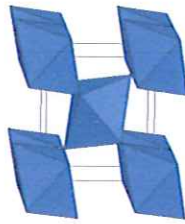
อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)

รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)

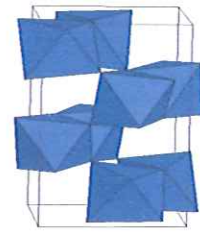
บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic)



อนาเทส

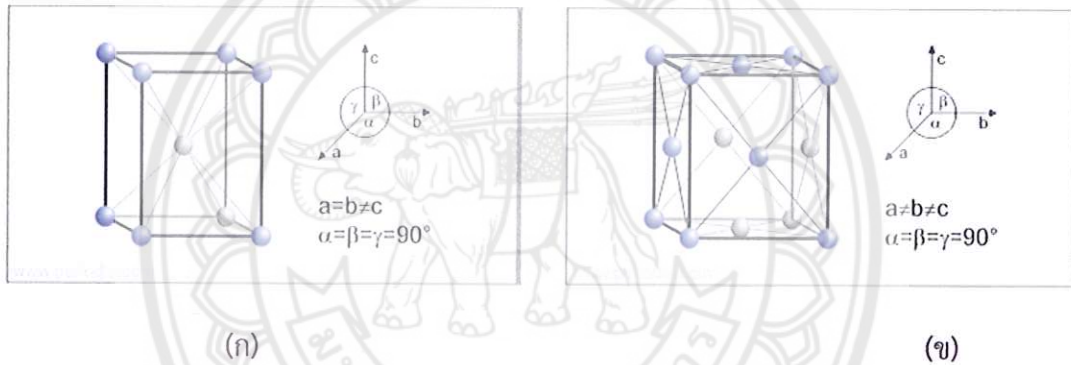


รูไทล์



บรูคไคท์

รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์

ที่มา : <http://www.siamchemi.com>

รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal Crystal System)

(ข) โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic Crystal System)

ที่มา : <http://www.periodni.com/en/s.html>

ระบบเทตระโกนอล (Tetragonal Crystal System) มี 3 แกน มีแกนยาวเท่ากับ 2 แกน ตัดกันที่ 90 องศา ในระนาบเดียวกัน ส่วนแกนที่ 3 ยาวกว่าอีก 2 แกน และตั้งฉากที่ระนาบของแกนที่สอง แร่ที่จัดอยู่ในระบบนี้ ได้แก่ เพทาย (Zircon) รูทิลสังเคราะห์ (Synthetic Rutile) เป็นต้น

ระบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic Crystal System) มี 3 แกนที่ยาวไม่เท่ากัน และทั้ง 3 แกนตัดกันทำมุมฉาก แร่ที่จัดอยู่ในระบบนี้ได้แก่ เพอริดอท (Peridot) โทแพส (Topaz) คริสโซเบอร์ล (Chrysoberyl) คริสโซเบอร์ลสังเคราะห์ (Synthetic Chrysoberyl) ซอยไซต์ (Zoisite) แอนดาลูไซต์ (Andalusite) เป็นต้น

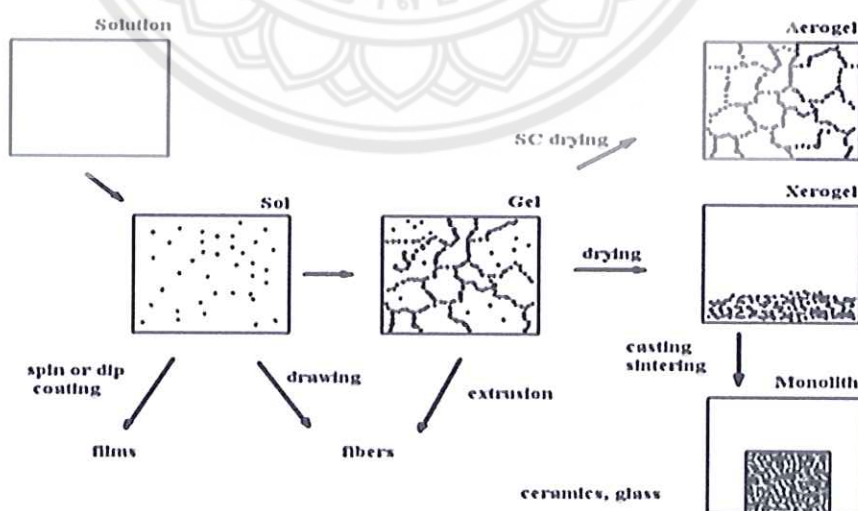
2.2 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์

วิธีโซลเจล (Sol-gel)

กระบวนการโซลเจลเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระดับโมเลกุลโดยใช้โมเลกุลเป็นสารตั้งต้นสามารถเตรียมได้จากออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ โดยทั่วไปจะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยไปเป็นของแข็งที่เรียกว่า “เจล” ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำ (Water condensation) และปฏิกิริยาควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



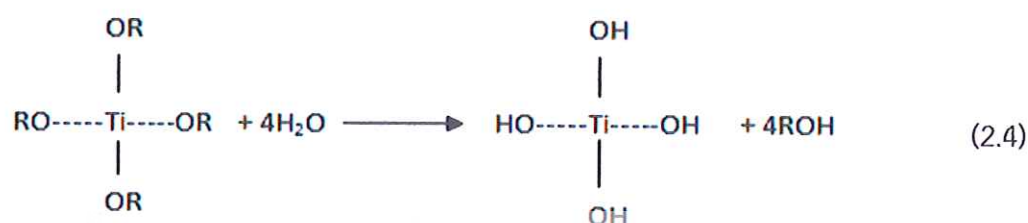
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ ซิลิกอน (Si) เซอร์โคเนียม (Zr) ไททาเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) ดีบุก (Sn) และซีเซียม (Ce) ส่วน OR แทนหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ความเป็นกรด-ด่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และ อุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่แตกต่างกัน จะทำให้โซลและเจลมีโครงสร้างที่แตกต่างเช่นกัน



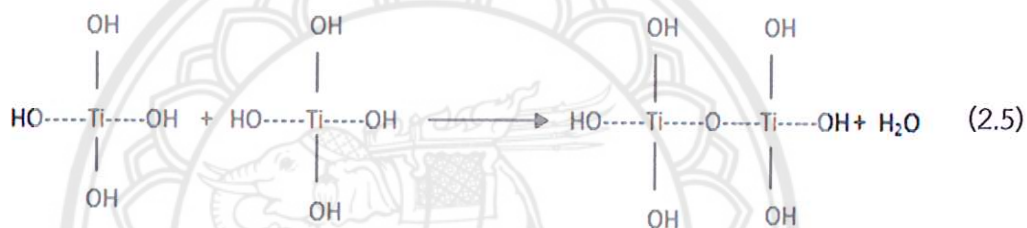
รูปที่ 2.4 กระบวนการโซลเจล

ที่มา : http://cheminfo.chemi.muni.cz/materials/InorgMater/sol_gel.pdf

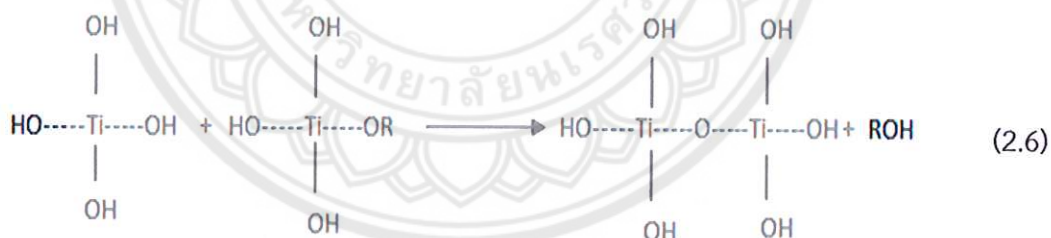
การทำโซลเจล คือ การผสมสารตั้งต้นกับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจล เป็นสารประกอบโลหะ และกิ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคอกไซด์ (Metalalkoxide) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการที่ (2.4)



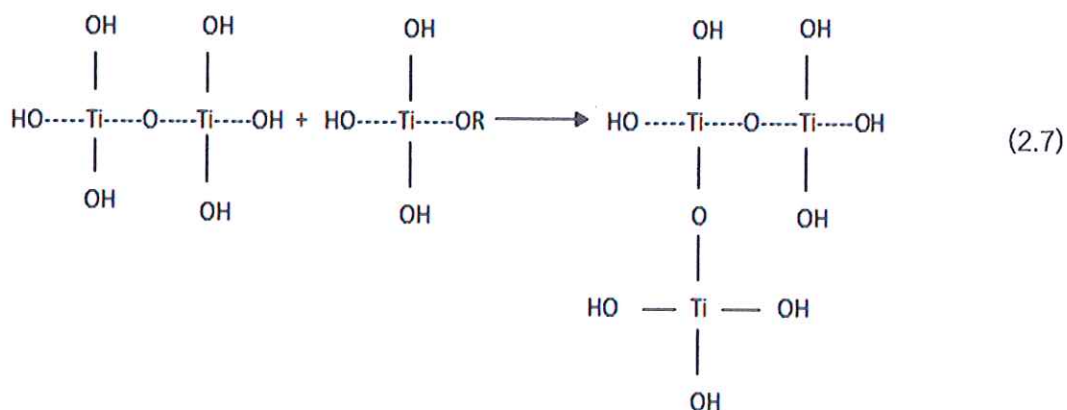
ในขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้น้ำเป็นผลพลอยได้ดังสมการที่ (2.5)



และการควบแน่นของแอลกอฮอล์จะดังสมการที่ (2.6)



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงร่างที่อยู่ในสภาวะที่เรียกว่า “เจล” จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า Polycondensation reaction ดังสมการที่ (2.7)



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็นโซล และเจลเมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย แอโรเจล ซิโรเจล ผง และฟิล์มเพื่อเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป [9]

ข้อดีของวิธีโซลเจล

ทำให้เกิดพันธะบางๆ ระหว่างวัสดุฐาน (Substrate) กับตัวสารเคลือบสามารถเคลือบให้มีความหนาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้สามารถเคลือบได้ทั้งวัสดุที่มีรูปร่างง่ายๆ และที่มีรูปร่างซับซ้อนทำได้ง่าย ราคาถูก และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเคลือบสูงมีความบริสุทธิ์สูงความเป็นเนื้อเดียวกันและเตรียมได้ด้วยอุณหภูมิต่ำเป็นต้น

2.2.1 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของแบคทีเรียด้วย ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำวยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิวนอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ และที่สำคัญไททาเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนานโดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านการยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไททาเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน 3 เท่า และมากกว่าไอโชน 1.5 เท่า

ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของ สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้นด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตัวอย่าง เช่น กลิ่นบุหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภท ฟอรั่มัลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจากควีน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัสรวมถึงก๊าซอันตรายด้วยคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาดำวยแสง

ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆ ที่เกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่นๆ รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณที่มีมลภาวะสูงไททาเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำ และคราบต่างๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำ
ความสะอาดตัวเอง

ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไททาเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

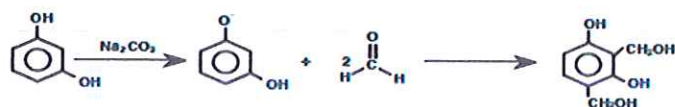
สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ไททาเนียมไดออกไซด์) ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำรวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตรายและช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรียชนิดโคไล (Escherichia coli) ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.3 เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล และคาร์บอนเจล

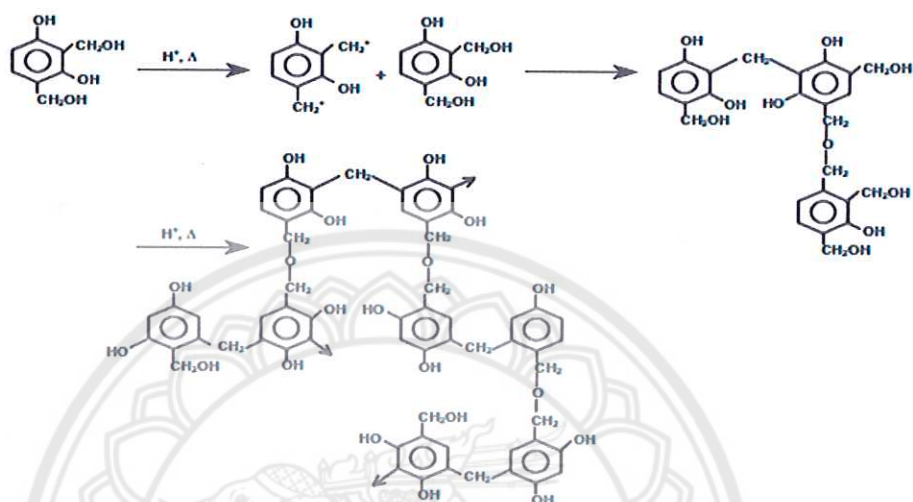
อาร์เอฟเจล (เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล)

เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล หรือ อาร์เอฟ เจล สามารถเตรียมได้โดยการนำสารเรซอซินอล (R) ผสมกับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยให้เกิดสภาพเจล ปฏิกิริยาการเกิดเจลเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การบ่มเจลจึงต้องทำในภาชนะที่ควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้มีเวลาเพียงพอในการเกิดโครงข่ายเจล ปัจจัยหลักในขั้นตอนที่เกิดเจลคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเกิดเจล คือ polycondensation เกิดขึ้นในสารตั้งต้นที่ถูกควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นที่เป็น aquagel หรือ alcogel คือสารตั้งต้นเมื่อใช้น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายตามลำดับ โดยโครงสร้างและคุณสมบัติส่วนมากของ ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยานี้และสภาวะที่เกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่สำคัญระหว่างเรซอซินอลและฟอร์มาลดีไฮด์จะมีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบอนุพันธ์ ไฮดรอกซีเมทิล (Hydroxymethyl) ($-\text{CH}_2\text{-OH}$) และเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุพันธ์ไฮดรอกซีเมทิลในรูปแบบพันธะเมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) และพันธะเมทิลีนอีเธอร์ ($-\text{CH}_2\text{-OCH}_2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 โดยมีอัลคาไลน์เป็นสิ่งสำคัญซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวเริ่มต้นของเรซอซินอลประจุลบ (Resoseinol Anion) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ในปฏิกิริยาการเพิ่ม (Addition Reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น สองสี่เมทิลอลเรซอซินอล (2.4 Methylol Resorcinol) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเพิ่มจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาการควบแน่นตามมา และทำปฏิกิริยาเป็นลักษณะการควบแน่นแบบต่อเนื่อง จะได้โครงข่ายที่มีขนาดเจลที่ใหญ่ขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (7-10 นาโนเมตร) สามารถสังเกตได้จากความหนืดที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 [8]

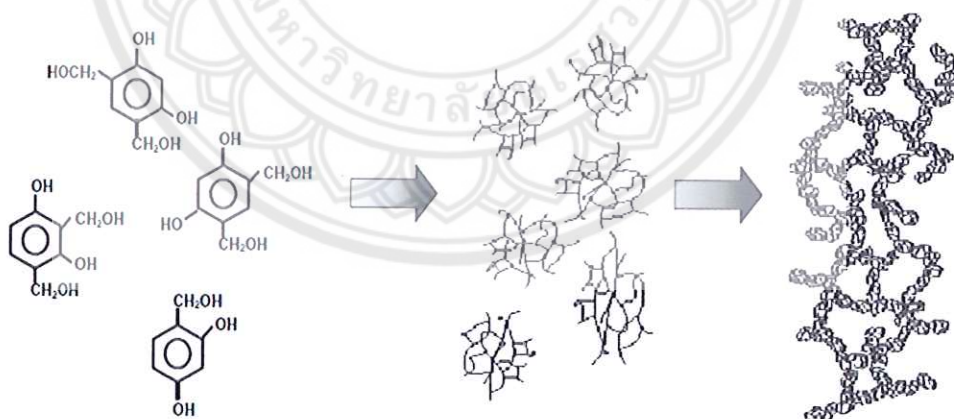
1. Addition Reaction



2. Condensation Reaction



รูปที่ 2.5 แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิดเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ [8]



รูปที่ 2.6 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ [8]

หลังจากนั้นทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย อบแห้งและเผาในสภาวะแก๊สเฉื่อยเพื่อให้เกิดการคาร์บอนในเซชันให้เป็นคาร์บอนตามลำดับ สำหรับการอบแห้งมีหลายเทคนิค เช่น อบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าเรซอซินอลแอโรเจล (RF Aerogel) อบแห้งในบรรยากาศลมร้อนปกติ เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าเรซอซินอลซีโรเจล

(RF Xerogel) หลังจากนั้นนำเจลแห้งไปทำการคาร์บอนไอเซชันเพื่อให้ได้คาร์บอน พบว่าคาร์บอนที่ได้จากเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ นั้นมีพื้นที่ผิวและสภาพความเป็นรูพรุนที่สูง โดยที่ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติดังกล่าวถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ เจล [8]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น (การลด R / F, R / W, หรืออัตราส่วน R / C)	อนุภาคขนาดเล็กและขนาดรูพรุนที่ได้มีขนาดเล็ก
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	เพิ่มพื้นที่ผิวของ xerogels มีการลดหรือเพิ่มปริมาณของรูพรุน xerogels ขึ้นอยู่กับค่า pH ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีขนาดเล็ก ผิวเรียบและมีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่กว้างที่ระดับความเข้มข้นสูงเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่แคบมากและอาจลดเวลาในการเกิดเจล
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง	ที่ระดับความเข้มข้นสูง เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์สูง (อนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันด้วยคอลลอยด์ขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสูง จุดแข็งทางกลสูง) ลดเวลาในการเกิดเจลที่ระดับความเข้มข้นต่ำเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (อนุภาคขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยคอแคบ พื้นที่ผิวต่ำ จุดแข็งทางกลต่ำ)
pH เจลที่เพิ่มขึ้น	เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของคาร์บอน aerogels ไม่มีนัยสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิวของคาร์บอน xerogels เพิ่มปริมาณรูพรุนของคาร์บอน xerogels ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้น
การบ่มเจล	ช่วยให้มีเวลาในการเกิดโครงร่างตาข่ายของเจลมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์เจล [8]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ตัวทำละลายแลกเปลี่ยน	จำเป็นสำหรับการอบแห้งในระบบ supercritical CO ₂ หรือแช่แข็งอบแห้งช่วยให้การระเหยแห้งเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น การลดลงของความตึงเครียดบนพื้นผิวการระเหยในระบบ subcritical
การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า xerogels ซึ่งมีการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้รูพรุนเล็กลงและปริมาณรูพรุนลดลง แต่ความแข็งแรงทางกลของเจลแห้งจะเพิ่มขึ้น
การอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า aerogels เจลที่ได้ไม่มีนัยสำคัญของการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวสูง ปริมาณรูพรุนมาก
การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	เช่นเดียวกับการอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂ แต่ด้วยความดันที่ลดลงจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนอะซิโตนเป็นสภาพวิกฤตอาจทำให้เจลแห้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนบางส่วน
การอบแห้งแบบแช่แข็ง	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า cryogels การระเหิดของตัวทำละลายแช่แข็งพบว่ารูพรุนที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเมโซพอร์ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะต้องคงที่ด้วยการแช่แข็ง

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของการไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล [8]

ปัจจัย	ผลกระทบ
เพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส	ลดปริมาณออกซิเจน ลดพื้นที่ผิวของคาร์บอน aerogels และ xerogels ลดปริมาณรูพรุนของคาร์บอน aerogels และ xerogels เพิ่มการกระจายขนาดของ macropore เพิ่มการกระจายขนาดของ micropore เมื่อใช้อัตราส่วน R/C ที่ต่ำมาก
เพิ่มเวลาในการไพโรไลซิส	เพิ่มความกว้างของรูพรุน ปริมาณ และพื้นที่ผิว



2.4 กระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง

2.4.1 หลักการของปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง (Photocatalysis Reaction)

กระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.7 (ก) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิมดังรูปที่ 2.7 (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา



รูปที่ 2.7 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [11]

ปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง ต้องมีองค์ประกอบ คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- 2) พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

2.4.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) จูล

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) 6.625×10^{-34} จูล.วินาที

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง เฮิรตซ์ หรือ วินาที⁻¹

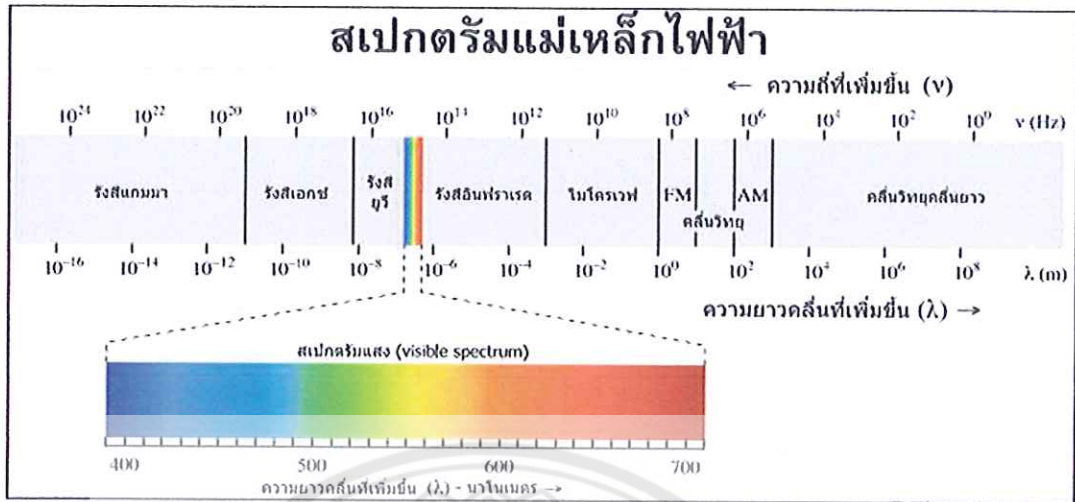
λ คือ ความยาวคลื่นแสง นาโนเมตร

c คือ ความเร็วของคลื่นแสง 2.997×10^8 เมตร/วินาที

ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง สเปกตรัมของรังสียูวีดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ตอยู่ในช่วง 100 – 400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (Visible หรือ แสงขาว) อยู่ในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงดังรูปที่ 2.9 คือ

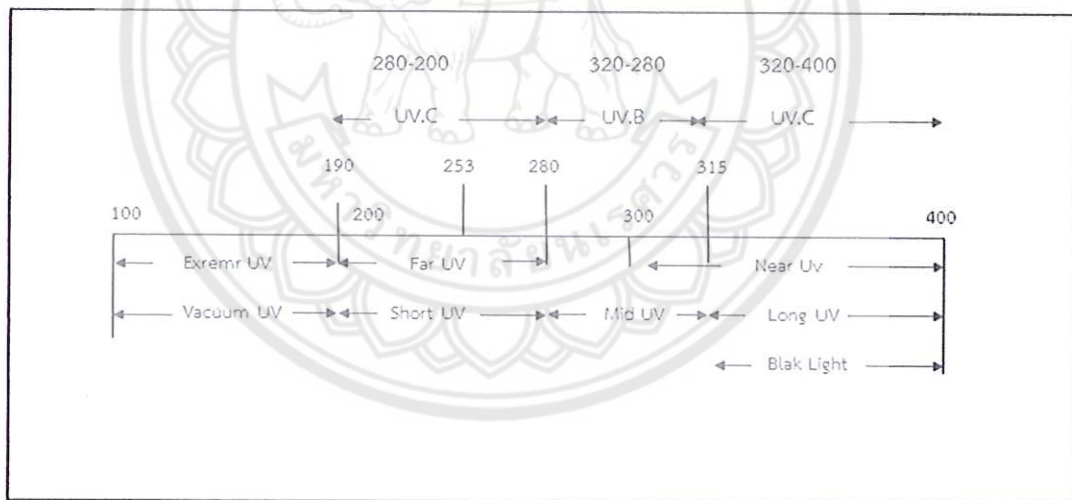
- 1) คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 – 320 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320 – 280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 – 200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/201/sattelite/8.htm>



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี

ที่มา : <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm>

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวี และแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการถูกดูดกลืน และการกระเจิงของแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการถูกดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้น สตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10 – 35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายัง

พื้นโลกจึงมีขีดจำกัดในกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงที่ใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปรูไทล์ และอะนาเทสไนต์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงสูง เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอน-ช่องว่างอิเล็กตรอนน้อย และมีความสามารถในการดูดซับแสงสูง นอกจากนี้พบว่าถ้ามีการเจือด้วยออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ประเภทต่างๆ จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่วงเวกเกิดจากตำแหน่งในโครงสร้างของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ [14] ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไททาเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350 – 400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุง ไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการสลายสีย้อมด้วยแสง

2.4.3 ชนิดของกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง

กระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงสามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

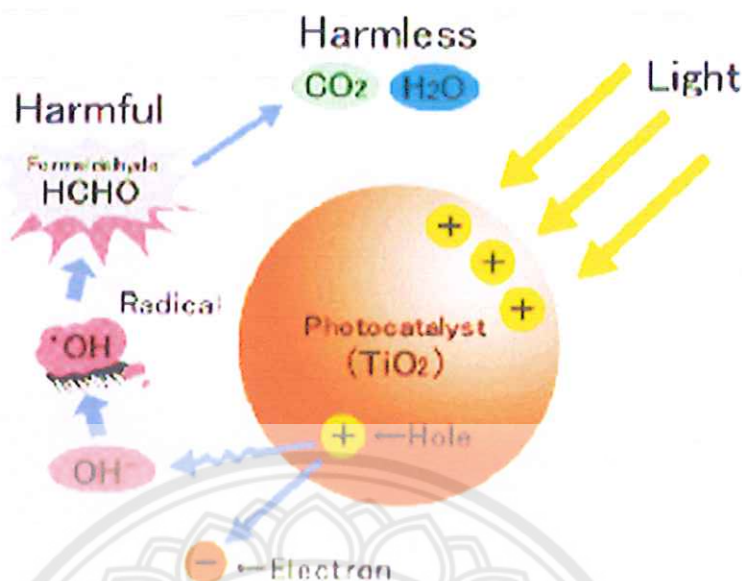
- 1) กระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H_2O_2
- 2) กระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO_2 สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิดหนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีแบนด์แก๊ป ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

2.4.4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง ได้แก่

- 1) โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น นิกเกิล
- 2) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสี ออกไซด์ (ZnO)

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h^+) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (Electron - Hole Pairs, e^-/h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์กับคอนดักชันแบนด์ได้ง่าย และรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับโลหะตัวนำในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยากเพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอน e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำสารกึ่งตัวนำ และฉนวน แยกได้ยากขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ประดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์ปฏิกิริยาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาพปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจน (O_2) ละลายน้ำอยู่ ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แต่ในทางตรงกันข้าม h^+ ที่วาเลนซ์แบนด์เป็นตัวออกซิแดนซ์ที่แรงมากเช่นกัน [17]



รูปที่ 2.10 กลไกของปฏิกิริยาสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงบนสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์
ที่มา : www.antonio.licciulli.unile.it 2553

2.4.5 กลไกของปฏิกิริยาสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง (Mechanism of Photocatalysis Reaction)

ปฏิกิริยาการสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และเรดิคัลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ (2.12) และสมการที่ (2.13) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิล-เรดิคัล ดังสมการที่ (2.14) และสมการที่ (2.15) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แสดงในสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical, H^+) ตามสมการที่ (2.18) ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นสารออกซิแดนซ์หลักในปฏิกิริยาสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก F^- แต่สูงกว่า Cl^- และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

การบำบัดสารอินทรีย์





การกระตุ้น



การเกิดเรดิคอลล จาก e^-/h^+



H^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)

e^- คือ อิเล็กตรอน (Electron)

OH^\cdot คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอลล (Hydroxyl Radical)

$O_2^{\cdot-}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอลล (Superoxide Ion Radical)

OH_2^\cdot คือ เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอลล (Perhydroxyl Radical)

H^\cdot คือ ไฮโดรเจนเรดิคอลล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคอลล และ h^+ ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของการสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำได้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอลล เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอลล หรือไฮโดรเจนเรดิคอลล

2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวเร่งปฏิกิริยากับ h^+ ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไททาเนียมไดออกไซด์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น Kwaguchi และ Matthews

สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาการสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์นั้น ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ ไฮดรอกซิลเรดิคอลลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง h^+ กับสารอินทรีย์โดยตรง เป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในสลายสี่ย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง มีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคอลล และสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคอลล อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอลล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอลล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ไฮดรอกซิลเรดิคอลล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5 จลนพลศาสตร์ (Kinetics)

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา

นิยาม ใช้ในรูปน้ำหนักของของแข็ง ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ปฏิกิริยามีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาคิดเทียบกับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.19)

$$r'_i = \frac{1dN_i}{Wdt} = \frac{\text{จำนวนโมลของสารที่เปลี่ยนแปลง}}{(\text{ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา})(\text{เวลา})} \quad (2.19)$$

จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) ซึ่งคำนวณจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.20)

$$r'_A = kC_A^n \quad (2.20)$$

แทน (2.20) ลงใน (2.19) ; $\frac{1dN_A}{Wdt} = kC_A^n \quad (2.21)$

เปลี่ยน N_A เป็น C_A และ $n=1$

$$\frac{1dN_A}{Wdt} = kC_A^1$$

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{1}{C_A} dC_A = kW \int_0^t dt$$

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = kWt \quad (2.22)$$

- เมื่อ K คือ ค่าคงที่อัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยา หน่วยเป็น (ต่อกรัม นาที)
 C_{A0} คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_A คือ ค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 W คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา หน่วยเป็น (กรัม)
 T คือ เวลาในการฉายแสง หน่วยเป็น (นาที)

และจากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order) ซึ่งคำนวณจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

จากสมการที่ (2.21)

$$\frac{1dN_A}{Wdt} = kC_A^n$$

เปลี่ยน N_A เป็น C_A และ $n=2$

$$\frac{1dN_A}{Wdt} = kC_A^2$$

$$\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{1}{C_A^2} dC_A = kW \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kWt \quad (2.23)$$

- เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยา หน่วยเป็น (ต่อกรัม นาที)
 C_{A0} คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_A คือ ค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 W คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา หน่วยเป็น (กรัม)
 t คือ เวลาในการฉายแสง หน่วยเป็น (นาที)

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีหลักการทำงานที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

2.6.2 X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) เรียกสั้นๆว่าเทคนิค XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงาน และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมต่างๆกัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบ และธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่างได้

2.6.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือการระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือ การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไว ต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่า และเมื่อ

ให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และเวลาผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ

2.6.4 (Transmission Electron Microscope : TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1นาโนเมตร)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนชัย ชัยจิตรสกุล (พ.ศ.2548) งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเตรียมเรโซซินอลฟอร์มมาลดีไฮด์เจลและคาร์บอนเจลด้วยวิธีต่างกันคือ ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทอไอออนิก (RF-CS) และไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว โดย RF-NS Carbon มีสมบัติความเป็นรูพรุนดีที่สุด ปริมาตรรูพรุนระดับเมโซเป็น 0.81 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวเป็น 550 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และค่าสูงสุดการกระจายตัวของรูพรุนระดับเมโซเป็น 7.2 นาโนเมตร จากนั้นนำ เรโซซินอลฟอร์มมาลดีไฮด์เจล และ RF Carbon Gels ที่เตรียมได้ไปใช้ตรึงเอนไซม์แอลคาไลไนโปรติเอส และเอนไซม์ไลเปส ด้วยวิธีการตรึงที่แตกต่างกันคือการตรึงด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพ และวิธีห่อหุ้มในโพรงเจล จากผลการวิจัยพบว่าการตรึงด้วยวิธีห่อหุ้มในโพรงเจลของ RF-NS Gel สามารถตรึงเอนไซม์แอลคาไลไนโปรติเอส และเอนไซม์ไลเปสได้สูงที่สุดเป็น 86.30 เปอร์เซ็นต์ และ 84.36 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเอนไซม์เริ่มต้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่ากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์พบว่าเอนไซม์แอลคาไลไนโปรติเอสที่ตรึงบน RF-CS Carbon มีกิจกรรมจำเพาะสูงที่สุดเป็น 103.80 units/ml-mg protein เปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระ ที่มีกิจกรรมจำเพาะเป็น 50.58 units/ml-mg protein ในขณะที่เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบน RF-NS Carbon มีกิจกรรมจำเพาะสูงที่สุดเป็น 23.35 units/ml-mg protein เปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระ ที่มีกิจกรรมจำเพาะเป็น 9.69 units/ml-mg protein เอนไซม์ที่ตรึงใน RF-NS Gel และ RF-NS Carbon Gel มีเสถียรภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าเอนไซม์อิสระ โดยภายหลังการเร่งปฏิกิริยา 5

รอบ เอนไซม์แอลคาไลน์โปรตีเอสที่ตรึงใน RF-NS Gel คงกิจกรรมไว้ได้สูงที่สุดเป็น 64.89 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบน RF-NS Carbon คงกิจกรรมไว้ได้สูงที่สุดเป็น 62.23 เปอร์เซ็นต์ และภายหลังการเก็บรักษาเอนไซม์ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าทั้งเอนไซม์แอลคาไลน์โปรตีเอส และเอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบน RF-NS Carbon สามารถรักษากิจกรรมไว้ได้สูงที่สุด โดยสามารถรักษากิจกรรมภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ได้มากกว่า 94 เปอร์เซ็นต์ [8]

ชลดา อีรการณวงศ์ (พ.ศ.2555) การปนเปื้อนของสารมลพิษอินทรีย์เป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญทั่วโลกการใช้ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปรูไทล์และอนาเทสไนต์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงสูงเนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนทำให้ช่องว่างอิเล็กตรอนน้อยและมีความสามารถในการดูดติดผิวสูง นอกจากนี้พบว่าถ้ามีการเจือด้วยออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ประเภทต่างๆจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้นเนื่องจากตำแหน่งที่ว่างไวเกิดจากตำแหน่งในโครงสร้างของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ [11]

นายบรรยง วารินทร์ (พ.ศ.2547) โดยทั่วไปแล้วการเตรียมเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจลนิยมใช้วิธีการอบแห้งด้วยสภาวะเหนือวิกฤตและวิธีการอบแห้งแบบระเหิดแห้งในขั้นตอนของการทำให้แห้ง แต่ที่ 2 วิธีนี้ใช้ต้นทุนสำหรับการอบแห้งค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในขั้นตอนการอบแห้งซึ่งมีแนวโน้มว่าถูกกว่าการอบแห้งด้วย 2 วิธีแรก โดยพบว่าภายใต้สภาวะการเตรียมที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง หรือ ค่า C/W มากกว่า 40 โมลต่อลูกบาศก์เมตร เรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์ คาร์บอนเจล ที่ได้ภายหลังจากการเผาให้เป็นคาร์บอนนั้นไม่สามารถรักษาสมบัติรูพรุนแบบมีโซพอร์ (Mesopore) ไว้ได้ ดังนั้นจึงนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ระหว่างขั้นตอน โชล-เจล โพลีคอนเดนเซชัน ซึ่งพบว่าภายใต้สภาวะการเตรียมเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์ เจลที่มีค่า C/W เท่ากับ 80 โมลต่อลูกบาศก์เมตร พร้อมทั้งการปรับเปลี่ยนสัดส่วนเชิงโมลของเรซอซินอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างหรือค่า R/C ในช่วง 100 ถึง 200 โมลต่อโมล หลังจากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและการเผาให้เป็นคาร์บอนแล้ว เรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์ คาร์บอนเจลที่ได้จะสามารถรักษาสมบัติรูพรุนแบบมีโซพอร์ไว้ได้นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้คลื่นไมโครเวฟในขั้นตอนการอบแห้งคาร์บอนที่มีสัณฐานของช่องว่างแบบแมคโครพอร์ระหว่างอนุภาคคาร์บอนที่เชื่อมทะเลถึงกันทั่วทั้งเนื้อวัสดุ (3D-IMM) ได้เมื่อสภาวะการเตรียมที่มีค่า C/W เท่ากับ 10 โมลต่อลูกบาศก์เมตร และค่า R/C อยู่ในช่วง 400 ถึง 1200 โมลต่อโมล [12]

ขจรศักดิ์ โสภการีย์ (พ.ศ.2541) ศึกษาการกำจัดฟีนอลโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่อาศัยไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นแคตาลิสต์แบบแขวนลอย โดยทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบ Semi-batch reactor ซึ่งมีลักษณะเป็นรางลาดเอียงที่ใช้หลอดไฟชนิด Black light จำนวน 3 หลอด แต่ละหลอดมีกำลังไฟ 36 วัตต์ เป็นแหล่งพลังงานแสง วางอยู่เหนือรางเป็นระยะ 15 เซนติเมตร การทดลองจะใช้สารละลาย ฟีนอลไหลหมุนเวียนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์และถังพักสาร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลโดยการเกิดปฏิกิริยาสลายสีย้อมด้วยแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ และอัตราการไหลวนของสารละลายในระบบซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0368 0.0486 0.0590 และ 0.0741 นาที ตามลำดับซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อมีการเพิ่มอัตรา การไหลวนของสารมีค่าต่างๆ กันคือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0527 0.0743 0.0849 และ 0.0933 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลอัตราการกำจัดฟีนอลก็จะเพิ่มขึ้นด้วย [13]

Lakshmi และคณะ (พ.ศ.2547) งานวิจัยนี้คือการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำโดยอาศัยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม โดยศึกษาจาก Brunauer Emmett-Teller (BET) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิว 50 ตารางเมตรต่อกรัมขนาดท่อภายในโดยเฉลี่ย 30 มิลลิเมตรภายในบรรจุหลอดไฟชนิดหลอดปรอท ความเข้มแสง 125 วัตต์ สีย้อมเมทิลีนบลูถูกใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารกับสาร NaOH และ HClO₄ทำการผสมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูในหลอด Poly-merization มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจนโดยการกวนสารละลายสม่ำเสมอ ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างด้วย pH-meter พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู จาก 6.6×10^{-6} เป็น 3.6×10^{-5} โมลาร์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม และควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างที่ pH=3 พบว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้เท่ากับ 1.79×10^4 โมลาร์ จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบไอออนของสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต และแอมโมเนีย เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.003 เป็น 0.05 กรัม ต่อสารละลาย 75 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู 1×10^{-5} โมลาร์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยาถึง 0.1 กรัม [14]

จุฑามาศ ลีประเสริฐ และณิขมล นิธมย (พ.ศ.2546) การเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจล เพื่อใช้กำจัด VOCs ออกจากอากาศเสีย พบว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจลที่อุณหภูมิห้องและความดัน บรรยากาศ ได้สภาวะที่เหมาะสม

สมคือ สัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นต่อตัวทำละลายคือ 1:40 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาคือ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้ผลึกสีขาวที่มีโครงสร้างอะนาเทส (Anatase) 100 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบปฏิกรณ์ คือ 60 วินาที เพราะการระเหยจะขึ้นอยู่กับการแข็งตัวของฟิล์มที่เคลือบโดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดของอัตราการระเหย นั่นคือ อัตราการแพร่ของไอที่แพร่ออกจากผิวหน้าของฟิล์ม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของก๊าซที่ชั้นขอบเขตบางๆ ที่อยู่ติดกับผิวหน้าของฟิล์ม เนื่องจากการพามวลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้การแพร่เพิ่มขึ้นได้อย่างมาก การเคลือบปฏิกรณ์ ที่ 60 วินาที ทำให้ผลึกขนาดเล็กเกาะติดบนปฏิกรณ์ อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถนำมาเคลือบปฏิกรณ์เพื่อใช้ในกระบวนการสลายสีย้อมด้วยแสงออกซิเดชัน [9]

ธีรยุทธ นุชเนียม และทิพวัลย์ ตุ่มทอง (พ.ศ. 2552) การบำบัดน้ำสีย้อมด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคกระบวนการสลายสีย้อมด้วยแสง และกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มีวัตถุประสงค์หลักในการลดความเข้มข้นของน้ำสีไดเร็กซ์ สีรีแอคทีฟสีดีสเพิร์ส และสีเบสิด ที่เหลือจากกระบวนการย้อมซึ่งจะทำการศึกษาตัวแปรหลัก 4 ตัว ในการบำบัดน้ำ สีย้อมแบบผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาจากปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 0 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็น 5 10 และ 15 กรัมต่อลิตรและระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์ตั้งแต่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้นำมาเปรียบเทียบความเข้มข้นด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำสีย้อมปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์กรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการบำบัด 6 ชั่วโมงและปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 5 กรัมต่อลิตร พบว่าใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง น้ำสีย้อมหลังการบำบัดจะมีความเข้มข้นลดลงจากความเข้มข้นก่อนการบำบัด [15]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการ

ในการดำเนินโครงการมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 เรซอร์ซินอล (Resorcinol)
- 3.1.2 ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde)
- 3.1.3 TTIP (Titanium Tetraisopropoxide)
- 3.1.4 น้ำกลั่น
- 3.1.5 เอทานอล (Ethanol)
- 3.1.6 กรดไนตริก (Nitric Acid)
- 3.1.7 สารสีย้อมเมทิลีนบลู

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 ตู้อบ
- 3.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.2.3 บีกเกอร์
- 3.2.4 เครื่องกวนสาร
- 3.2.5 เครื่องกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์XRD
- 3.2.7 เครื่องวิเคราะห์TGA
- 3.2.8 เครื่องวิเคราะห์SEM
- 3.2.9 เครื่องวิเคราะห์TEM
- 3.2.10 เครื่องUV-VIS spectrophotometer
- 3.2.11 เครื่องเหวี่ยงสาร

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะ ถูกนำมาวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีซึ่งได้แก่

3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษา โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน และตัวเร่งปฏิกิริยา ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน

3.3.2 การศึกษาสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM) ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียม ไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน

3.3.3 การศึกษาสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของ คาร์บอน

3.3.4 การศึกษาปริมาณคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Thermogravi- metric Analysis (TGA)

3.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมโดยใช้เทคนิคโซลเจล มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เตรียมสาร TTIP (Tetraisopropoxide) Ethanol และน้ำในอัตราส่วนโดย ปริมาตร 8:1.16:40.366 มิลลิลิตร

3.4.2 ทำการเตรียม TTIP (Tetraisopropoxide) Ethanol และน้ำในอัตราส่วนที่ได้ลงใน ปีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พร้อมทำการกวนสารละลายให้เข้ากัน

3.4.3 หลังจากนั้นทำการหยด HNO_3 (Nitric Acid 70 เปอร์เซ็นต์) 0.4485 มิลลิลิตร พร้อมทำการกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.4 จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารละลายทำการบ่มไททาเนียม ไดออกไซด์โซลเจลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.5 ทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.4.6 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

3.4.7 เมาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.8 เมื่อเผาเสร็จแล้วนำไปบดให้ละเอียด

3.4.9 จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาว พร้อมนำไปใช้งานได้

3.5 การสังเคราะห์เรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจล (RF gel)

การเตรียม เรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจล มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

3.5.1 ชั่งเรซอซินอล 7.2 กรัม

3.5.2 นำเรซอซินอล ที่ชั่งได้ทำการละลายด้วยน้ำที่ปริมาตร 7.2 มิลลิลิตร และกวนสารละลายให้เข้ากัน

3.5.3 เติมฟอร์มอลดีไฮด์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และกวนสารละลายให้เข้ากัน

3.5.4 บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

3.6 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนโดยใช้เทคนิคโซลเจล มีขั้นตอนดังนี้

3.6.1 เตรียมสาร TTIP (Tetraisopropoxide) Ethanol และน้ำในอัตราส่วนโดยปริมาตร 8:1.16:40.366 มิลลิลิตร

3.6.2 เตรียม TTIP (Tetraisopropoxide) Ethanol และน้ำในอัตราส่วนที่ได้ลงในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พร้อมทำการกวนสารละลายให้เข้ากัน

3.6.3 หลังจากนั้นทำการหยด HNO_3 (Nitric Acid 70 เปอร์เซ็นต์) 0.4485 มิลลิลิตร พร้อมทำการกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.6.4 จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารละลาย แล้วทำการบ่มเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.6.5 หลังจากนั้นทำการRefluxที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.6.6 นำเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจล ที่ทำการบ่มไว้ที่ 10 ชั่วโมงมาทำการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์เจล ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1:1 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ

3.6.7 บ่มสารละลายที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จะกลายเป็นของแข็ง

3.6.8 นำของแข็งที่ได้บดให้ละเอียด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.6.9 หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.6.10 เมื่อเผาเสร็จแล้วนำไปบดให้ละเอียด

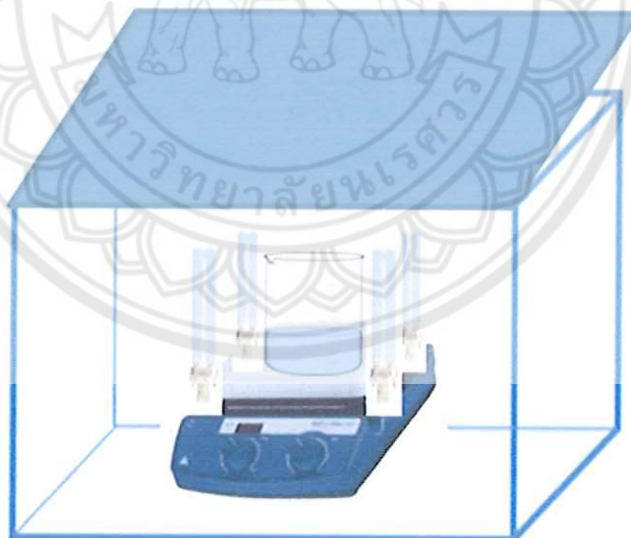
3.6.11 จะได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีเทา พร้อมนำไปใช้งานได้

3.7 การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) ภายใต้แสง UV-C ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.7.1 การทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนที่ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้น 5 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ปรับ pH ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.25 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ในสภาวะการดูดซับ โดยไม่ใช้แสงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปแยกตะกอนและนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อยู่ในน้ำ โดยใช้เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร



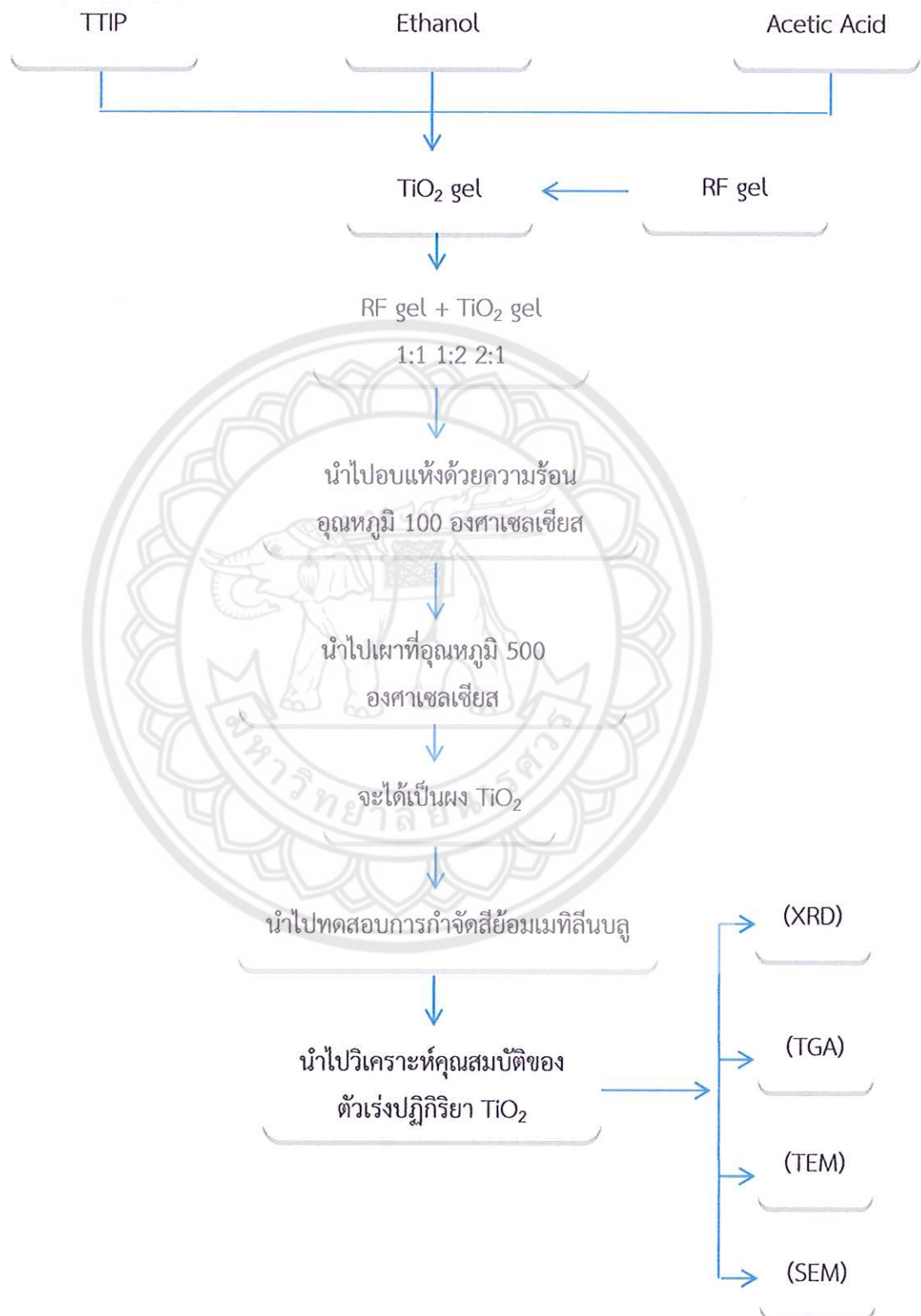
รูปที่ 3.1 กล่องที่บแสง

3.7.2 การทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลู

ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนที่ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลินบลูเริ่มต้น 5 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ปรับ pH ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.25 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ในสภาวะการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้แสงเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง แล้วนำไปแยกตะกอนและนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูที่อยู่ในน้ำ โดยใช้เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร



3.8 แผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทดลอง

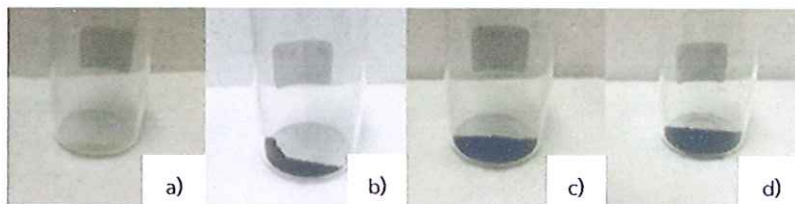
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยวิธีโซลเจล เตรียมได้โดยผสมไททานเนียมไดออกไซด์เจลกับเรซอซินอลฟอร์มมอลดีไฮด์เจล ซึ่งเรซอซินอลฟอร์มมอลดีไฮด์เจลเป็นแหล่งของคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว ทำการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิค SEM TEM XRD และ TGA ทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เช่น ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความเป็นกรด-ด่างของเมทิลีนบลู

4.1 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ถูกเตรียมด้วยวิธีการโซลเจล โดยการผสมไททานเนียมไดออกไซด์เจลกับเรซอซินอลฟอร์มมอลดีไฮด์เจล ไททานเนียมไดออกไซด์เจลเตรียมได้โดยผสม TTIP (Tetraisopropoxide) เอทานอล และน้ำในอัตราส่วนโดยปริมาตรคือ 8.00:1.16:40.37 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันแล้วค่อยๆ หยดกรดไนตริก 0.45 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 13 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซอซินอลฟอร์มมอลดีไฮด์เจล ที่ทำการบ่มไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์เจล ในอัตราส่วนโดยปริมาตรที่ทำการศึกษาคือ 1:1 1:2 2:1 และบ่มสารละลายดังกล่าวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จะกลายเป็นของแข็งนำมาบดให้ละเอียด และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน สามารถเตรียมเหมือนกับวิธีตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน แต่จะไม่มีส่วนผสมเรซอซินอลฟอร์มมอลดีไฮด์เจล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีเทาดังแสดงในรูปที่ 4.1

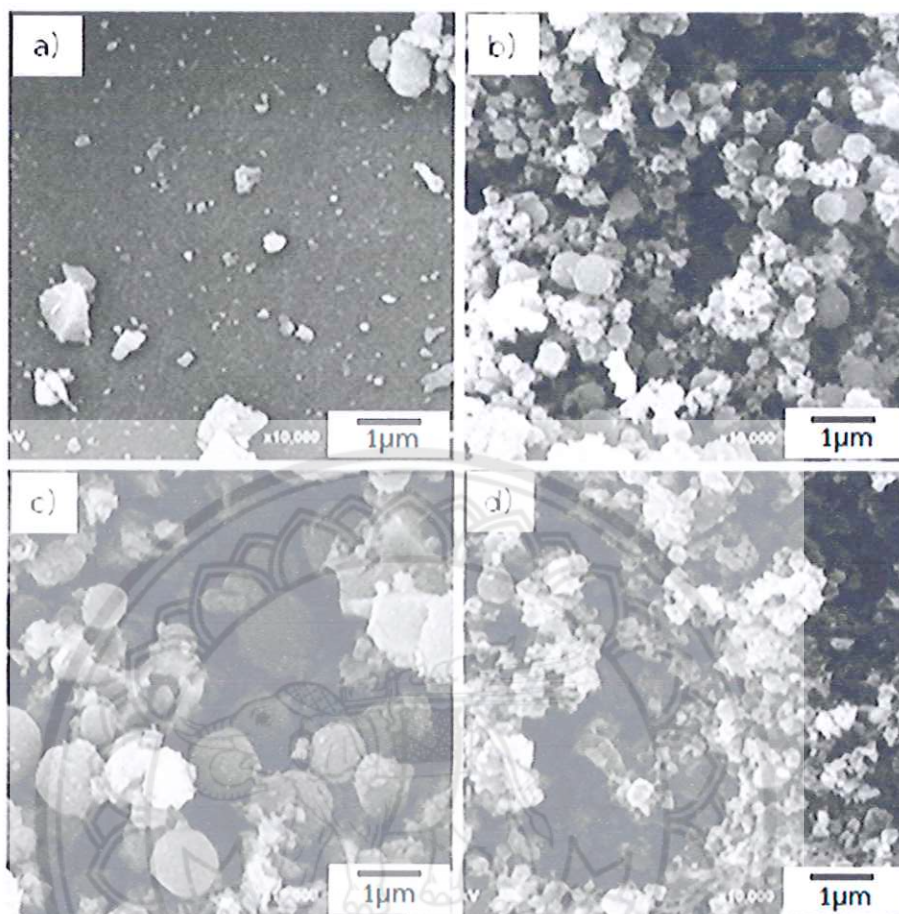


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ โดยการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลด a) TiO_2 b) 1:1 c) 1:2 d) 2:1

4.1.1 การศึกษาพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

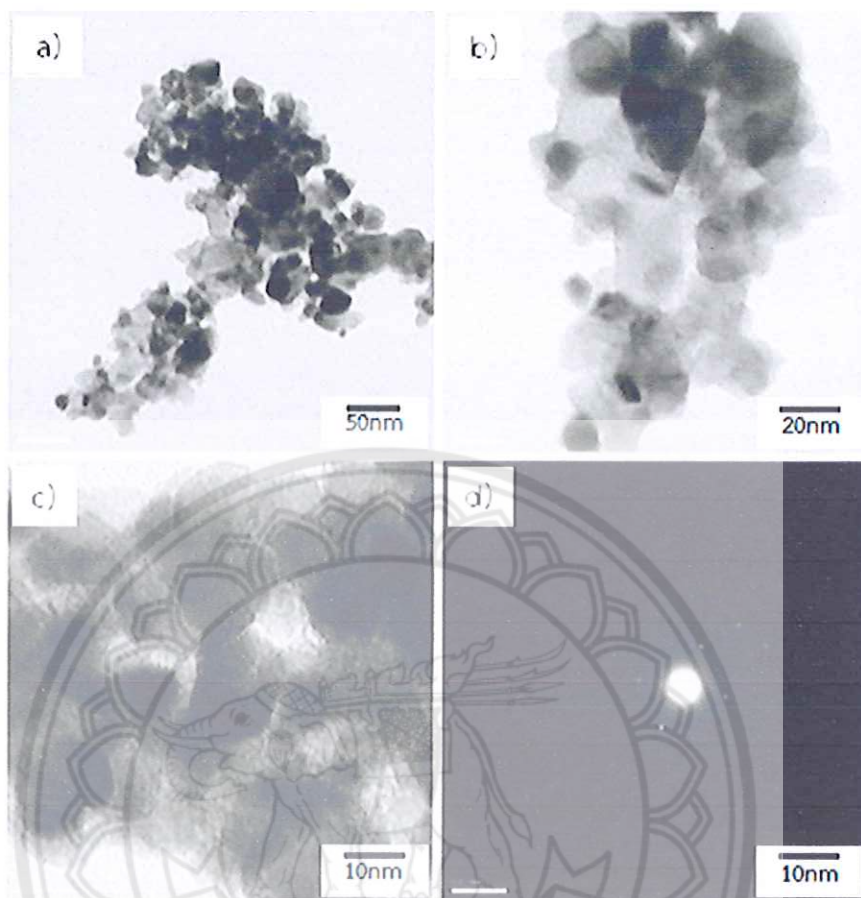
การศึกษาพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM) รูปที่ 4.3 ตามลำดับ โดยศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 1:2 2:1 และไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน โดยกำหนดให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนในอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 1:2 และ 2:1 เป็น TC1 TC2 และ TC3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 a) แสดงให้เห็นการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดจะแสดงดังรูปที่ 4.2 b) c) d) ตามลำดับ พบการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนเป็นก้อนกลมชิดกัน พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งลักษณะก้อนกลมดังกล่าวเป็นลักษณะของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์ [18] โดยมีขนาดอนุภาคของ TC1 TC2 และ TC3 เท่ากับ 0.6587 1.4620 และ 0.5273 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 1:2 2:1 a) TiO_2 b) 1:1 (TC1) c) 1:2 (TC2) d) 2:1 (TC3)

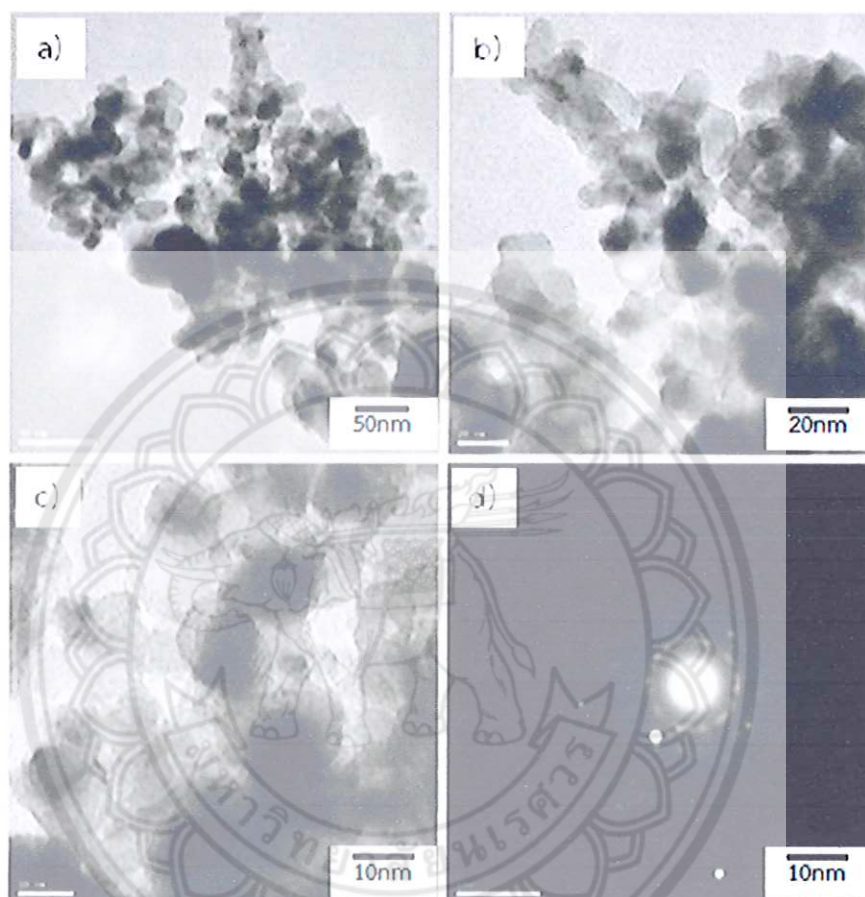
จากรูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่เตรียมได้ด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยภาพถ่าย TEM และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Diffraction pattern) ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน รูปที่ 4.3 a) พิจารณาที่ลักษณะรูปร่างของอนุภาคและขนาดของอนุภาค สังเกตเห็นอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร และมีลักษณะส่วนมากคล้ายวงกลมขอบเหลี่ยมเกาะกลุ่มกัน ส่วนที่มีสี่เหลี่ยมเกิดจากการซ้อนทับกันของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.3 b) และ c) เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนดังรูปที่ 4.3 d) พบการเลี้ยวเบนมีความเข้มของจุด ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 นั้นเป็นผลึก [19]



รูปที่ 4.3 TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 (TC1) โดยมีขนาดกำลังขยาย a) 135,000 เท่า b) 360,000 เท่า c) 650,000 เท่า d) การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในรูป c)

จากรูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่เตรียมได้ด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยภาพถ่าย TEM และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Diffraction pattern) ของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน รูปที่ 4.4 a) พิจารณาที่ลักษณะรูปร่างของอนุภาคและขนาดของอนุภาค สังเกตเห็นอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร และมีลักษณะส่วนมากคล้ายวงกลมเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากมีปริมาณของเรซอินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดมากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์เจลด 2 เท่า ซึ่งลักษณะวงกลมที่เห็นดังกล่าวเป็นลักษณะของเรซอินอลฟอร์มอลดีไฮด์ ส่วนที่มีสี่เหลี่ยมเกิดจากการซ้อนทับกันของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.4 b) และ c) เมื่อพิจารณา

รูปแบบการเลี้ยวเบนดังรูปที่ 4.4 d) พบว่าการเลี้ยวเบนมีความเข้มของจุด ซึ่งบ่งชี้ว่าอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC3 นั้นเป็นผลึก [20]



รูปที่ 4.4 TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลเท่ากับ 2:1 (TC3) โดยมีขนาดกำลังขยาย a) 195,000 เท่า b) 360,000 เท่า c) 650,000 เท่า d) การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในรูป c)

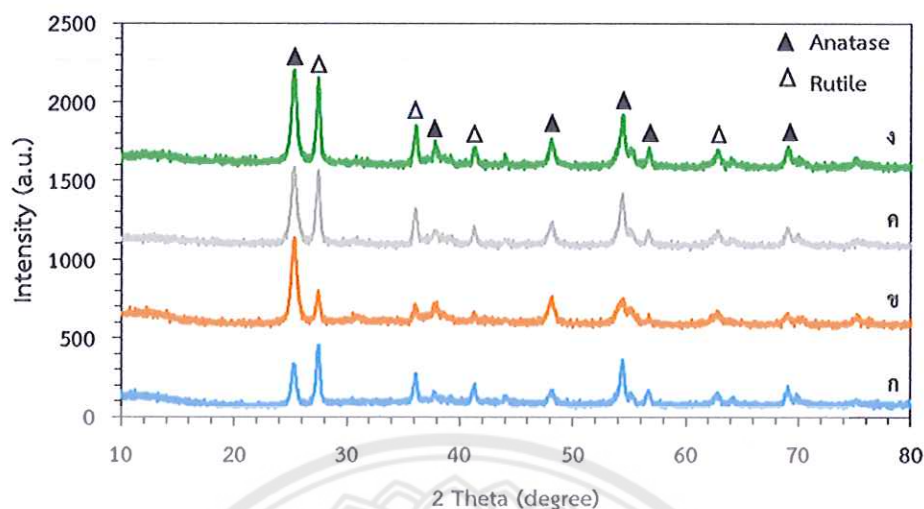
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างผลึกเพื่อทำการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 TC2 และ TC3 ด้วยเทคนิค X-ray powder diffraction (XRD) ดังรูปที่ 4.5

จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD ของ ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น (TiO_2) และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 TC2 และ

TC3 พบว่าสารตัวอย่างสามารถก่อตัวเป็นโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส ได้อย่างสมบูรณ์ได้เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงโครงสร้างความเป็นผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์โดย XRD แสดงในรูปที่ 4.5 ตำแหน่ง 2θ ที่ 25 38 48 54 57 และ 69 โดยเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างผลึกเปรียบเทียบกับงานของ Leon White และคณะ [21] พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบอะนาเทสทุกตำแหน่งโดยไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอะนาเทส จะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์

ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น (TiO_2) และตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 TC2 และ TC3 นำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD จากผลพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น (TiO_2) มีโครงสร้างแบบอะนาเทส 42 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 58 เปอร์เซ็นต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 มีโครงสร้างแบบอะนาเทส 71 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 29 เปอร์เซ็นต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC2 มีโครงสร้างแบบอะนาเทส 50 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 50 เปอร์เซ็นต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC3 มีโครงสร้างแบบอะนาเทส 52 เปอร์เซ็นต์ และรูไทล์ 48 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยของ Robert ได้รายงานไว้ว่าถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างแบบอะนาเทสมากกว่ารูไทล์ในอัตราส่วน 70 เปอร์เซ็นต์ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้ดี [22] จากข้อมูลของงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้น สนับสนุนให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์อื่น



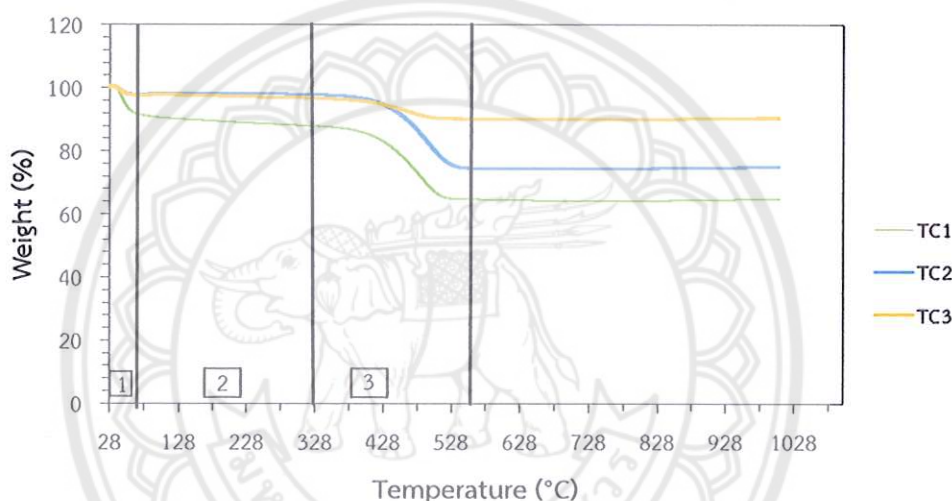
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ X-ray Diffraction(XRD) ของผงไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) TiO_2 (ข) TC1 (ค) TC2 และ (ง) TC3

4.1.3 การศึกษาปริมาณคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน

ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน ได้จากการสังเคราะห์ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Thermo gravimetric Analysis (TGA) ดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 TC2 และ TC3 ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงอุณหภูมิต่างๆ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่แตกต่างกันอยู่สามช่วง ซึ่งสามารถระบุถึงตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนที่นำมาทดสอบนั้น มีองค์ประกอบหลักๆ อยู่สองส่วนคือ ส่วนที่เป็นไททาเนียมไดออกไซด์ และส่วนที่เป็นเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์ ซึ่งเป็นแหล่งของคาร์บอน พิจารณาช่วงที่ 1 อุณหภูมิประมาณ 28-64 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นได้ประมาณ 8.2 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากเริ่มมีการสูญเสียไอน้ำในตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นน้ำที่หลงเหลือหลังจากการอบ [23] จากกราฟ TC1 มีการสูญเสียน้ำหนักที่มาก อาจเกิดจาก TC1 มีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนมากจึงทำให้มีการดูดซับน้ำไว้มาก พิจารณาช่วงที่ 2 อุณหภูมิประมาณ 64-328 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นได้ประมาณ 5.07 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงนี้เมื่อ

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำในตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ [23] พิจารณาช่วงที่ 3 อุณหภูมิประมาณ 328-532 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นได้ประมาณ 22.22 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกำจัดออกไป [24] ในช่วงอุณหภูมิ 532-1300 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก [25] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TC1 มีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามากที่สุด โดยน้ำหนักที่สูญหายไปเป็นน้ำหนักของเรซอินอลฟอร์ดีไฮด์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์และเป็นแหล่งของคาร์บอน



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคTGA

4.2 ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู

4.2.1 การเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 วิธี

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 3 วิธี ดังนี้

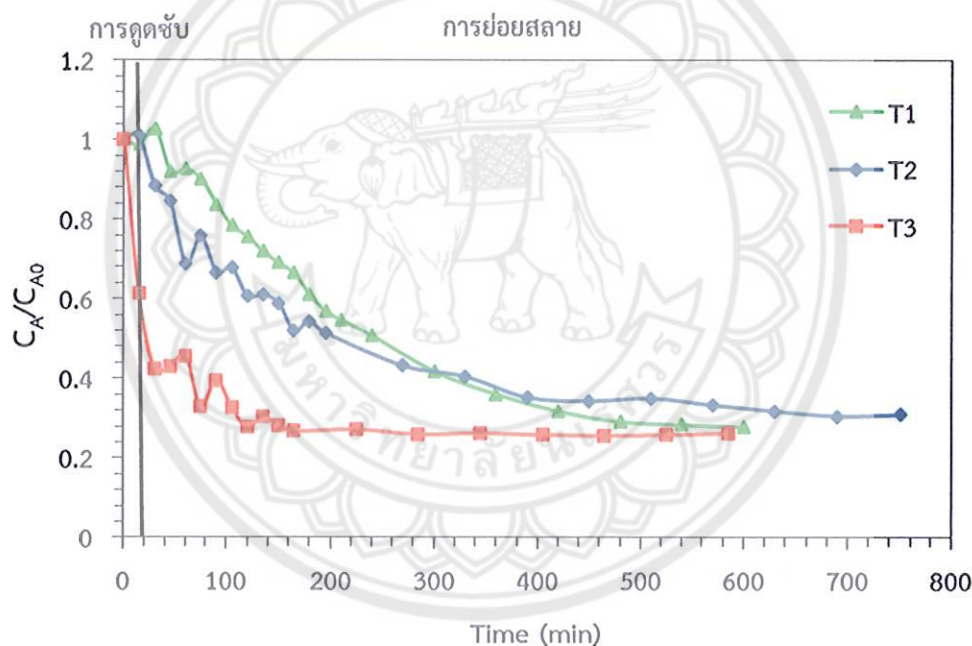
วิธีที่ 1 เตรียมไททาเนียมไดออกไซด์เจลโดยใช้ เอทานอล กรดไฮโดรคลอริก และกรดอะซิติก ในอัตราส่วนโดยปริมาตรคือ 48.5:0.06:6.34 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติม TTIP 17.51 มิลลิลิตร กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (T1) [26]

วิธีที่ 2 เตรียมไททาเนียมไดออกไซด์เจลโดยใช้ปริมาณกรดมากผสมกับ TTIP เอทานอล และน้ำ ในอัตราส่วนโดยปริมาตรคือ 8:1.16:40.37 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันแล้ว ค่อยๆ หยดกรด ไนตริก 2 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 13 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (T2) [27]

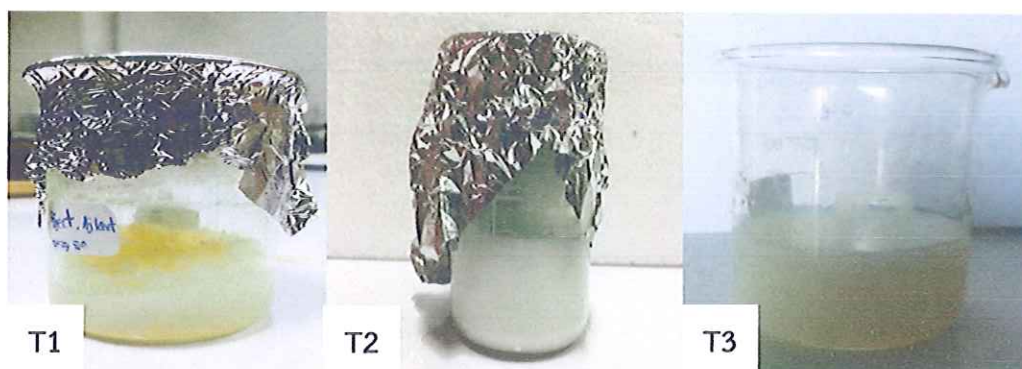
วิธีที่ 3 เตรียมไททาเนียมไดออกไซด์เจลโดยใช้ปริมาณกรดน้อยผสมกับ TTIP เอทานอล และน้ำ ในอัตราส่วนโดยปริมาตรคือ 8:1.16:40.37 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันแล้ว ค่อยๆ หยดกรดไนตริก 0.45 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 13 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (T3) [27]

ทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการเตรียมทั้ง 3 วิธีโดยการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ในถังปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4.7 จากการพิจารณาในช่วง 15 นาที เป็นช่วงของกระบวนการดูดซับ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 มีอัตราการดูดซับที่เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 และ T2 ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ดีถึง 73 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 มีการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการสังเคราะห์อย่างรุนแรงเมื่อสังเกตจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 มีลักษณะที่เป็นเกร็ดเกิดขึ้น ทำให้สันนิษฐานว่าผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 นั้นมีขนาดที่ใหญ่ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T2 มีลักษณะที่เป็นคอลลอยด์ ทำให้มีการตกตะกอนเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 ซึ่งมีลักษณะเป็นเจล เนื่องจากมีการลดปริมาณกรดลงจากตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T2 จึงทำให้สันนิษฐานว่าผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 นั้นมีขนาดที่เล็กกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T2 และ T3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์อาจนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และโครงสร้างผลึกได้จาก BET และ XRD แต่ในการทดลองได้พิจารณาถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อดูลักษณะคร่าวๆ แล้วนำไปทดสอบการย่อย

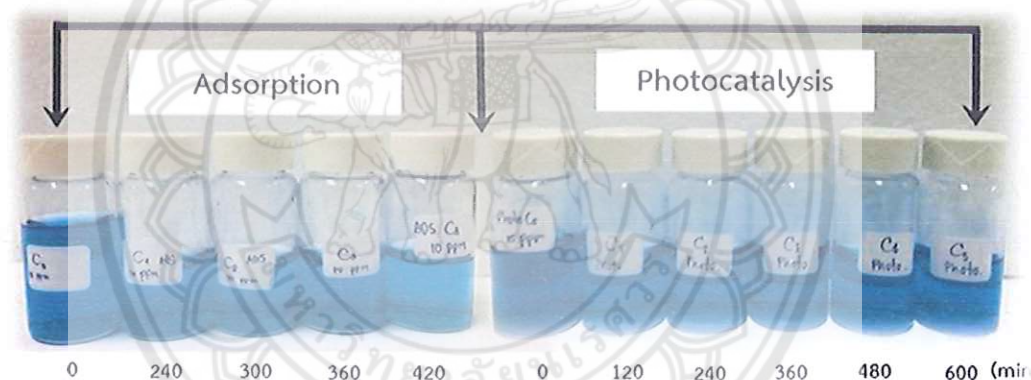
สลายสีย้อมเมทิลีนบลู ดังรูปที่ 4.7 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด ทำให้การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3 เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ดีที่สุด หลังจากนั้นนำไปทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นสูงถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสดังรูปที่ 4.9 พบว่าสีของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย งานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์โดยสังเคราะห์ร่วมกับคาร์บอน โดยมีสมมติฐานว่าจะสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นสูงๆ (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และผลการทดลองแสดงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.7 แสดงการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 T2 และ T3 ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.8 แสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T1 T2 และ T3



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ T3

4.2.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจล

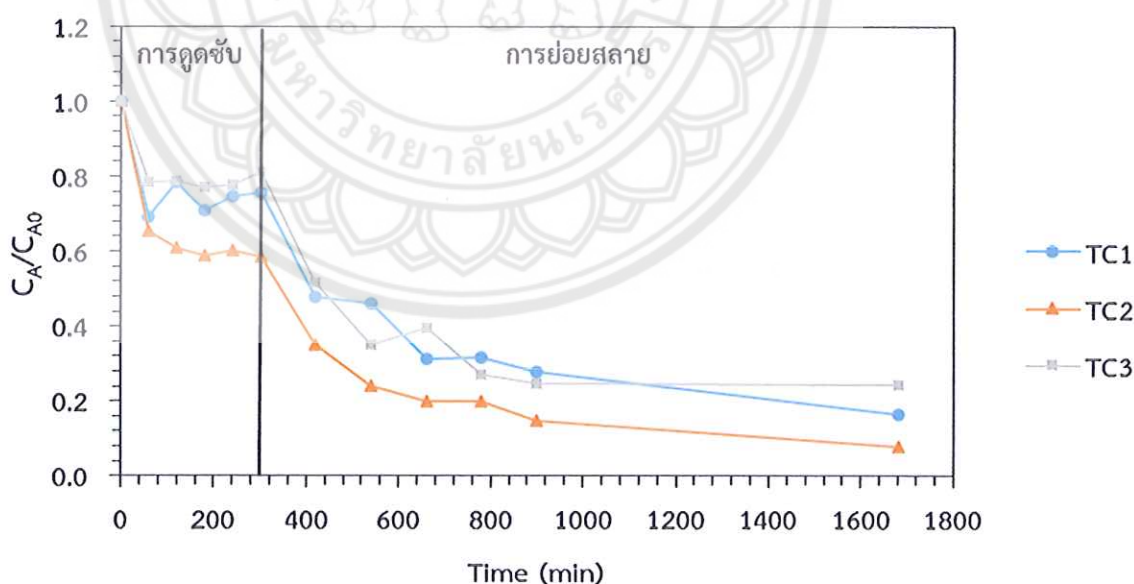
ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนโดยผสมไททาเนียมไดออกไซด์เจลกับเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจล ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลเท่ากับ 1:1 1:2 และ 2:1 จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน TC1 TC2 และ TC3 ตามลำดับ นำมาใช้ในการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 0.5 กรัมต่อลิตร

ซึ่งการเกิดกลไกการดูดซับจะเป็นกระบวนการแรกที่เกิดขึ้น โดยสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะถูกดูดซับมาไว้ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ โดยจะปล่อยให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ดูดซับสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจนสมดุลก่อนและไม่มีการเปิดไฟกระบวนการที่สองที่เกิดขึ้นคือกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง UV-C

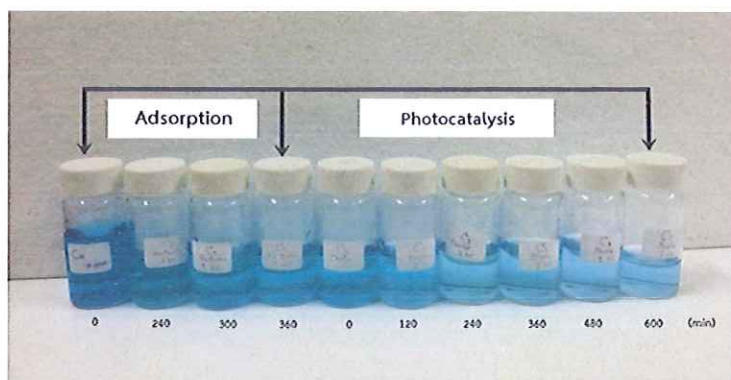
จากรูปที่ 4.10 พิจารณาที่เวลา 300 นาที เป็นช่วงการดูดซับพบว่า TC2 มีการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่มาก เพราะคาร์บอนช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น [28] จากผลการวิเคราะห์ TGA TC1 มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก TC2 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ TC3 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีการดูดซับที่ดี

แต่อย่างไรก็ตาม TC1 เมื่อพิจารณาที่ผลของ SEM จากรูปสังเกตได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคที่เล็ก อาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดพื้นที่ผิวและรูพรุนที่มาก ซึ่งถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็กเกินไป จะทำให้อัตราการดูดซับช้าลงเพราะถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ภายในรูพรุน [29] แต่อย่างไรก็ตามควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปตรวจสอบหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET เมื่อพิจารณาที่การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู TC2 มีการย่อยสลายที่ดีสามารถลดความเข้มข้นของเมทิลีนบลูได้ 93 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีการดูดซับได้มากทำให้การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและ TC1 สามารถลดความเข้มข้นของเมทิลีนบลูได้ 84 เปอร์เซ็นต์ ส่วน TC3 มีการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรที่เท่ากันและให้ปริมาณคาร์บอนที่เท่ากับอัตราส่วน 1:2 ที่มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า และอัตราส่วน 1:1 มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าอัตราส่วน 2:1 ที่มีปริมาณเรซอซินอลเป็น 2 เท่า และจากผล XRD ที่ TC1 พบโครงสร้างแบบเฟสอะนาเทส 71 เปอร์เซ็นต์ เฟสรูไทล์ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเฟสอะนาเทสมากกว่าจะทำให้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส [32] เนื่องจากอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ แถบพลังงานของรูไทล์ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าทำให้การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน และโฮลได้ยาก เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มาก ทำให้อิเล็กตรอน และโฮลแยกจากกันได้นานขึ้น [18] ที่ TC2 สามารถดูการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้จากรูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและโฟโตแคตาไลซิส ทั้งสองกระบวนการทำให้สีของสารละลายจางลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าทุกกระบวนการที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ มีความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู อย่างไรก็ตามในกรณีของกระบวนการดูดซับ สีของสารละลายไม่ใสภายในเวลา 360 นาที แสดงว่าส่วนของโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูบางส่วนไม่ถูกสลายและยังคงอยู่ในสารละลาย สำหรับกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส สีของสารละลายใสภายในเวลา 600

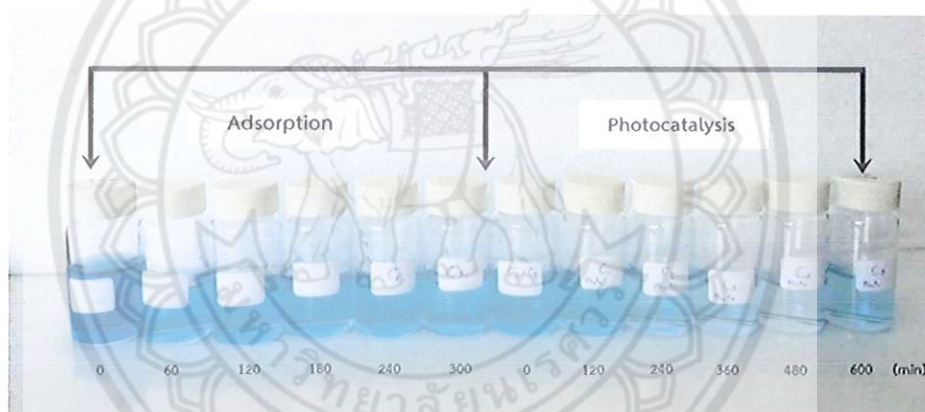
นาที่ ที่ TC1 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 สามารถดูการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู กับเวลาของกระบวนการดูดซับและโฟโตแคตาไลซิสทั้งสองกระบวนการทำให้สีของสารละลายจางลง อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าทุกกระบวนการที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ มีความสามารถในการสลายสีย้อม เมทิลีนบลูอย่างไร้ก็ตาม ในกรณีของกระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ของสารละลายไมโซภายใน เวลา 300 นาที แสดงว่าส่วนของโครงสร้างโมเลกุลของสีบางส่วนไม่ถูกสลายและยังคงอยู่ใน สารละลาย สำหรับกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสของสารละลายไมโซภายใน เวลา 600 นาที และที่ TC3 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและโฟโตแคตาไลซิส ดังรูปที่ 4.13 ทั้งสองกระบวนการทำให้สีของสารละลายจางลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ทุก กระบวนการที่ใช้ในกรณีศึกษานี้ มีความสามารถในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพียงเล็กน้อยอย่างไร้ ก็ตาม ในกรณีของกระบวนการดูดซับสีของสารละลายไมโซภายในเวลา 480 นาที แสดงว่าส่วนของ โครงสร้างโมเลกุลของสีบางส่วนไม่ถูกสลายและยังคงอยู่ในสารละลาย สำหรับกระบวนการโฟโต แคตาไลซิสสีของสารละลายไมโซภายใน เวลา 600 นาที จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบสี ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ TC1 ไสมากกว่า TC3



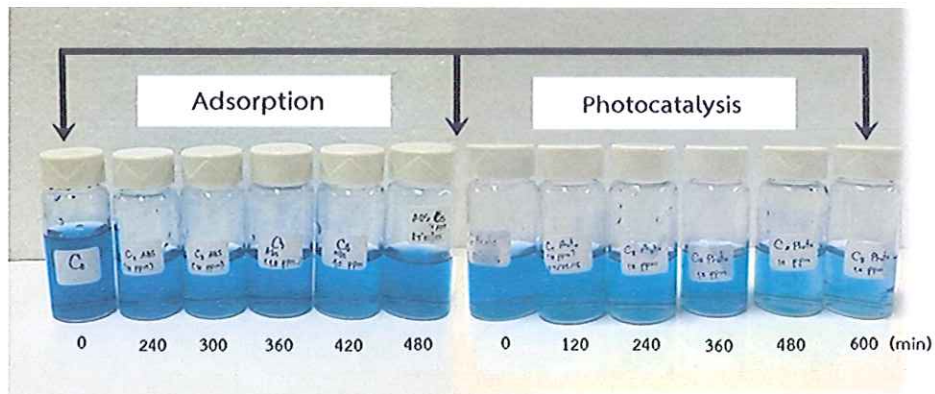
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับ และการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ TC1 TC2 และ TC3 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ 0.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC2



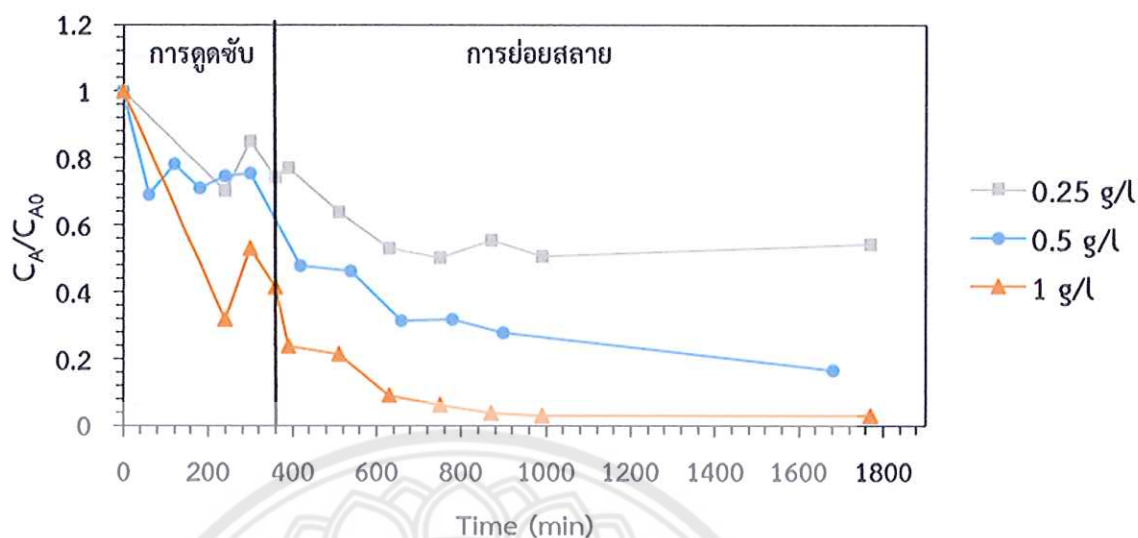
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับเวลาของกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC3

4.2.3 การเปรียบเทียบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

ผลการเปรียบเทียบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา TC1 ที่ 0.25 กรัมต่อลิตร 0.5 กรัมต่อลิตร และ 1 กรัมต่อลิตร ซึ่ง 1 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุดของงานวิจัยของคุณ Lakshmi และคณะ ในปี 2004 ได้รายงานว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และจะเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณถึง 1 กรัมต่อลิตร [14] ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากรูปที่ 4.14 พิจารณาในช่วงการดูดซับ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากถึง 1 กรัมต่อลิตร ให้ผลการดูดซับที่มาก เนื่องจากโดยตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ จะมีพื้นที่ผิวและรูพรุนในระดับหนึ่ง เมื่อใส่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุน ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีขึ้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง จะทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีสารสีย้อมเมทิลีนบลูถูกดูดซับไว้ที่ผิวมากก็พร้อมจะเกิดปฏิกิริยาต่อได้ทันที โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25 กรัมต่อลิตร สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 46 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 84 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้าหากมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินจะส่งผลทำให้เกิดการบดบังแสงที่จะมาสัมผัสกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส [30]



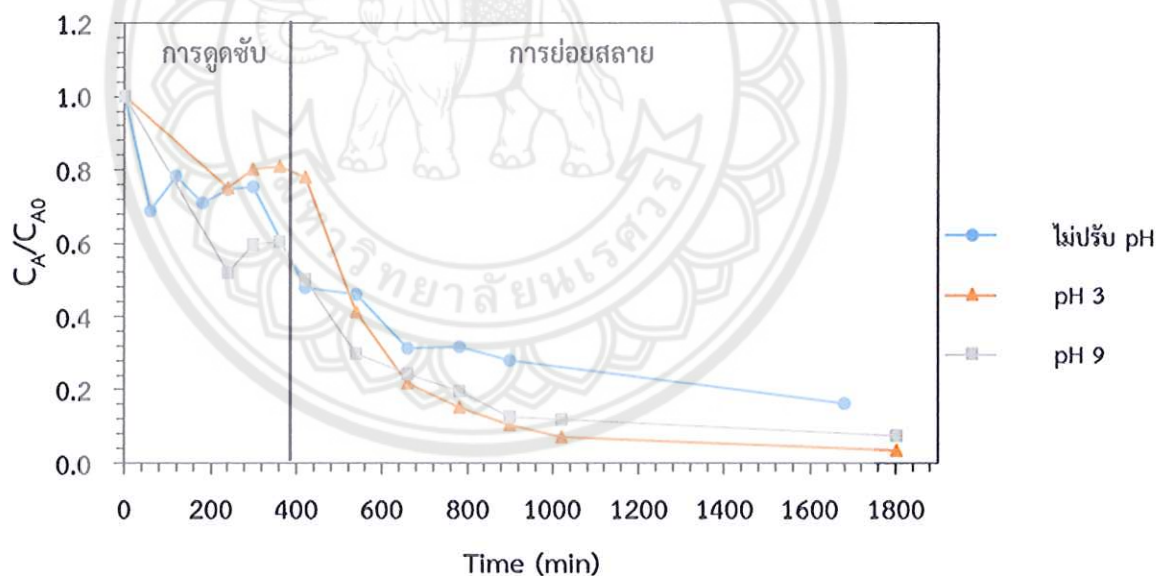
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับ และการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันคือ 0.25 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.4 การเปรียบเทียบความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสีย้อมเมทิลีนบลูที่ไม่ปรับค่า pH และปรับค่า pH เท่ากับ 3 และ 9 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร นำมาดูดซับและย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยจะแสดงผลดังรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับ และย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยไม่ปรับค่า pH ของสีย้อมเมทิลีนบลู และปรับค่า pH เท่ากับ 3 และ 9 ซึ่งสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง พิจารณาที่ช่วงการดูดซับ จะเห็นว่าที่สีย้อมเมทิลีนบลูที่ไม่มีการปรับค่า pH และปรับค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งจะพบว่าสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีการปรับ pH9 ส่งผลต่อประสิทธิภาพต่อการดูดซับถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH 3 และไม่มีการปรับค่า pH ตามลำดับ เนื่องจากค่าประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับ (pH of point of zero charge) ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีค่า 4-6 [32] เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีค่า pH ต่ำกว่า pH ของสีย้อมเมทิลีนบลูจะส่งผลให้การเหนี่ยวนำประจุที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีประจุเป็นลบ ซึ่งสีย้อมเมทิลีนบลูมี

ประจวบจึงทำให้การดูดติดกันระหว่างประจวบกับประจวบได้ดีเป็นผลทำให้สีย้อมเมทิลีนบลูที่มีค่า pH 9 ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับได้ดี พิจารณาในช่วงการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง จะเห็นได้ว่าที่สีย้อมเมทิลีนบลูที่ไม่มีการปรับค่า pH และปรับค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง พบว่า สีย้อมเมทิลีนบลูที่มีการปรับ pH 3 ส่งผลต่อประสิทธิภาพต่อการย่อยสลายสีย้อมด้วยแสงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH 9 และไม่มีการปรับค่า pH ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีค่า pH 3 มีประสิทธิภาพของการดูดซับไม่ดี แต่ช่วงของการย่อยสลายด้วยแสงมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เนื่องจากสีย้อมเมทิลีนบลูที่ค่า pH 3 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจะส่งผลทำให้เกิด $^{\circ}\text{O}_2^-$ และ $^{\circ}\text{OH}^-$ เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH3 จะส่งผลให้ให้โครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ตำแหน่ง SO_2 มีการเกิด SO_4^{2-} ซึ่งเป็นประจุลบเมื่อประจวบเจอประจวบที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ จะเกิดแรงดูดติดกันได้ง่ายซึ่งเป็นผลทำให้ย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดี [33]



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู และการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการไม่ปรับค่า pH ของสีย้อมเมทิลีนบลูและปรับค่า pH เป็น 3 กับ 9

4.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์กับงานวิจัยอื่น

การศึกษาการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น พิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพิจารณาชั่วโมงที่ 2 ของกระบวนการย่อยสลายสีย้อมด้วยแสงดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์

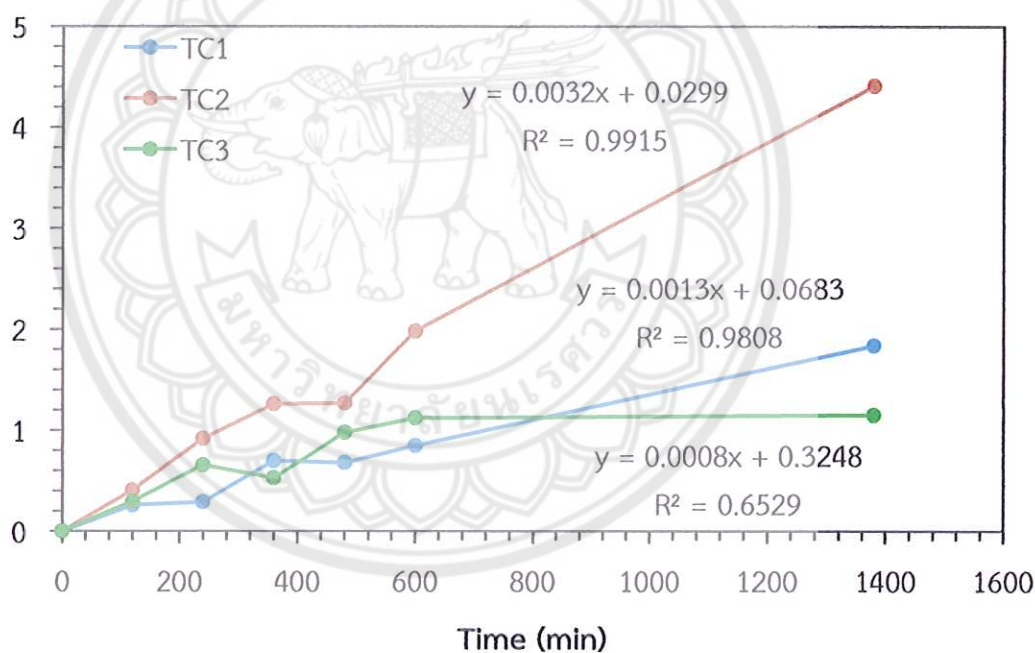
ความเข้มข้น	ตัวเร่ง	ชนิดหลอดไฟ	กำลังวัตต์ ของหลอดไฟ	ประสิทธิภาพในการ ย่อยสลาย (2 ชม)	งานวิจัย
50 มิลลิกรัม ต่อลิตร	TiO ₂	UV-C	36W	65%	งานวิจัยนี้
50 มิลลิกรัม ต่อลิตร	TiO ₂	UV-A	125W	99%	Elias ds Costa และคณะ [34]

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ชั่วโมงที่ 2 ของกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง จะพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากงานวิจัยของ Elias ds Costa และคณะ มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากงานวิจัยนี้ เนื่องงานวิจัยของ Elias ds Costa และคณะ มีการใช้ชนิดหลอดไฟและกำลังวัตต์ของหลอดไฟที่ไม่เท่ากันกับงานวิจัยนี้ เพราะชนิดของหลอดไฟและกำลังวัตต์ของหลอดไฟส่งผลต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสง อย่างไรก็ตามชนิดของหลอดไฟ UV-C ที่กำลัง 36 วัตต์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูถึง 65 เปอร์เซ็นต์

4.2.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์

นำค่าความเข้มข้นของการสลายตัวของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 22 ชั่วโมง มาเขียนความสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยาอันดับที่ 2 คือ $1/C_A - 1/C_{AO}$ กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16

พบค่าความเป็นเส้นตรงโดยรวม (R^2 เข้าใกล้ 1) ของความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา TC1 เท่ากับ 0.0013 ต่อกรัม นาที ซึ่งอธิบายได้ว่าการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ กับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยช่วงแรกของปฏิกิริยาการสลายตัวจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และในเวลาต่อมา ปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้การสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูมีการเปลี่ยนแปลงลดลง [35]



รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Pseudo second-order) ของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูจากกระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนด้วยวิธีโซลเจล และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับคาร์บอน โดยสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูดังต่อไปนี้

- 1) สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา T3 สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 73 เปอร์เซ็นต์
- 2) อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจล เท่ากับ 1:1 (TC1) ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส 70 เปอร์เซ็นต์ และรูโกล์ 30 เปอร์เซ็นต์ สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 84 เปอร์เซ็นต์
- 3) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปริมาณตัวเร่งที่มากที่สุดสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 97 เปอร์เซ็นต์
- 4) pH ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดย pH 3 สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 97 เปอร์เซ็นต์
- 5) อันดับการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส คือ อันดับสองเทียม ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา TC1 เท่ากับ 0.0013 ต่อกรัม นาที

จากการทดลองขั้นต้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสสามารถช่วยในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ และการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาให้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยา TC1 ไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อหาพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET Surface area เพื่อนำมาใช้เป็นเหตุผลประกอบในการเลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจล
- 2) ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ไปวิเคราะห์ Fourier transform infrared analysis (FTIR) เพื่อดูพันธะการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zollinger, H (1991) Color chemistry : syntheses, properties and applications of organic dyes and pigments VCH Publishers, Weinheim
- [2] Zhongren, Y. and James, E. (2005) : Nanoparticle and nanoporous carbon adsorbents for removal of trace organic contaminants from water. *Nanopart, J. Res.* 7: 477-487,
- [3] Shaposhnik, A. and Butyrskaya, V. (2004) : Computer simulation of cation-exchange membrane structure: an elementary act of hydrated ion transport. *Russ. J. Electrochem.* 40 : 767-770,
- [4] Slavinskaya, V. (2003) : Water pretreatment to remove organic impurities And desalination with ion exchangers. *Russian, J. Applied Chem.* 76: 1089-1093,
- [5] Song, O. Hong, Y. and Karanfil, T. (2009) : Isolation and fractionation of natural organic matter: evaluation of reverse osmosis performance and impact of fractionation parameters, *Environ. Monit. Assess.* 153: 1-4,
- [6] Ding, Z. Qi, Z. (1995) Effect of hydrolysis water on the preparation of nanocrystalline titania powders via a sol-gel process *J Mater Sci Lett*, 14, pp. 21-22 View Record in Scopus Full Text via CrossRef Cited By in Scopus (76)
- [7] So, W. Park, B. Kim, J. Shin, H. (2001) The crystalline phase stability of titania particles prepared at room temperature by the sol-gel method *J Mater Sci*, 36 pp. 4299-430 *Journal* 169(1-3), 20-30.
- [8] ธนชัย ชัยจิตรสกุล (2005) งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเตรียมเรโซซินอลฟอร์มมาลดีไฮด์เจลและคาร์บอนเจลด้วยวิธีที่ต่างกันคือ ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทอออนิก (RF-CS) และไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว โดย RF-NS Carbon
- [9] จุฑามาศ ลีประเสริฐ และนิชกมล นิธมย (2003) การเตรียมไททานเนียมไดออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจล เพื่อใช้กำจัด VOCs ออกจากอากาศเสีย พบว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไททานเนียมไดออกไซด์ โดยเทคนิคโซล-เจล
- [10] ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล (2005) “กระบวนการโฟโตแคตาไลติก” หน้า 1-5.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] ชลดา อีรการณวงศ์ (2012) การปนเปื้อนของสารมลพิษอินทรีย์เป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญทั่วโลกการใช้ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์
- [12] นายยรรยง วารินทร์ (2004) ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งซึ่งมีแนวโน้มว่าถูกกว่าการอบแห้งด้วย 2 วิธี
- [13] ขจรศักดิ์ โสภจาจารย์ (1998) ศึกษาการกำจัดฟีนอลโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่อาศัยไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแขวนลอยโดยทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบ Semi-batch reactor
- [14] Lakshmi และคณะ (2004) งานวิจัยนี้คือการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำโดยอาศัยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมโดยศึกษาจาก Brunauer Emmett-Teller (BET)
- [15] อธิษฐาน นุชเนียม และทิพวัลย์ ตุ่มทอง การบำบัดน้ำสีย้อม ด้วยกระบวนการผสมผสานระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคนิคกระบวนการสลายสีย้อมด้วยแสงและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีวัตถุประสงค์หลักในการลดความเข้มข้นของน้ำสีไดเร็กซ์แอคทีฟสีดีสเพิร์ส และสีเบสที่เหลือจากกระบวนการย้อม (พ.ศ. 2552)
- [16] Albadarin^a, B. (2011) "Biosorption of toxic chromium from aqueous phase by lignin: Mechanism, effect of other metal ions and salts," **Chemical Engineering Volume 169, Issues 1-3, 1 May 2011, Pages 20-30**
- [17] Pekala, W. Farmer, C. Alviso, T. Tran, D. Mayer, T. Miller, M. Dunn, B. Non-Cryst, J (1998), *Solids*, 225, 74.
- [18] Orsolya Czakel^a (2012) Drying of resorcinol-formaldehyde gels with CO₂ medium *Microporous and Mesoporous Materials Volume 148, Issue 1, 15 January, Pages 34-42*
- [19] Marziyeh Salehi^{1,2}, Hassan Hashemipour^{1,3}, Mohammad Mirzaee² (2012) Experimental Study of Influencing Factors and Kinetics in Catalytic Removal of Methylene Blue with TiO₂ Nano powder *American Journal of Environmental Engineering, 2 (1) : 1-7*
- [20] ปวีณา เหล่ากุล¹, พรสวรรค์ ศรีศา² การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติวัสดุนาโนคอมโพสิต

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Leon White,¹ Youngmi Koo,¹ Yeoheung Yun,^{1,2} and Jagannathan Sankar¹ TiO₂ Deposition on AZ31 Magnesium Alloy Using Plasma Electrolytic Oxidation
- [22] Bessekhoud, Y Robert, R. and Weber V (2003), Synthesis of photocatalytic TiO₂ nanoparticles: optimization of the preparation conditions, J. Photoch . Photobio. A., 157, 47–53
- [23] Suchanek et al., 1998, 2002
- [24] เอกสิทธิ์ ชาตินทุ (2013) การผลิตน้ำเคลือบเซรามิกจากเปลือกหอยแมลงภู่ วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีที่ 16 ฉบับที่ 2
- [25] ทศพร สุวรรณเรือง การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมประเภทรีเอกทีฟ ด้วยกระบวนการแบบเบี่ยงเบนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-RH-MCM-41 โดยใช้การออกแบบการทดลอง แบบ Box – Behnken Design (BBD)
- [26] Nitikarn Fangern¹, Suchada Dejnakorn¹, Suksiri Prompunchai¹, SudjitSang Uanruang¹ Synthesis of nano crystalline thin films TiO₂ for photoactivity of Reactive Blue19 degradation
- [27] Young Jin Yun^a Low-temperature coating of sol – gel anatase thin films
- [28] โกวิทย์ ปิยะมั่งคลา และคณะ (2008) จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้โคโคซานเรซิน วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 ม.ค. - เม.ย.
- [29] Hameed และคณะ จลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับสารละลายสีเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่
- [30] สายไหม ศรีประไหม (2012) การศึกษาสมบัติการยึดเกาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) อนุภาคนาโน บนผิวโพลีเอทิลีนโดยวิธีการฉีดยึดพ่น ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [31] พีรพัชร เสนีย์รัตนประยูร และคณะ การบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีโซโนโฟโตแคตตาไลซิส รายงานโครงการหมายเลข ChE 2009-15

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] Xing Wen, Liming Tang (2013) One-dimensional copolymer nanostructures loaded with silver nanoparticles fabricated *via* metallogel template copolymerization and their pH dependent photocatalytic degradation of methylene blue *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* Volume 399, April 2015, Pages 86–96
- [33] Aiat Hegazy, Eric Prouzet Effect of physical chemistry parameters in photocatalytic properties of TiO₂ nanocrystals *Comptes Rendus Chimie* Volume 16, Issue 7, Pages 651–659
- [34] Elias da Costa, Patricio P. Zamora, Aldo J.G. Zarbin (2012) Novel TiO₂/C nanocomposites: Synthesis, characterization, and application as a photocatalyst for the degradation of organic pollutants *Journal of Colloid and Interface Science* Volume 368, Issue 1, 15, Pages 121–127
- [35] อติพล สว่างอารมย์ (2014) การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก



1. การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

กราฟมาตรฐาน เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู และค่าการดูดกลืนแสงของสีที่ทำการศึกษา จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู และค่าการดูดกลืนคลีนแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง การเตรียมกราฟมาตรฐานมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Blank) และสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูที่มีความเข้มข้น 1 2 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

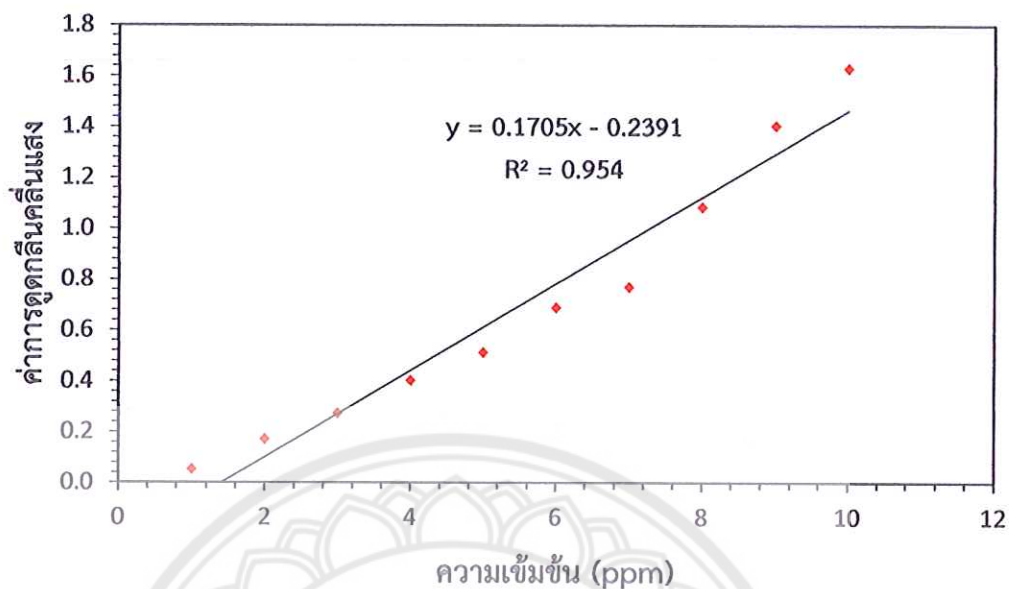
2. นำสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู ที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนคลีนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)

3. นำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟ และสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู

การคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูก่อนการบำบัดและความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูหลังการบำบัด ทำโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลูที่ได้จากการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากกราฟมาตรฐานเพื่อแปลงเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู

ตารางที่ 1.1 ค่าการดูดกลืนคลีนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลินบลู

ตัวอย่างที่	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนคลีนแสง
1	1	0.054
2	2	0.171
3	3	0.274
4	4	0.402
5	5	0.512
6	6	0.688
7	7	0.769
8	8	1.083
9	9	1.404
10	10	1.629



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐาน

2. เปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ทั้งสามสูตร (T1 T2 และ T3) และไททานเนียมไดออกไซด์แบบคอมโมเชี่ยล (T)

ตารางที่ 2.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ (T1)

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลีนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (5ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
0	0.615	5.009	5.009	1.000
15	0.604	4.942	5.009	0.987
30	0.639	5.148	5.009	1.028
45	0.547	4.610	5.009	0.920
60	0.551	4.636	5.009	0.925
75	0.531	4.519	5.009	0.902
90	0.476	4.197	5.009	0.838
105	0.431	3.929	5.009	0.784
120	0.407	3.791	5.009	0.757
135	0.376	3.606	5.009	0.720
150	0.350	3.455	5.009	0.690
165	0.328	3.328	5.009	0.664
180	0.282	3.059	5.009	0.611

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (5ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
210	0.228	2.739	5.009	0.547
240	0.194	2.543	5.009	0.508
300	0.118	2.093	5.009	0.418
360	0.068	1.803	5.009	0.360
420	0.032	1.589	5.009	0.317
480	0.009	1.458	5.009	0.291
540	0.003	1.419	5.009	0.283
600	-0.002	1.391	5.009	0.278

ตารางที่ 2.2 สักเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททานเนียมไดออกไซด์ (T2)

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (5ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
0	0.552	4.639	4.639	1.000
15	0.561	4.694	4.639	1.012
30	0.460	4.100	4.639	0.884
45	0.429	3.919	4.639	0.845
60	0.304	3.187	4.639	0.687
75	0.361	3.522	4.639	0.759
90	0.288	3.094	4.639	0.667
105	0.297	3.145	4.639	0.678
120	0.241	2.818	4.639	0.607
135	0.243	2.830	4.639	0.610
150	0.227	2.735	4.639	0.589
165	0.173	2.414	4.639	0.520
180	0.191	2.521	4.639	0.543
195	0.168	2.387	4.639	0.515
270	0.103	2.004	4.639	0.432
330	0.081	1.878	4.639	0.405
390	0.039	1.634	4.639	0.352
450	0.032	1.592	4.639	0.343
510	0.038	1.625	4.639	0.350
570	0.024	1.546	4.639	0.333

630	0.012	1.475	4.639	0.318
690	0.003	1.419	4.639	0.306
750	0.006	1.435	4.639	0.309

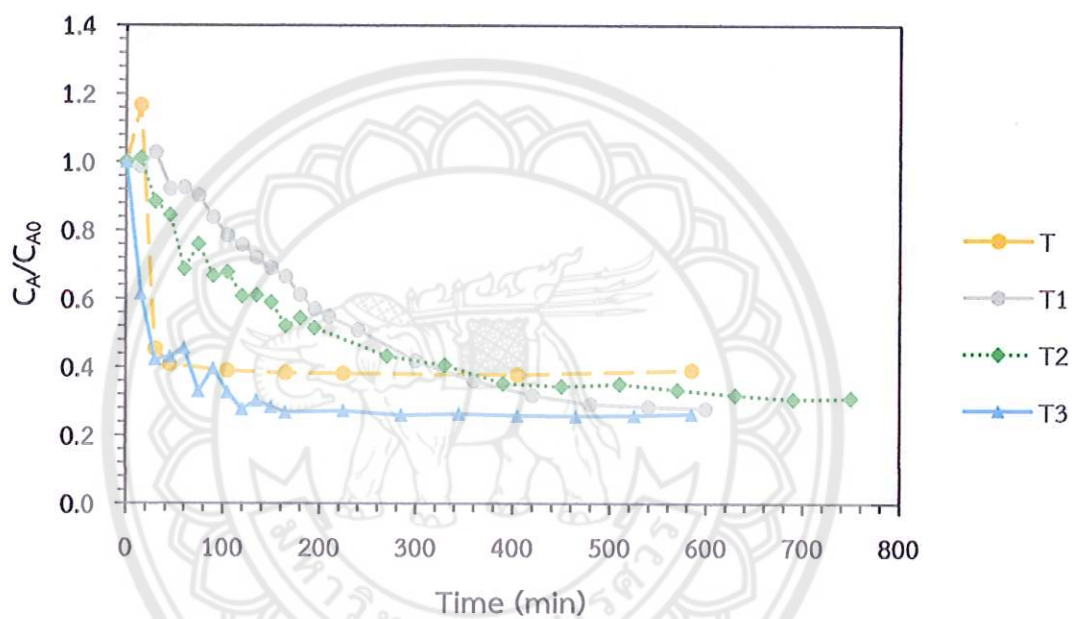
ตารางที่ 2.3 สัณเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ (T3)

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (5ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
0	0.711	5.573	5.573	1.000
15	0.345	3.427	5.573	0.615
30	0.162	2.352	5.573	0.422
45	0.170	2.402	5.573	0.431
60	0.194	2.543	5.573	0.456
75	0.074	1.837	5.573	0.330
90	0.137	2.206	5.573	0.396
105	0.071	1.820	5.573	0.327
120	0.024	1.544	5.573	0.277
135	0.049	1.687	5.573	0.303
150	0.030	1.578	5.573	0.283
165	0.015	1.490	5.573	0.267
225	0.019	1.515	5.573	0.272
285	0.008	1.447	5.573	0.260
345	0.011	1.465	5.573	0.263
405	0.006	1.439	5.573	0.258
465	0.005	1.429	5.573	0.256
525	0.006	1.439	5.573	0.258
585	0.011	1.465	5.573	0.263

ตารางที่ 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์แบบคอมโมเซียล (T)

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (5ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
0	0.395	3.719	3.719	1.000
15	0.500	4.334	3.719	1.165
30	0.048	1.686	3.719	0.453

45	0.019	1.514	3.719	0.407
105	0.008	1.448	3.719	0.389
165	0.003	1.422	3.719	0.382
225	0.003	1.418	3.719	0.381
405	0.000	1.404	3.719	0.378
585	0.009	1.453	3.719	0.391



รูปที่ 2 แสดงการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา T1 T2 T3 และ T ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 5 ppm

3. อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อโททานิยมไดออกไซด์เจลเท่ากับ 1:1 1:2 2:1 (TC1 TC2 และ TC3)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททานเนียมไดออกไซด์เจล (TC1)

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.395	50.638	50.638	1.000
	60	1.143	34.928	50.638	0.690
	120	1.304	39.643	50.638	0.783
	180	1.178	35.949	50.638	0.710
	240	1.240	37.780	50.638	0.746
	300	1.258	38.283	50.638	0.756
การย่อย สลาย	420	0.778	24.204	50.638	0.478
	540	0.749	23.374	50.638	0.462
	660	0.491	15.806	50.638	0.312
	780	0.499	16.042	50.638	0.317
	900	0.434	14.142	50.638	0.279
	1680	0.236	8.317	50.638	0.164

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททานเนียมไดออกไซด์เจล (TC2)

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.395	50.638	50.638	1.000
	60	1.078	33.019	50.638	0.652
	120	1.003	30.806	50.638	0.608
	180	0.970	29.850	50.638	0.589
	240	0.990	30.426	50.638	0.601
	300	0.964	29.661	50.638	0.586
การย่อย สลาย	420	0.556	17.716	50.638	0.350
	540	0.369	12.215	50.638	0.241
	660	0.296	10.094	50.638	0.199
	780	0.295	10.050	50.638	0.198
	900	0.204	7.398	50.638	0.146
	1680	0.085	3.898	50.638	0.077

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรโซซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจล (TC3)

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C _{A0} (ppm)	C _A /C _{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.395	50.638	50.638	1.000
	60	1.308	39.750	50.638	0.785
	120	1.314	39.944	50.638	0.789
	180	1.283	39.026	50.638	0.771
	240	1.293	39.315	50.638	0.776
	300	1.355	41.141	50.638	0.812
	การย่อย สลาย	420	0.845	26.170	50.638
540		0.557	17.751	50.638	0.351
660		0.636	20.046	50.638	0.396
780		0.423	13.795	50.638	0.272
900		0.381	12.566	50.638	0.248
1680		0.373	12.330	50.638	0.243

4. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันคือ 0.25 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรโซซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลเท่ากับ 1:1 (TC1)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.25 กรัมต่อลิตร

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	7.905	47.764	47.764	1.000
	240	1.095	33.501	47.764	0.701
	300	1.340	40.689	47.764	0.852
	360	1.163	35.521	47.764	0.744
	390	1.207	36.787	47.764	0.770
	การย่อย สลาย	510	0.994	30.554	47.764
630		0.816	25.345	47.764	0.531
750		0.773	24.078	47.764	0.504
870		0.853	26.426	47.764	0.553
990		0.775	24.141	47.764	0.505
1770		0.837	25.947	47.764	0.543

ตารางที่ 4.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.395	50.638	50.638	1.000
	60	1.143	34.928	50.638	0.690
	120	1.304	39.643	50.638	0.783
	180	1.178	35.949	50.638	0.710
	240	1.240	37.780	50.638	0.746
	300	1.258	38.283	50.638	0.756
การย่อย สลาย	420	0.778	24.204	50.638	0.478
	540	0.749	23.374	50.638	0.462
	660	0.491	15.806	50.638	0.312
	780	0.499	16.042	50.638	0.317
	900	0.434	14.142	50.638	0.279
	1680	0.236	8.317	50.638	0.164

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	7.954	48.051	48.051	1.000
	240	0.475	15.341	48.051	0.319
	300	0.823	25.547	48.051	0.532
	360	0.631	19.899	48.051	0.414
	390	0.342	11.419	48.051	0.238
	การย่อย สลาย	510	0.300	10.185	48.051
630		0.096	4.215	48.051	0.088
750		0.050	2.877	48.051	0.060
870		0.012	1.766	48.051	0.037
990		-0.001	1.365	48.051	0.028
1770		-0.002	1.344	48.051	0.028

5. ความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรโซซินอล
ฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 1:1 (TC1)

ตารางที่ 5.1 ไม่มีการปรับค่า pH ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.395	50.638	50.638	1.000
	60	1.143	34.928	50.638	0.690
	120	1.304	39.643	50.638	0.783
	180	1.178	35.949	50.638	0.710
	240	1.240	37.780	50.638	0.746
	300	1.258	38.283	50.638	0.756
	การย่อย สลาย	420	0.778	24.204	50.638
540		0.749	23.374	50.638	0.462
660		0.491	15.806	50.638	0.312
780		0.499	16.042	50.638	0.317
900		0.434	14.142	50.638	0.279
1680		0.236	8.317	50.638	0.164

ตารางที่ 5.2 มีการปรับค่า pH 3 ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	8.279	49.960	49.960	1.000
	240	1.229	37.445	49.960	0.750
	300	1.320	40.118	49.960	0.803
	360	1.331	40.421	49.960	0.809
	420	1.282	38.995	49.960	0.781
การย่อย สลาย	540	0.653	20.538	49.960	0.411
	660	0.323	10.887	49.960	0.218
	780	0.212	7.614	49.960	0.152
	900	0.130	5.216	49.960	0.104
	1020	0.074	3.563	49.960	0.071
	1800	0.010	1.694	49.960	0.034

ตารางที่ 5.3 มีการปรับค่า pH 9 ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

	เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	C_A/C_{A0} (ppm)
การดูดซับ	0	7.850	47.440	47.440	1.000
	240	0.795	24.705	47.440	0.521
	300	0.914	28.208	47.440	0.595
	360	0.926	28.563	47.440	0.602
	420	0.765	23.829	47.440	0.502
การย่อย สลาย	540	0.436	14.199	47.440	0.299
	660	0.348	11.605	47.440	0.245
	780	0.271	9.362	47.440	0.197
	900	0.158	6.040	47.440	0.127
	1020	0.146	5.679	47.440	0.120
	1800	0.074	3.576	47.440	0.075

6. การคำนวณค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลู

จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) ซึ่งคำนวณจากค่าคงที่ ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = kWt$$

- เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยา หน่วยเป็น (ต่อกรัม นาที)
 C_{A0} คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_A คือ ค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 W คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา หน่วยเป็น (กรัม)
 t คือ เวลาในการฉายแสง หน่วยเป็น (นาที)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order)

$$\ln\left(\frac{35.3}{24.2}\right) = k(0.05 \text{ กรัม})(120 \text{ นาที})$$

$$k = 0.0629 \text{ ต่อกรัม นาที}$$

และจากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order) ซึ่งคำนวณจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kWt$$

- เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตราอันดับการเกิดปฏิกิริยา หน่วยเป็น (ต่อกรัม นาที)
 C_{A0} คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_A คือ ค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 W คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา หน่วยเป็น (กรัม)
 t คือ เวลาในการฉายแสง หน่วยเป็น (นาที)

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order)

$$\frac{1}{24.2} - \frac{1}{35.3} = k(0.05 \text{ กรัม})(120 \text{ นาที})$$

$$0.013 = k (6 \text{ กรัม นาที})$$

$$k = 2.167 \times 10^{-3} \text{ ต่อกรัม นาที}$$

โดยจากตัวอย่างการคำนวณสามารถนำค่าความเข้มข้นเทียบกับเวลามาพล็อตกราฟจะได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกมา ซึ่งผลจากตารางที่ 6.1 6.2 และ 6.3 เมื่อนำไปพล็อตกราฟจะได้อันดับของการเกิดปฏิกิริยา และค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

ตารางที่ 6.1 การคำนวณค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรโซซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททานเนียมไดออกไซด์เจลด (TC1)

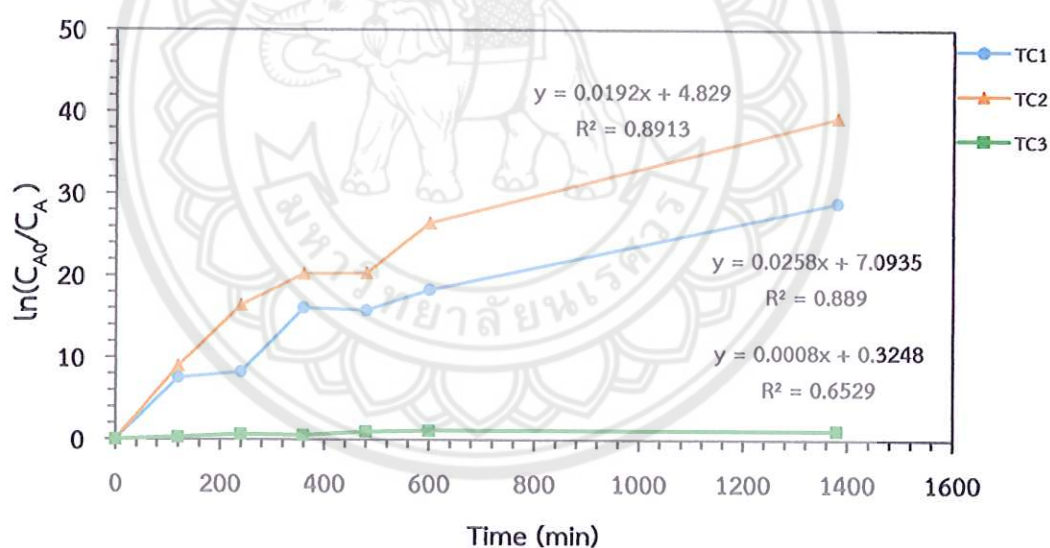
เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	ปฏิกิริยา อันดับที่ 1	ปฏิกิริยา อันดับที่ 2
0	1.156	35.303	35.303	0.000	0.000
120	0.778	24.204	35.303	7.549	0.260
240	0.749	23.374	35.303	8.247	0.289
360	0.491	15.806	35.303	16.071	0.699
480	0.499	16.042	35.303	15.775	0.680
600	0.434	14.142	35.303	18.296	0.848
1380	0.236	8.317	35.303	28.913	1.838

ตารางที่ 6.2 การคำนวณค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรโซซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททานเนียมไดออกไซด์เจลด (TC2)

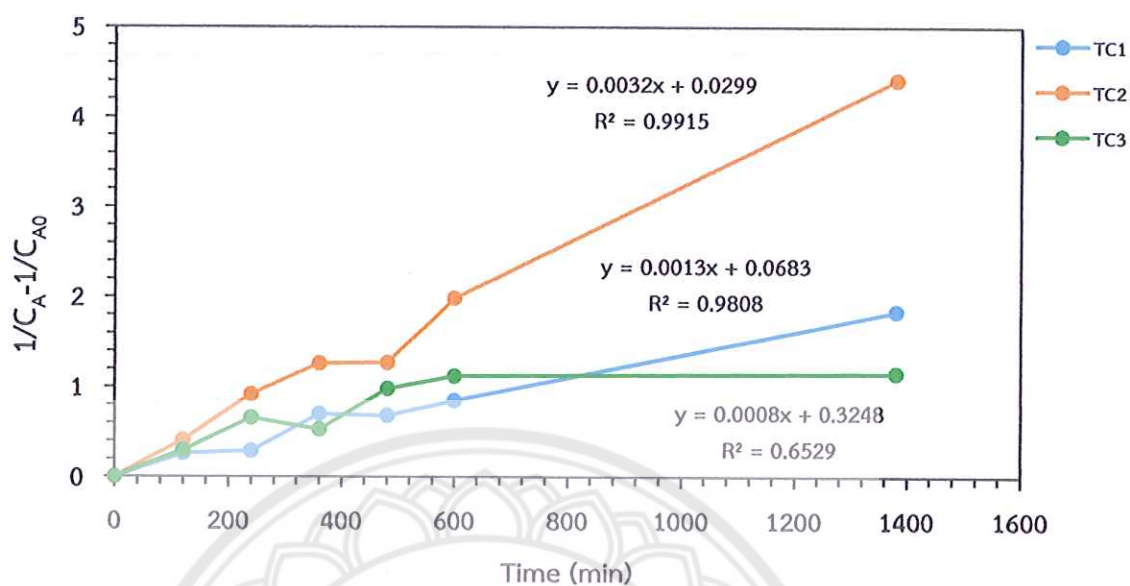
เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	ปฏิกิริยา อันดับที่ 1	ปฏิกิริยา อันดับที่ 2
0	0.807	27.768	27.768	0.000	0.000
120	0.556	17.716	27.768	8.989	0.409
240	0.369	12.215	27.768	16.425	0.917
360	0.296	10.094	27.768	20.238	1.261
480	0.295	10.050	27.768	20.325	1.270
600	0.204	7.398	27.768	26.455	1.983
1380	0.085	3.898	27.768	39.269	4.411

ตารางที่ 6.3 การคำนวณค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคตตาไลซิสในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มอลดีไฮด์เจลดต่อไททาเนียมไดออกไซด์เจลด (TC3)

เวลา (วินาที)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Absorbance)	ความเข้มข้น (50ppm)	C_{A0} (ppm)	ปฏิกิริยาอันดับที่ 1	ปฏิกิริยาอันดับที่ 2
0	1.401	42.477	42.477	0.000	0.000
120	0.845	26.170	42.477	9.686	0.293
240	0.557	17.751	42.477	17.450	0.656
360	0.636	20.046	42.477	15.019	0.527
480	0.423	13.795	42.477	22.493	0.979
600	0.381	12.566	42.477	24.359	1.121
1380	0.373	12.330	42.477	24.738	1.151



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าจลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order) ของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 TC2 และ TC3



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าจลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (Second-order) ของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ TC1 TC2 และTC3

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

อันดับการเกิดปฏิกิริยา	สมการ	R^2	k	
First-order	TC1	$y = 0.0192x + 4.829$	0.8913	0.0192
	TC2	$y = 0.0258x + 7.0935$	0.889	0.0258
	TC3	$y = 0.0008x + 0.3248$	0.6529	0.0008
Second-order	TC1	$y = 0.0032x + 0.0299$	0.9808	0.0013
	TC2	$y = 0.0013x + 0.0683$	0.9915	0.0032
	TC3	$y = 0.0008x + 0.3248$	0.6529	0.0008

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายก้องภพ ยศแพง
ภูมิลำเนา 27 หมู่ 6 ตำบลวังตะกุง อำเภอบางมูลนาก
จังหวัดพิจิตร 66210

ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวันที่สถิตพิทยาคม จังหวัดพิจิตร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail Mr.mikx@gmail.com



ชื่อ นางสาวมณิรัตน์ บุญดี
ภูมิลำเนา 78/1 หมู่ 10 ตำบลนิคมพัฒนา อำเภอบางระก่า
จังหวัดพิษณุโลก 65140

ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประชาสงเคราะห์วิทยา จังหวัดพิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail b-b_bell@hotmail.com

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ (ต่อ)



ชื่อ นายสุทธิพงศ์ ประภาการ
ภูมิลำเนา 74 หมู่ 8 ตำบลหนองคอนไทย อำเภอภูเขียว
จังหวัดชัยภูมิ 36110

ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัยชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail

Boom2422@hotmail.com

