



การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้คาร์บอนร่วมกับ
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วอิเล็กโทรด

ELECTROCHEMICAL DEGRADATION OF METHYLENE BLUE USING
CARBON-BASED TITANIUM DIOXIDE AS ELECTRODE

นายสมบุรณ์ กุลชาติชัย รหัสนิสิต 57365843

นายทศพล เสนาโปธิ รหัสนิสิต 57365607

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้
คาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วอิเล็กโทรด

ผู้ดำเนินโครงการ นายสมบูรณ์ กุลชาติชัย รหัส 57365843
นายทศพล เสนาโปธิ รหัส 57365607

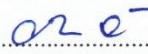
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม

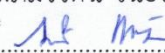
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

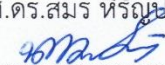
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

..... ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล)

..... กรรมการ
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้คาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วอิเล็กโทรด
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายสมบุรณ์ กุลชาติชัย รหัสสนิสิต 57365843 นายทศพล เสนาโปธิ รหัสสนิสิต 57365607
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการสังเคราะห์ขั้วอิเล็กโทรดจากเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นนำขั้วอิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และนำขั้วที่ได้จากการเตรียมเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์มาทดสอบการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด การทดลองได้ศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลดต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เจลดเท่ากับ 2:0.25 2:0.5 และ 2:1 ผลของระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0 3 และ 5 ชั่วโมง โดยบ่ม RF gel เป็นเวลา 3 วันเท่ากัน เปรียบเทียบผลของระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความหนาแน่นกระแส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการย่อยสลาย ได้แก่ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลดต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เจลด 2:1 ไม่มีระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 2 เซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ pH เท่ากับ 4 ความหนาแน่นกระแส 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงได้ 91.41 % การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First-order reaction) ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้วอิเล็กโทรด 2:1 เท่ากับ 1.88 ต่อวินาที

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่ายโดยเฉพาะ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนะนำวิธีการแก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ขอขอบคุณ ดร.นพวรรณ ไม้ทอง รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ในการให้คำแนะนำการปรับปรุงแก้ไขที่เป็นประโยชน์สำหรับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการ วิทยาศาสตร์ ครูช่าง คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการ

สมบุญณ์ กุลชาติชัย

ทศพล เสนาโปธิ

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.3.1 ตัวแปรต้น.....	3
1.3.2 ตัวแปรตาม.....	3
1.3.3 ตัวแปรควบคุม.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไทเทเนียมไดออกไซด์.....	4
2.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
2.2.1 วิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-Gel).....	6
2.2.2 ข้อดีของกระบวนการโซลเจล.....	9
2.2.3 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	10
2.3 ถ่าน (Carbon).....	11
2.4 เรซอินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล และคาร์บอนเจล.....	12
2.5 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process).....	16

2.5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	18
2.5.2	ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	18
2.5.3	การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย.....	20
2.6	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์.....	21
2.6.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)	21
2.6.2	X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)	22
2.6.3	UV-VIS Spectrophotometer	23
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3	วิธีการดำเนินโครงการงาน	30
3.1	วัสดุและสารเคมี	30
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	30
3.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	31
3.4	การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	31
3.5	การสังเคราะห์เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล (RF gel).....	32
3.5.1	การสังเคราะห์เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล (RF-Gel)	32
3.5.2	การสังเคราะห์คาร์บอนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (RF gel+TiO ₂).....	32
3.5.3	สังเคราะห์คาร์บอนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์	33
3.6	การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	33
3.7	แผนภาพการทดลอง.....	34
3.8	Experimental setup	35
3.8.1	ขั้นตอนการทดลอง	35
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	37
4.1	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ขั้วอิเล็กโทรดที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	37
4.1.1	อัตราส่วนของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์	37

4.1.2 จลนพลศาสตร์.....	47
4.1.3 ระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์	48
4.2 สภาวะการดำเนินงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	51
4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างขั้ว	51
4.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง	53
4.2.3 ความหนาแน่นกระแส.....	54
4.2.4 ผลของความเข้มข้น	55
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.1.1 การสังเคราะห์เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล (RF-Gel)	57
5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล	13
ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของเรซอินอล.....	14
ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของการไฟโรไลซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก เรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล.	16
ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	18
ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	18
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้วแต่ละประเภท.....	48
ตารางที่ 4.2 แสดงตะกอนหลังกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	50
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของขั้วแต่ละประเภท.....	48
ตารางที่ 4.2 แสดงตะกอนหลังกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	50



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	5
รูปที่ 2.3	ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอร์โกนอลและออร์โธโรมบิก (ก้องภพ 2558).....	6
รูปที่ 2.4	ขั้นตอนและกระบวนการโซลเจล (จิราภรณ์ 2551).....	7
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซลเจล (จิราภรณ์ 2551).....	9
รูปที่ 2.6	กลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิดเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์ (วิวัฒน์ 2548).....	13
รูปที่ 2.7	การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์ (วิวัฒน์ 2548).....	13
รูปที่ 2.8	กระบวนการไฟฟ้าเคมี	17
รูปที่ 2.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
รูปที่ 2.10	เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD).....	22
รูปที่ 2.11	เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	23
รูปที่ 2.12	ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกแบบทรงกระบอก	26
รูปที่ 4.1	ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดที่อัตราส่วนต่างๆ RF:TiO ₂ a) 1:1 และ b) 1:2.....	38
รูปที่ 4.2	แสดงขั้วอิเล็กโทรด 2:0.25 2:0.5 2:1 และ RF เคลือบ TiO ₂	38
รูปที่ 4.3	ลักษณะรูปร่างของขั้วอิเล็กโทรดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า ...	39
รูปที่ 4.4	พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด a) RF เคลือบ TiO ₂ b) RF c) RFT0.25 d) RFT0.5 และ e) RFT1.....	41
รูปที่ 4.5	SEM ของขั้วอิเล็กโทรดไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน	41
รูปที่ 4.6	วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TiO ₂ ในขั้วอิเล็กโทรด	42
รูปที่ 4.7	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด	44
รูปที่ 4.8	พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด a) RF เคลือบ TiO ₂ b) RF c) RFT0.25 d) RFT0.5 และ e) RFT1.....	44
รูปที่ 4.9	ลักษณะตะกอนที่เกิดจากเหล็กในกาการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู.....	45
รูปที่ 4.10	กลไกการทำงานของระบบการย่อยที่มี 3 อิเล็กโทรด (Zhang et al., 2013).....	46
รูปที่ 4.11	จลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order reaction) ของกระบวนการไฟฟ้าเคมี	47
รูปที่ 4.12	แสดงลักษณะสีของ RF เมื่อระยะเวลาที่บ่มเจลต่างกัน.....	48
รูปที่ 4.13	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีของเวลาที่บ่มเจลต่างกัน	49
รูปที่ 4.14	แสดงการดูดติดของตะกอนที่เป็นเหล็ก	51

รูปที่ 4.15	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมื่อระยะเวลาห่างชั่วที่ต่างกัน.....	52
รูปที่ 4.16	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อม ณ สภาพะ pH ที่ต่างกัน.....	53
รูปที่ 4.17	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมื่อความหนาแน่นกระแสต่างกัน	54
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมื่อความเข้มข้นต่างกัน.....	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีการปล่อยน้ำเสียออกมาเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรม การฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิต เป็นจำนวนมาก ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานเหล่านี้ จึงมีปริมาณสารปนเปื้อนและสีย้อมสูง หากไม่มีการลดปริมาณ สีย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ เนื่องจากสีย้อม สังกะหรหรือเมทิลีนบลู (Methylene Blue) เป็นสีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์โมเลกุลใหญ่ มีความ คงตัวสูง ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติทำให้ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ (นงนุช, 2553) จึงเกิดเป็นน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม

การบำบัดน้ำเสียเป็นกระบวนการเปลี่ยนน้ำที่ปนเปื้อนสารพิษให้เป็นน้ำสะอาด ไม่เป็นอันตราย ต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ คุณสมบัติของน้ำนั้นสอดคล้องกับระเบียบและข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการ บำบัดน้ำเสียนั้นมีหลายวิธีประกอบด้วยวิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีแตกต่างกันไป เช่น การบำบัดทางเคมีโดยส่วนใหญ่ต้องการสารเคมีราคาแพงจึงจะมีประสิทธิภาพและอาจเกิดตะกอนหลัง การบำบัดซึ่งต้องมีการกำจัดต่อไป ส่วนการบำบัดทางชีวภาพด้วยแอโรบิกแบคทีเรียนั้นจะทำให้เกิดตะกอน ชีวภาพจำนวนมาก หรือการบำบัดด้วยแอนแอโรบิกแบคทีเรียก็ไม่สามารถลดมลพิษลงได้ในระดับที่น่าพอใจ ส่วนวิธีเติมถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับของเสียจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งและอาจก่อมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้น ถ้ามีการนำถ่านกัมมันต์วนกลับมาใช้อีก (วนิดา, 2548) เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีย้อม ในอุตสาหกรรม มักบำบัดด้วยกระบวนการกายภาพหรือเคมี เช่น การตกตะกอนเคมี การดูดซับ การกรอง ด้วยเยื่อกรอง หรือการกำจัดสารพิษด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งหมายถึงความจำเป็นในการใช้สารเคมี เช่น สารตกตะกอน ทำให้โรงงานต้องมีพื้นที่ในการเก็บสารเคมีและมีมาตรการในการเก็บรักษา โดยต้อง คำนึงถึงการจัดการที่ดีเพื่อความสะอาดและปลอดภัย นอกเหนือไปจากเทคนิคที่กล่าวมาการกำจัดสีย้อม ด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมีจึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อน ของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ที่ไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพและลดปัญหาการจัดการสารเคมี ซึ่งจะ ช่วยลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสู่สิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการย่อยสลายด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide : TiO_2) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน โดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภท มีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษและราคาไม่แพงมาก วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถสังเคราะห์โดยใช้เทคนิคโซลเจล (Sol-gel) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิห้อง (Jin et al., 2014) ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวมาก เป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำจะถูกดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ในปริมาณมาก ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น วิธีหนึ่งก็คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับคาร์บอน

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ร่วมกับคาร์บอนมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าในกระบวนการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมี เพื่อใช้ในการย่อยสลายสีย้อมโดยคาร์บอนที่ใช้ในโครงการนี้สังเคราะห์มาจากเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความหนาแน่นกระแส ค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมเมทิลีนบลู ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทด อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล และระยะเวลาในการปัม RF ก่อนการผสม TiO_2

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้า แคโทดและแอโนด จากคาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการกระบวนการไฟฟ้าเคมี ได้แก่ อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ ระยะเวลาผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ความหนาแน่นกระแส ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู ระยะห่างระหว่างขั้วและค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมเมทิลีนบลู

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ตัวแปรต้น

- ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเป็นกรด-ด่าง 4 6 และ 10
- ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทด แอโนด 2 6 และ 10 เซนติเมตร
- ความหนาแน่นกระแส 20 40 และ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
- ขั้วอิเล็กโทรด
 - ใช้ RF เป็นขั้วอิเล็กโทรด
 - ใช้ RF ผสมกับ TiO_2 เป็นขั้วอิเล็กโทรด
 - ใช้ RF เคลือบด้วย TiO_2 เป็นขั้วอิเล็กโทรด

1.3.2 ตัวแปรตาม

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมด้วยเมทิลีนบลูกระบวนการไฟฟ้าเคมี

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

- อุณหภูมิในการเผา RF gel และ RF gel+ TiO_2 750 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง
- อุณหภูมิในการเผา RF gel เคลือบด้วย TiO_2 750 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง
- ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) 0.15 โมลต่อลิตร
- พื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด 37 ตารางเซนติเมตร (พื้นที่ผิวที่จุ่มลงในสีย้อมเมทิลีนบลู 30 ตารางเซนติเมตร)
- ระยะเวลาในการใช้บำบัดสีย้อมเมทิลีนบลู 10 ชั่วโมง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไทเทเนียมไดออกไซด์

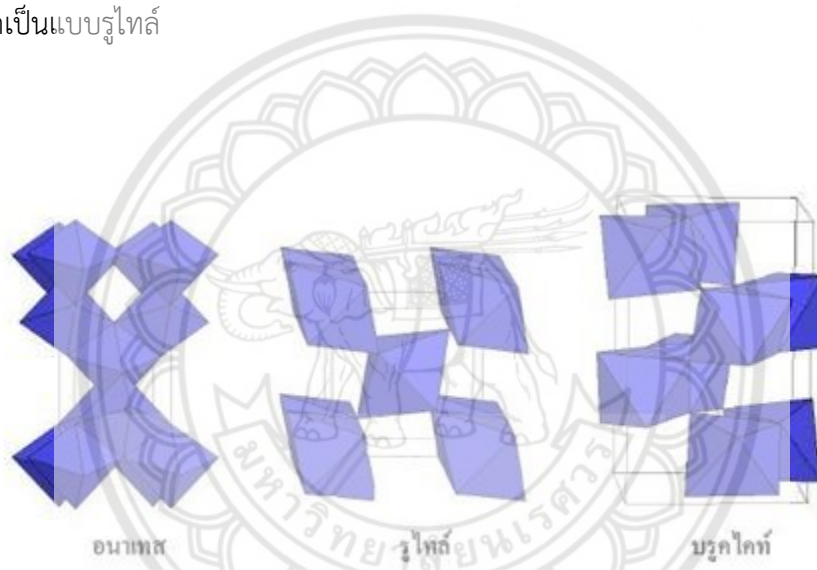
ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำ อากาศและก๊าซพิษ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและมีประสิทธิภาพที่สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อย่อยสลายหรือลดปริมาณสารมลพิษและโดยสามารถนำไปใช้ในการเคลือบสิ่งก่อสร้าง กระจกอาคารหรือรถยนต์ (Fujishima et al., 2000) ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

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

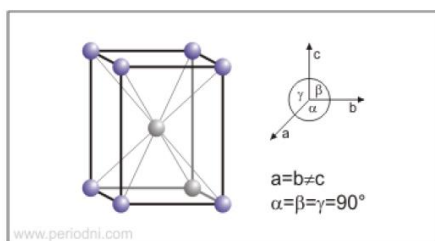
โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ TiO_2 ลักษณะโครงสร้างผลึกมี 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.2 แบบแรกเป็นคือ อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ แบบที่สองคือ รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง แบบที่สามคือ บรูคไคล์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เป็นชนิดที่พบได้น้อย ในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำหากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์



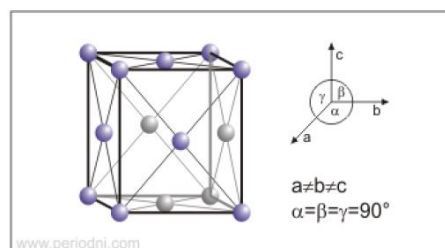
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา : <https://sites.google.com/site/cdnkkt082/khunsmbati>

โครงสร้างเทตระโกนอล มีแกน 2 แกน ยาวเท่ากันแต่อีกแกนหนึ่งจะสั้นหรือยาวกว่าแกนทั้ง 3 แกน ทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน ส่วนโครงสร้างออร์โธโรมบิกหรือโอห์มบิก (Rhombic) แกนทั้ง 3 แกนจะยาวไม่เท่ากัน แต่ทุกแกนจะทำมุมตั้งฉากกันและกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลและออร์โธโรมบิก



โครงสร้างเทตระโกนอล



โครงสร้างออร์โธโรมบิก

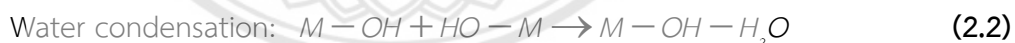
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลและออร์โธโรมบิก

ที่มา : การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสและตัวเร่งตัวปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน (ก้องภพ, 2558)

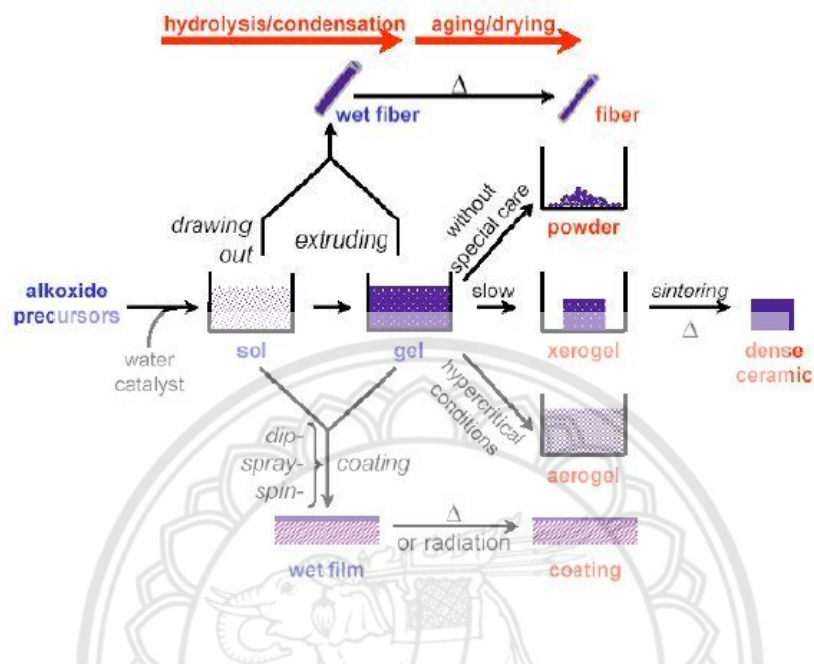
2.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

2.2.1 วิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-Gel)

กระบวนการโซลเจล (Sol-gel Process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ยิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน เป็นการเตรียมโลหะออกไซด์โดยเริ่มต้นปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำที่เรียกว่า “โซล” จากนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) ทำให้อนุภาคเชื่อมโยงต่อกันเป็นโครงสร้างตาข่าย “เจล” เมื่อนำเจลไปแคลไซต์ (Calcine) จะได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว ดังสมการที่ 2.1-2.3



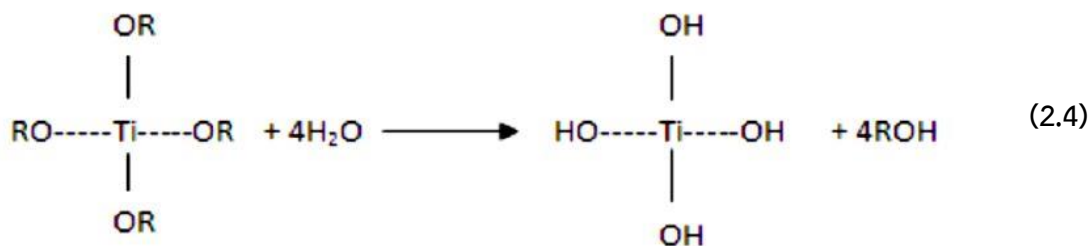
เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ ซิลิกอน (Si) เซอร์โคเนียม (Zr) ไทเทเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) ดีบุก (Sn) และซีเซียม (Ce) ส่วน OR แทนหมู่อัลคอกซิล (Alkoxyl group) มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ความเป็นกรด-ด่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะและอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสถานะที่แตกต่างกัน จะทำให้โซลและเจลมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ขั้นตอนและกระบวนการโซลเจล (พงษ์ศักดิ์, 2555)



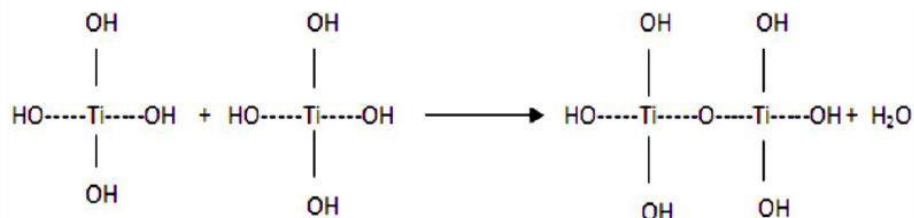
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนและกระบวนการโซลเจล

ที่มา : การพัฒนาสารเคลือบผิว TiO_2 ระดับนาโน (จิราภรณ์, 2551)

การทำโซลเจลคือ การผสมสารตั้งต้นกับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจลเป็นสารประกอบโลหะและกิ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ (Ligand) ที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxide) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่แสดงดังสมการที่ (2.4)

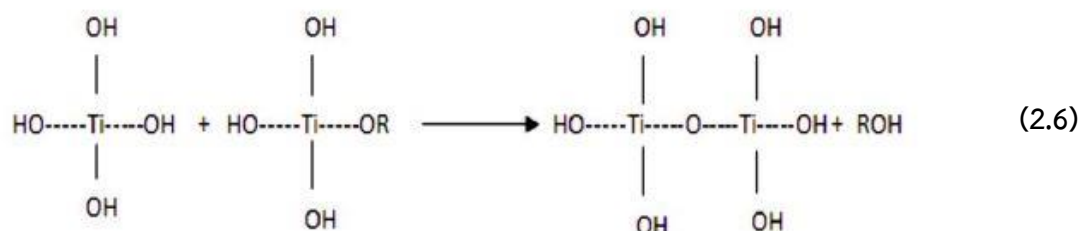


ในขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้น้ำเป็นผลพลอยได้ดังสมการที่ (2.5)

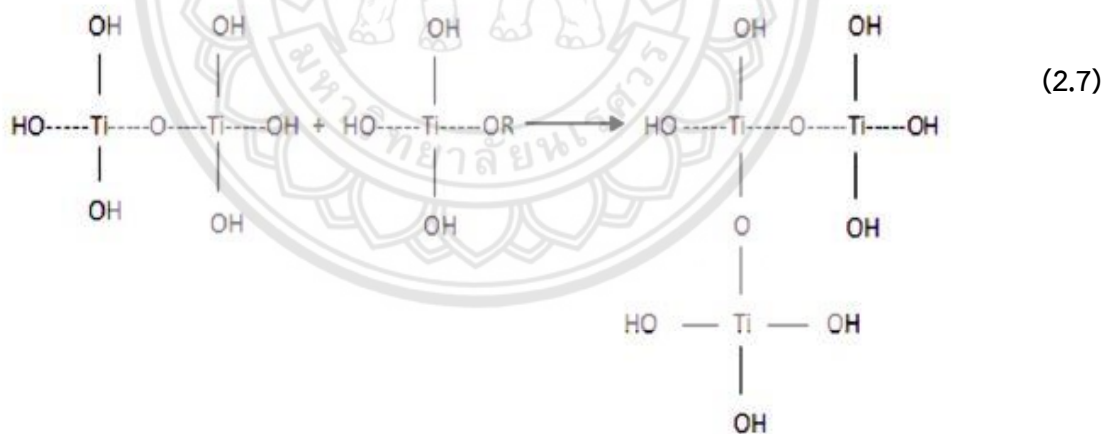


(2.5)

และปฏิกิริยาการควบแน่นของแอลกอฮอล์จะแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)



สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นโครงร่างที่อยู่ในสถานะที่เรียกว่า “เจล” จึงเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ว่า Polycondensation reaction ดังสมการที่ (2.7)



ในกระบวนการผลิตทั้งจากสถานะที่เป็นโซล และเจลเมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น เส้นใย แอโรเจล (Aerogel) ซีโรเจล (Xerogel) ผงและฟิล์มเพื่อเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป (จุฑามาศ, 2546)

2.2.2 ข้อดีของกระบวนการโซลเจล

เทคโนโลยีโซลเจลสามารถนำมาใช้ประโยชน์หลายรูปแบบ เช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และ วัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้ว (รูปที่ 2.5) สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสงและการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสาร และวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่ หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซลเจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุล สามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่าย นับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซลเจลมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมลักษณะสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในเชิงพาณิชย์ มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซลเจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้จริง (จิราภรณ์, 2551)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซลเจล

ที่มา : การพัฒนาสารเคลือบผิว TiO_2 ระดับนาโน (จิราภรณ์, 2551)

2.2.3 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

2.2.3.1 ด้านสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้น ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่จุดเริ่มในปี 1970 จนถึงปัจจุบัน จำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1000 ชนิด (พวงรัตน์ 2004) ได้ถูกนำมาทดสอบ และพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ BTEX (เบนซินโทลูอีน เอธิลเบนซิล และไซลีน) ซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนัก (จิราภรณ์, 2551)

2.2.3.2 ด้านการแยกน้ำและการบำบัดน้ำเสีย

การนำเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสมาใช้กับการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปี หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตคะตะไลซิส เริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่หลุดไปและหลุมประจุบวก (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) (จิราภรณ์, 2551)

2.2.3.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเร่งปฏิกิริยากับแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ คาร์บอนหรือ รวมถึงสารระเหยต่าง ๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่าและคราบดำต่างๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจก

ประเภทอื่นๆ รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรงและทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ในบริเวณที่มีมลภาวะสูงไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

2.2.3.4 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สารเร่งปฏิกิริยาดำรงด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในขั้นตอนที่สองของการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำรงด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้

2.3 ถ่าน (Carbon)

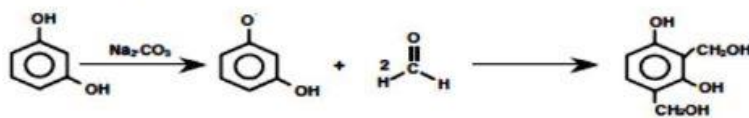
การเผาถ่านหรือการสะสมถ่าน ส่วนใหญ่แล้วมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และสถานประกอบการหลายแห่งมีลักษณะการผลิตที่คล้ายคลึงกัน การเผาถ่านจึงมีมากมายหลายแบบ จำแนกตามลักษณะกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ได้แก่ การเผาถ่านแบบเตาถ่าน การเผาถ่านแบบเตาอิฐ การเผาถ่านแบบเตาดินเหนียว การเผาถ่านแบบใช้ถังน้ำมัน การเผาถ่านมะพร้าวเพื่ออัดแท่ง เป็นต้น ถ่านถือเป็นชีวมวลที่ได้จากการเผาไหม้ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน หรือเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2555)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศไร้ออกซิเจน โดยได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด คือ ส่วนของแข็ง ส่วนนี้เป็นถ่านที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและทำถ่านกัมมันต์ได้ ส่วนของเหลวสามารถนำมาพัฒนาเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง สารเคมี และส่วนสุดท้ายที่เป็นส่วนของก๊าซใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่นำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมีหลายชนิด เช่น โพลีเมอร์ น้ำมันเครื่องใช้แล้ว หรือ ชีวมวลเป็นต้น สำหรับการใช้ไพโรไลซิสชีวมวลในปัจจุบันได้รับความสนใจในหลายๆ ประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเกษตรกรรมเนื่องจากมีแหล่งชีวมวลจำนวนมาก โดยชีวมวลที่นำมาใช้ในการไพโรไลซิสมีหลายชนิด เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กากชานอ้อย เนื้อในเมล็ดปาล์ม ขี้เลื่อย เป็นต้น (รินลดา, 2558)

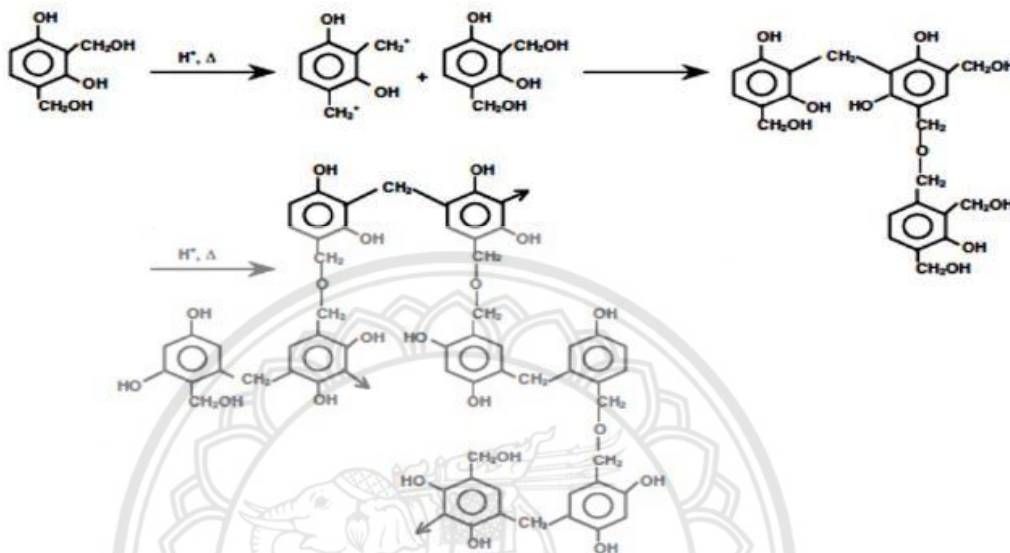
2.4 เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล และคาร์บอนเจล

เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล หรือ อาร์เอฟเจล สามารถเตรียมได้โดยการนำสารเรซอซินอล (R) ผสมกับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยให้เกิดสภาพเจล ปฏิกิริยาการเกิดเจลเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การบ่มเจลจึงต้องทำในภาชนะที่ควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้มีเวลาเพียงพอในการเกิดโครงข่ายเจล ปัจจัยหลักในขั้นตอนที่เกิดเจลคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเกิดเจลคือ Polycondensation เกิดขึ้นในสารตั้งต้นที่ถูกควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นที่เป็น Aquagel หรือ Alcolgel คือ สารตั้งต้นเมื่อใช้น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายตามลำดับ โดยโครงสร้างและคุณสมบัติส่วนมากของเจลขึ้นอยู่กับปฏิกิริยานี้และสภาวะที่เกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่สำคัญระหว่างเรซอซินอลและฟอร์มาลดีไฮด์จะมีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบอนุพันธ์ ไฮดรอกซีเมทิล (Hydroxymethyl) (-CH₂-OH) และเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุพันธ์ ไฮดรอกซีเมทิลในรูปแบบพันธะเมทิลีน (-CH₂-) และพันธะเมทิลีนอีเธอร์ (-CH₂-OCH₂) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 โดยมีอัลคาไลน์เป็นสิ่งสำคัญซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวเริ่มต้นของเรซอซินอลประจุลบ (Resoseinol anion) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ในปฏิกิริยาการเพิ่ม (Addition reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น สองสี่เมทิล-อลเรซอซินอล (2,4 Methylol resorcinol) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเพิ่มจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาการควบแน่นตามมา และทำปฏิกิริยาเป็นลักษณะการควบแน่นแบบต่อเนื่อง จะได้โครงข่ายที่มีขนาดเจลที่ใหญ่ขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (7-10 นาโนเมตร) สามารถสังเกตได้จากความหนืดที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 (วิวัฒน์, 2548)

1. Addition Reaction

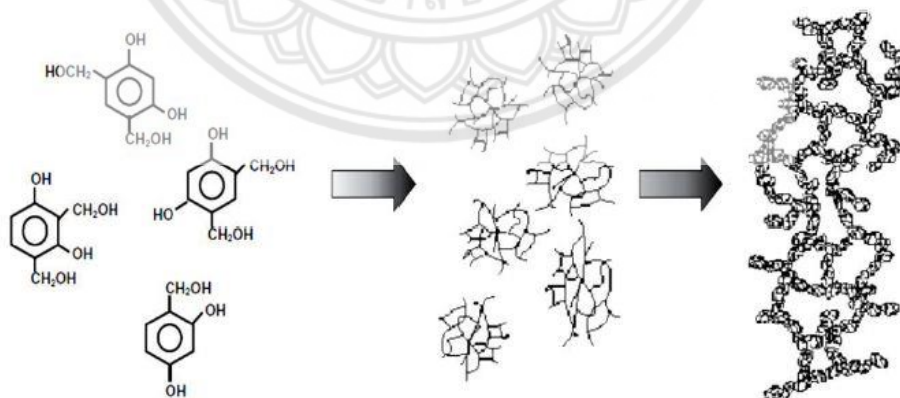


2. Condensation Reaction



รูปที่ 2.6 กลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิดเรซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์

ที่มา : กระบวนการเตรียมเรซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล และคาร์บอยเจลด้วยวิธีต่างกัน (วิวัฒน์, 2548)



รูปที่ 2.7 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์

ที่มา : กระบวนการเตรียมเรซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล และคาร์บอยเจลด้วยวิธีต่างกัน (วิวัฒน์, 2548)

หลังจากนั้นทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย อบแห้งและเผาในสภาวะแก๊สเฉื่อยเพื่อให้เกิดการคาร์บอนไอ-เซชันให้เป็นคาร์บอนตามลำดับ สำหรับการอบแห้งมีหลายเทคนิค เช่น อบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าเรซอซินอลแอโรเจล (RF Aerogel) อบแห้งในบรรยากาศลมร้อนปกติ เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าเรซอซินอลซีโรเจล (RF Xerogel) หลังจากนั้นน้ำเจลแห้งไปทำการคาร์บอนไอเซชันเพื่อให้ได้คาร์บอน พบว่าคาร์บอนที่ได้จากเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์นั้น มีพื้นที่ผิวและสภาพความเป็นรูพรุนที่สูง โดยที่ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติดังกล่าวถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1 ถึง 2.3

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล

ปัจจัย	ผลกระทบ
1. ลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น (การลด R / F, R / W, หรืออัตราส่วน R / C)	1. อนุภาคขนาดเล็กและขนาดรูพรุนที่ได้มีขนาดเล็ก เพิ่มพื้นที่ผิวของ Xerogels มีการลดหรือเพิ่มปริมาณของรูพรุน Xerogels ขึ้นอยู่กับค่า pH
2. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	2. ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล ที่ได้มีขนาดเล็ก ผิวเรียบและมีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่กว้างที่ระดับความเข้มข้นสูงเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล ที่ได้มีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่แคบมากและอาจลดเวลาในการเกิดเจล
3. ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง	3. ที่ระดับความเข้มข้นสูง เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์สูง (อนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันด้วยคอลลอยด์ขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสูง จุดแข็งทางกลสูง) ลดเวลาในการเกิดเจลที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (อนุภาคขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยคอแคบ พื้นที่ผิวต่ำ จุดแข็งทางกลต่ำ)
4. pH เจลที่เพิ่มขึ้น	4. เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของคาร์บอน Aerogels ไม่มีนัยสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิวของคาร์บอน Xerogels เพิ่มปริมาณรูพรุนของคาร์บอน Xerogels ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้น
5. การบ่มเจล	5. ช่วยให้มีเวลาในการเกิดโครงร่างตาข่ายของเจลมากขึ้น

ที่มา : กระบวนการเตรียมเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล (ธนชัย, 2548)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของเรซอินอล

ปัจจัย	ผลกระทบ
1. ตัวทำละลายแลกเปลี่ยน	1. จำเป็นสำหรับการอบแห้งในระบบ Supercritical CO ₂ หรือแช่แข็งอบแห้งช่วยให้การระเหยแห้งเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นการลดลงของความตึงเครียดบนพื้นผิวการระเหยในระบบ Subcritical
2. การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	2. เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Xerogels ซึ่งมีการหดตัวของ รูพรุนส่งผลให้รูพรุนเล็กลงและปริมาณรูพรุนลดลง แต่ความแข็งแรงทางกลของเจลแห้งจะเพิ่มขึ้น
3. การอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂	3. เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Aerogels เจลที่ได้ไม่มีนัยสำคัญของการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวสูง ปริมาตรรูพรุนมาก
4. การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	4. เช่นเดียวกับการอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂ แต่ด้วยความดันที่ลดลงจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนอะซิโตนเป็นสภาพวิกฤตอาจทำให้เจลแห้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนบางส่วน
5. การอบแห้งแบบแช่แข็ง	5. เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Cryogels การระเหิดของตัวทำละลายแช่แข็งพบว่ารูพรุนที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเมโซพอร์ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะต้องคงที่ด้วยการแช่แข็ง

ที่มา : กระบวนการเตรียมเรซอินอลพอร์มาลดีไฮด์เจล (ธนชัย, 2548)

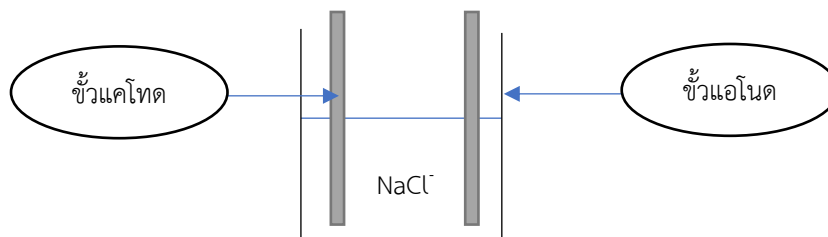
ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของการไฟโรไลซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก เรซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล

ปัจจัย	ผลกระทบ
1. เพิ่มอุณหภูมิไฟโรไลซิส	1.1. ลดปริมาณออกซิเจน 1.2. ลดพื้นที่ผิวของคาร์บอน Aerogels และ Xerogels 1.3. ลดปริมาณรูพรุนของคาร์บอน Aerogels และ Xerogels 1.4. เพิ่มการกระจายขนาดของ Macrospore 1.5. เพิ่มการกระจายขนาดของ Microspore เมื่อใช้อัตราส่วน R / C ที่ต่ำมาก
2. เพิ่มเวลาในการไฟโรไลซิส	2. เพิ่มความกว้างของรูพรุน ปริมาณ และพื้นที่ผิว

ที่มา : กระบวนการเตรียมเรซซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล (ธนชัย, 2548)

2.5 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process หรือ Electro oxidation) เป็นกระบวนการที่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วอิเล็กโทรดทำให้เกิดการถ่ายโอนกระแสอิเล็กตรอน (Electron current) จำนวนมากไปยังน้ำ โดยระบบจะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองอันคือ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนเข้าสู่ระบบซึ่งขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจุ่มลงในน้ำดังรูปที่ 2.8 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบจะทำให้เกิดการไหลเทของกระแสอิเล็กตรอนจำนวนมากจะทำให้น้ำที่อยู่ใกล้เคียงกับขั้วอิเล็กโทรดแตกตัวเกิดเป็นอนุมูลที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง เช่น อนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) หรือ อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^\bullet) อนุมูลเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ หรือสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลสารมลพิษเป็นโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ในท้ายที่สุดจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตราย ตัวอย่างการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.8 และปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องแสดงดังสมการที่ 2.8-2.14

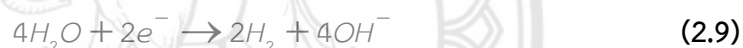


รูปที่ 2.8 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ใช้คาร์บอนเป็นขั้วแคโทดและใช้คาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วแอโนด โดยมี NaCl เป็นสารอิเล็กโทรไลต์

ปฏิกิริยาของกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Guenfoud, 2014) โดยทั่วไป มีดังนี้

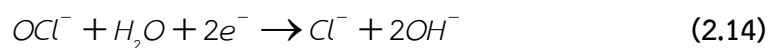
ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาในสารละลาย



ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด



2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมดั่งแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ปัจจัย	ผลกระทบ
1. การเคลื่อนที่ของประจุไอออน	1. ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้า
2. อุณหภูมิของสารละลาย	2. ความสามารถในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในสารละลาย
3. พื้นที่สัมผัสของขั้วไฟฟ้า	3. ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดี สำหรับการถ่ายและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า
4. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า	4. ซึ่งจำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างมากกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น

ที่มา : การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ดวงตา, 2546)

2.5.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ใช้อุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก และง่ายต่อการเดินระบบ เพราะควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าจึงต้องการการดูแลรักษาน้อย	1. จำเป็นต้องเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าใหม่อยู่เสมอ

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไฟฟ้าเคมี(ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
2. สามารถบำบัดน้ำได้สะอาดเป็นที่น่าพอใจ ปราศจากทั้งกลิ่นและสี	2. บางพื้นที่ค่าไฟฟ้า ค่อนข้างสูงมาก
3. ตะกอนที่เกิดขึ้น มีความเสถียรและรีดน้ำ ออกได้ง่าย	3. การรับอิเล็กตรอนจนกลายเป็นฟิล์มเกาะที่ขั้ว แคโทด ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง
4. ตะกอนลอยตัวมีขนาดใหญ่และมีพันธะ ร่วมกับน้ำน้อยจึงสามารถแยกออกด้วยการ กรองได้อย่างรวดเร็ว	4. ต้องการน้ำเสียที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง
5. น้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีของแข็งละลาย น้ำทั้งหมด (Total dissolved solids) น้อย มากเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้สารเคมี ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการนำน้ำเสียที่ได้รับการ บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง	
6. สามารถลดอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กได้ ดี โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนที่ทำหน้าที่ เป็นสารสร้างตะกอน	
7. ไม่มีการใช้สารเคมี และตะกอนที่เกิดขึ้น น้อยมาก	
8. สามารถใช้อย่างสะดวกในทุกพื้นที่ที่มี ไฟฟ้า	

ที่มา : Comparison of classical chemical (Avsar, 2007)

2.5.3 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบซึ่งพบว่าในน้ำเสียมีปริมาณสารคอลลอยด์มาก ทำให้น้ำมันแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ ยากต่อการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสีย การนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัด อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะแตกตัวให้โลหะออกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ทำให้เกิดตะกอนเบาขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน การสลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด (Chen, 2014)

การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด จะขึ้นอยู่กับความว่องไวของสารอินทรีย์กับตัวทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (Gotsi, 2005)

การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยไฟฟ้าเคมี มีหลักการดังนี้คือ เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของไอออนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นจะรวมตัวกับตะกอนเบาเพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดของเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ (วัฒนชัย, 2547)

การกำจัดสีของน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี จะเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสีโดยอาศัยการถ่ายเทของอิเล็กตรอนในระบบ เรียกว่า เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้น (ดุษฎีพรรณ, 2538)

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีหลักการทำงานที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser-lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ (ทศวิภา, 2555)

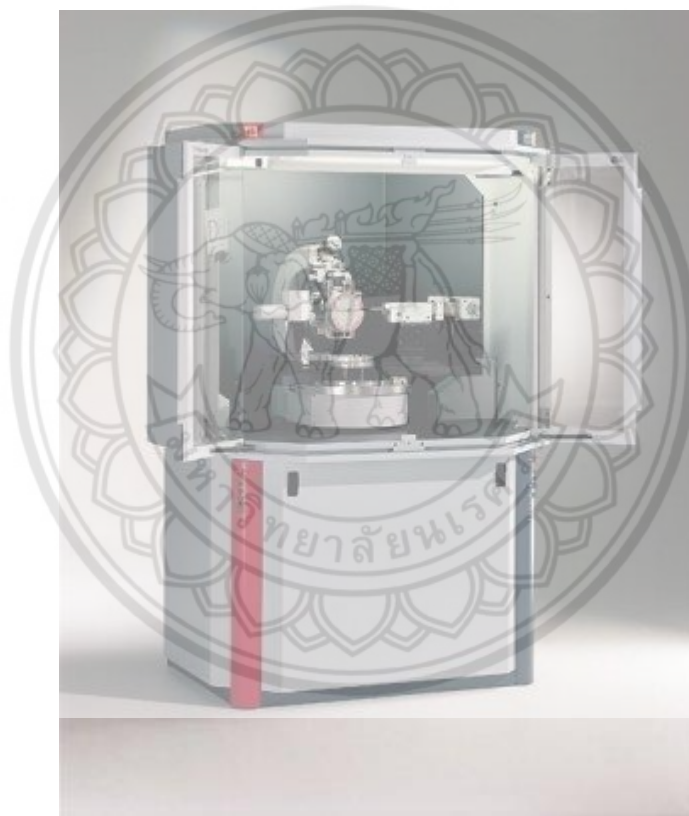


รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : https://www.jeol.co.jp/en/products/list_sem.html

2.6.2 X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) เรียกสั้นๆ ว่าเทคนิค XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มิต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นได้ (ก้องภพ, 2558)



รูปที่ 2.10 เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

ที่มา : https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html

2.6.3 UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)



รูปที่ 2.11 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ที่มา : <http://www.oasisscientific.com/t80-uvvis-spectrophotometer.html>

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนชัย ชัยจิตรสกุล (2548) ได้ศึกษากระบวนการเตรียมเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์เจลและคาร์บอนเจลด้วยวิธีต่างกันคือ ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคทไอออนิก (RF-CS) และไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว โดย RF-NS Carbon มีสมบัติความเป็นรูพรุนดีที่สุดในปริมาณรูพรุนระดับเมโซ 0.81 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 550 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และค่าสูงสุดการกระจายตัวของรูพรุนระดับเมโซเป็น 7.2 นาโนเมตร จากนั้น นำเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์เจลและ RF Carbon Gels ที่เตรียมได้ไปใช้ตรึงเอนไซม์แอลคาไลน์โปรติเอสและเอนไซม์ไลเปส ด้วยวิธีการตรึงที่แตกต่างกันคือ การตรึงด้วยวิธีดูดซับทางกายภาพและวิธีห่อหุ้มในโพรงเจล จากผลการวิจัยพบว่าการตรึงด้วยวิธีห่อหุ้มในโพรงเจลของ RF-NS Gel สามารถตรึงเอนไซม์แอลคาไลน์โปรติเอส และเอนไซม์ไลเปสได้สูงที่สุดเป็น 86.30 % และ 84.36 % ของปริมาณเอนไซม์เริ่มต้น ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่ากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์พบว่าเอนไซม์แอลคาไลน์โปรติเอสที่ตรึงบน RF-CS Carbon มีกิจกรรมจำเพาะสูง (Specific activity) ที่สุดเป็น 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 เปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระที่มีกิจกรรมจำเพาะเป็น 9.69 units/ml-mg protein เอนไซม์ที่ตรึงใน RF-NS Gel และ RF-NS Carbon Gel มีเสถียรภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าเอนไซม์อิสระ โดยภายหลังการเร่งปฏิกิริยา 5 รอบ เอนไซม์แอลคาไลน์โปรติเอสที่ตรึงใน RF-NS Gel คงกิจกรรมไว้ได้สูงที่สุดเป็น 64.89 % ขณะที่เอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบน RF-NS Carbon คงกิจกรรมไว้ได้สูงที่สุดเป็น 62.23 % และภายหลังการเก็บรักษาเอนไซม์ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าทั้งเอนไซม์แอลคาไลน์โปรติเอสและเอนไซม์ไลเปสที่ตรึงบน RF-NS Carbon สามารถรักษากิจกรรมไว้ได้สูงที่สุด โดยสามารถรักษากิจกรรมภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ได้มากกว่า 94 %

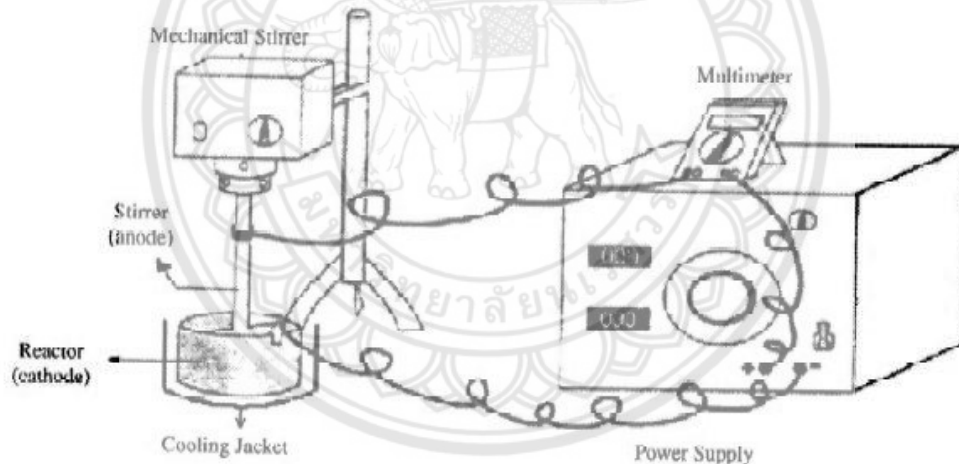
ยรรยง วารินิล (2547) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเป็นรูพรุนของเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจลที่ผ่านขั้นตอนการทำให้แห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งเตรียมโดยใช้คลื่นเหนือเสียง คาร์บอนเจลที่มีรูพรุนแบบเมโซ (Mesoporous carbon gel) โดยปรกติแล้วได้จากการเผาให้เป็นคาร์บอน (Carbonization) ของเรซอซินอลฟออร์มัลดีไฮด์เจล หรือ RF gel ซึ่งสังเคราะห์ได้จากกระบวนการโซลเจล โพลีคอนเดนเซชัน (Sol-gel Polycondensation) ของเรซอซินอลกับฟออร์มัลดีไฮด์ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนและตามด้วยการอบแห้งด้วยสภาวะเหนือวิกฤตหรือการอบแห้งแบบระเหิดแห้ง โดยในขั้นตอนของการอบแห้งผู้ทำวิจัยได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งพบว่าเมื่อใช้

คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้ง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างหรือค่า C/W ต้องมีค่าน้อยกว่า 40 โมลต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อรักษารูพรุนแบบเมโซไว้ แต่เมื่อค่า C/W มาก (C/W มากกว่า 40 โมลต่อลูกบาศก์เมตร) คาร์บอนเจลจะมีรูพรุนแบบเมโซน้อยมาก ในงานวิจัยนี้คาร์บอนเจลที่มีรูพรุนแบบเมโซถูกเตรียมขึ้น โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนเชิงโมลของเรซอซินอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างหรือค่า R/C ในสารละลายเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ และการใช้คลื่นเหนือเสียงระหว่างขั้นตอนโซลเจลโพลีคอนเดนเซชัน แล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) พบว่าภายใต้สภาวะการเตรียมที่มีค่า C/W สูง (C/W เท่ากับ 80 โมลต่อลูกบาศก์เมตร) การใช้คลื่นเหนือเสียงและการเพิ่มค่า R/C ในสารละลายเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ในช่วง 100 ถึง 200 โมลต่อโมล ทำให้คาร์บอนเจลที่ได้จากการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถรักษารูพรุนแบบเมโซไว้ได้หลังการเผาให้เป็นคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้คลื่นไมโครเวฟในขั้นตอนการอบแห้ง คาร์บอนที่มีสัณฐานของช่องว่างแบบแมโครระหว่างอนุภาคคาร์บอนที่เชื่อมทะลุถึงกันทั่วทั้งเนื้อวัสดุได้

วินัย นุตมากุล (2546) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) โดยทำการศึกษาปัจจัยของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ pH 4 5 6 7 และ 8 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 1.0 และ 1.5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 40 และ 60 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 60 และ 90 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดค่าสี ซีโอดี (COD) และของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดน้ำเสียคือ pH 5 ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 90 นาที สามารถลดค่า สี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้สูงถึง ร้อยละ 92.47 45.90 และ 81.51 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4.28 หน่วยต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณกรดกำมะถันเข้มข้นในการปรับค่าพีเอช 2.3 ลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ในกรณีเพียงพอต่อการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เพื่อให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ไม่เกิน 220 ADMI (U.S. Federal regulation) สภาวะที่เหมาะสมคือ เมื่อน้ำเสียมีค่า pH 5 ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาทีและระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที โดยสามารถลดค่า สี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอยได้สูงถึง ร้อยละ 87.98 (ลดสีจาก 1623 ADMI เหลือ 196 ADMI) 37.29 และ 49.30 ตามลำดับ ทำให้ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อยลง จาก 4.28 หน่วยต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร เหลือ 2.85

หน่วยต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณกรดกำมะถันเข้มข้นในการปรับค่า pH 2.3 ลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

Un และคณะ (2006) ศึกษาการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอก โดยใช้ระบบการทดลองเป็นแบบทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.12 สูง 10 เซนติเมตร ภายในมีความกว้าง 10 เซนติเมตร ซึ่งใช้เหล็กเป็นถึงปฏิกิริยาหรือขั้วแคโทด และใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนด ปริมาณน้ำตัวอย่างในระบบ 300 มิลลิลิตรพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันไขมัน และค่า COD คือ 99% และ 70% ตามลำดับ ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 20-75 mA/m² ปริมาณความเข้มข้นของ H₂O₂ และ Poly Aluminum Chloride (PAC) ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ 2.3% H₂O₂ 0.5 กรัมต่อลิตร PAC ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ H₂O₂ ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD จะเพิ่มขึ้นจาก 56% 64% และ 72% ที่ 0 1.2% และ 2.3% H₂O₂ ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ระบบการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกแบบทรงกระบอก (Cylindrical system) ที่มา : Electrocoagulation of olive mill wastewaters (2006)

สำหรับต้นทุนของพลังงานในการเดินระบบพบว่า ต้นทุนของพลังงานของระบบบำบัดแบบแอโรบิกและแบบแอนแอโรบิกรวมกันน้อยกว่าระบบบำบัดโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าคือ 22.74-28.42 บาทต่อกิโลกรัมของ COD ที่ถูกกำจัด ซึ่งสถานะที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ จะต้องมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสม มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง (Total investment) และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและบำรุงรักษา (Operational cost) ต่ำ

Liang และคณะ (2009) ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาอะโนไดซ์เมื่อใช้แผ่นฟอยด์ไทเทเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและใช้แพลตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองวางห่างกัน 2 เซนติเมตรและจุ่มอยู่ในสารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.5 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยบรรจุภายใน Chamber เมื่อเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฟอยด์ไทเทเนียม-หลังจากนั้นจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 300 500 และ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวไปศึกษาอัตราการย่อยสลายสารประกอบ 2,3-ไดคลอโรฟีนอลภายใต้แสง พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความยาว ความหนาของผนัง และลักษณะความเป็นผลึกของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Mor และคณะ (2006) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในลักษณะที่เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยการ Deposit ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมและเกิดเป็นท่อนาโนที่แสงผ่านได้ (Transparent) เมื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้สภาวะความเป็นกรด-ด่าง และค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับการทำอะโนไดซ์ต่างกัน จะทำให้ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดของรูพรุนต่างกัน จากนั้นนำฟิล์มโปร่งแสงประยุกต์ใช้สำหรับเป็นตัวเคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการสะท้อน (Anti-reflection coatings) เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงและใช้เป็นตัวตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มและลักษณะของงานที่ใช้

Tai-Cheng An และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้กระบวนการ Photoelectrochemical 3D ในเครื่องปฏิกรณ์อิเล็กโทรออกไซด์ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) โดยให้กระแสไฟฟ้า 30 โวลต์ pH 6.6 ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30 °C พบว่าเมทิลีนบลูสามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกระบวนการ Photoelectrochemical มากกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือกระบวนการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมีเพียงอย่างเดียว และกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการสลายสีย้อม ที่กระแสไฟฟ้า 30 โวลต์ จะให้ประสิทธิภาพของการสลายสีย้อมทำให้ค่า COD มีค่าลดลง 87% และ TOC (Total organic carbon) ลดลง 81% และเมื่อเทียบกับการสลายสีย้อมแบบเดิมสามารถทำได้ไวกว่าคือ ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมสูงถึง 96%

ดวงตา กิจแก้ว (2546) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟ โดยทำการทดลองที่สภาวะต่างๆ กันคือ ระดับพีเอชของน้ำเสียก่อนบำบัด 4 5 6 7 และ 8 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.5 1.0 และ 1.5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 40 และ 60 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 60 และ 90 นาที พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการตกตะกอนให้สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดค่า สี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่สภาวะเหมาะสมคือ เมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอช 5 ใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.5 แอมแปร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 90 นาที สามารถลดค่า สี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอยได้สูงถึง ร้อยละ 92.47 45.90 และ 81.51 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 4.28 หน่วยต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร และใช้ปริมาณกรดกำมะถันเข้มข้นในการปรับค่าพีเอช 2.3 ลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

วรรชวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 จะเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (CI Reactive Red 180) ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะปรับเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่าคือ 10 โวลต์ 20 โวลต์ และ 30 โวลต์ ปรับเปลี่ยนค่าเวลากักเก็บตั้งแต่ 0.5-3 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า 7 ค่าคือ 0.5×6.5 3×6.5 4×6.5 5×6.5 6.5×6.5 8×6.5 และ 11×6.5 ตารางเซนติเมตร ค่า pH 4 ค่าคือ pH 3 pH ปกติ pH 7 และ pH 10 และปรับค่าความนำไฟฟ้าให้เท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อมย้อม เป็น 7.2 มิลลิวินาที/เซนติเมตร กับ 72 มิลลิวินาที/เซนติเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ขั้วเหล็กขนาด 3×6.5 cm ขึ้นไป ใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง ถ้าไม่ทำการปรับค่าความนำไฟฟ้า แต่ถ้ามีการปรับค่าความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 มิลลิวินาที/เซนติเมตร จะใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และเวลาที่ใช้จะเหลือเพียง 30 นาที และการทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมีที่ไม่ผ่านและหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าการใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย โดยสามารถกำจัดสีได้สูงมากถึงร้อยละ 96 ขึ้นไป ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดียังไม่สูงมากนักคือร้อยละ 55 จึงยืนยันได้ว่าการกำจัดสีไม่ได้เกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมเพียงอย่างเดียว แต่สีมีการ

เปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อมโดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน พีเอชของน้ำหลังการทดลองมีค่าสูงมากขึ้นเท่ากับ 9 อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นถึง 38 องศาเซลเซียสเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองที่ 3 คือ การศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจริงจากโรงฟอกย้อมโดยใช้น้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัดและน้ำเสียจากหม้อย้อมซึ่งมีความเข้มข้นสี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แต่มีการเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ทดลองและค่าความต่างศักย์เป็น 2 นาที่ และ 6.4 โวลต์ สำหรับน้ำเสียรวม เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นน้อยลงและค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และสำหรับน้ำเสียจากหม้อย้อมจะใช้เวลาเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง เพราะความเข้มข้นสูงขึ้นและความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นมากซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์โดยค่าไฟฟ้าเท่ากับ 31.95 บาทต่อลูกบาศก์เมตร จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมากถึงร้อยละ 85 และ 98 ขึ้นไป

Marco Panizza และคณะ (2007) ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมีทางตรง และทางอ้อมของสารละลายสังเคราะห์เมทิลีนบลู โดยให้ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้นเท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิตร โดยใช้ไทเทเนียมกับรูเทเนียมออกไซด์เป็นขั้วแอโนด และใช้สแตนเลส AISI 304 เป็นขั้วแคโทด ช่องว่างระหว่างขั้ว 2 ขั้วห่างกัน 1 เซนติเมตร และใช้ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์ เพื่อผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่า COD ในสารละลายเมทิลีนบลู ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในการกำจัด COD และทำให้สีตกตะกอนสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน การอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ทางอ้อมพบว่าเกิดออกซิเดชันของเมทิลีนสีน้ำเงินเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่มีคลอไรด์ไอออนที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย Redox และปฏิกิริยาได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของคลอไรด์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ในขณะที่การอิเล็กโทรไลซิสโดยตรงปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซีออกไซด์และได้รับผลจากอัตราการไหลสูง หมายความว่า การเกิดออกซิเดชันเป็นกระบวนการควบคุมการแพร่กระจาย จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า การสลายและการลดสีของสารละลายทำได้เร็วขึ้นด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลซิส

บทที่ 3

วิธีการดำเนินโครงการงาน

ในการดำเนินโครงการงานมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 เรซอร์ซินอล (Resorcinol)	ความเข้มข้น	99%
3.1.2 ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ความเข้มข้น	38%
3.1.3 TTIP (Titanium Tetraisopropoxide)	ความเข้มข้น	97%
3.1.4 น้ำกลั่น		
3.1.5 เอทานอล (Ethanol)	ความเข้มข้น	95.5%
3.1.6 กรดไนตริก (Nitric Acid)	ความเข้มข้น	65.5%
3.1.7 สารสีย้อมเมทิลีนบลู		
3.1.8 โซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3)	ความเข้มข้น	0.1 โมลต่อลิตร
3.1.9 โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)	ความเข้มข้น	0.15 โมลต่อลิตร

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 ตู้อบ (Oven)	ยี่ห้อ Brinder-redline กำลัง 0.8 กิโลวัตต์
3.2.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)	ยี่ห้อ Carbolite
3.2.3 ปีกเกอร์ (Beaker)	ขนาด 50 100 500 มิลลิลิตร
3.2.4 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)	
3.2.5 เครื่องวิเคราะห์ SEM	
3.2.6 เครื่องวิเคราะห์ XRD	
3.2.7 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer	ยี่ห้อ Thermo scientific
3.2.8 แหล่งจ่ายไฟ (DC power supply)	ยี่ห้อ Glentest

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะถูกนำมาวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่

3.3.1 การศึกษาสัณฐานไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน

3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีส่วนผสมของคาร์บอน

3.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมโดยใช้เทคนิคโซลเจล มีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เตรียมสาร TTIP (Tetraisopropoxide) 8 มิลลิลิตร Ethanol 1.16 มิลลิลิตร และน้ำ 40.366 มิลลิลิตร ผสมเข้าด้วยกันในบีกเกอร์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พร้อมทำการกวนสารละลายให้เข้ากัน

3.4.2 หลังจากนั้นทำการหยด HNO_3 (Nitric Acid 70 %) 0.4485 มิลลิลิตร พร้อมกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.4.3 จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารละลายทำการบ่มไทเทเนียมไดออกไซด์โซลเจลเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.4 ทำการ Reflux ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.4.5 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

3.4.6 เผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5 การสังเคราะห์เรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล (RF gel)

แบ่งการทดลองเป็น 3 การทดลอง

1. RF gel มีลักษณะเป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ เมื่อผ่านกระบวนการ Pyrolysis
2. RF gel ผสมกับ TiO_2 gel โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับสารละลายเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลในอัตราส่วนที่ต่างกัน
3. RF gel เคลือบ TiO_2 gel โดยไทเทเนียมไดออกไซด์จะเคลือบเป็นชั้นฟิล์มบางบนผิวของคาร์บอน

3.5.1 การสังเคราะห์เรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล (RF-Gel)

จะเตรียมจากการสังเคราะห์โดยกระบวนการการเกิดปฏิกิริยารวมตัวของสารละลายพอลิเมอร์ (Sol-Gel Polycondensation) ของเรซอินอล (R) ฟอร์มาลดีไฮด์ (F) น้ำกลั่น (W) และตัวเร่งปฏิกิริยา (C) มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

- 3.5.1.1 เตรียมอัตราส่วนโดยมวล R/F เท่ากับ 0.5
- 3.5.1.2. เตรียมอัตราส่วนโดยมวล R/W เท่ากับ 0.18
- 3.5.1.3 เตรียมอัตราส่วนโดยมวล R/C เท่ากับ 866
- 3.5.1.4 ใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.5.1.5 นำสารละลายที่เตรียมไว้มาผสมกันและกวนสารละลายให้เข้ากัน
- 3.5.1.6 ทำการบ่มเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล (RF-Gel) เป็นเวลา 3 วัน
- 3.5.1.7 หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศ

ไนโตรเจน

3.5.2 การสังเคราะห์คาร์บอนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (RF gel+ TiO_2)

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนโดยใช้เทคนิคโซลเจลมีขั้นตอนดังนี้

- 3.5.2.1 นำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในหัวข้อ 3.4 มาผสมกับเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2:1 2:0.5 และ 2:0.25 ตามลำดับ
- 3.5.2.2 เริ่มผสมกับเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล ที่เวลา 0 3 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.5.2.3 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน ในภาชนะที่ต้องการใช้เป็นรูปแบบของขั้วในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจนสารละลายที่ได้กลายเป็นของแข็ง

3.5.2.4 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.5.2.5 หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศไนโตรเจน

3.5.3. สังเคราะห์คาร์บอนเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

3.5.3.1 นำ RF gel จากข้อ 3.5.1 มาทำการจุ่มลงในสารละลาย TiO_2 เป็นเวลา 1 วัน

3.5.3.2 จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็น 2 ชั่วโมงในบรรยากาศไนโตรเจน

3.6 การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

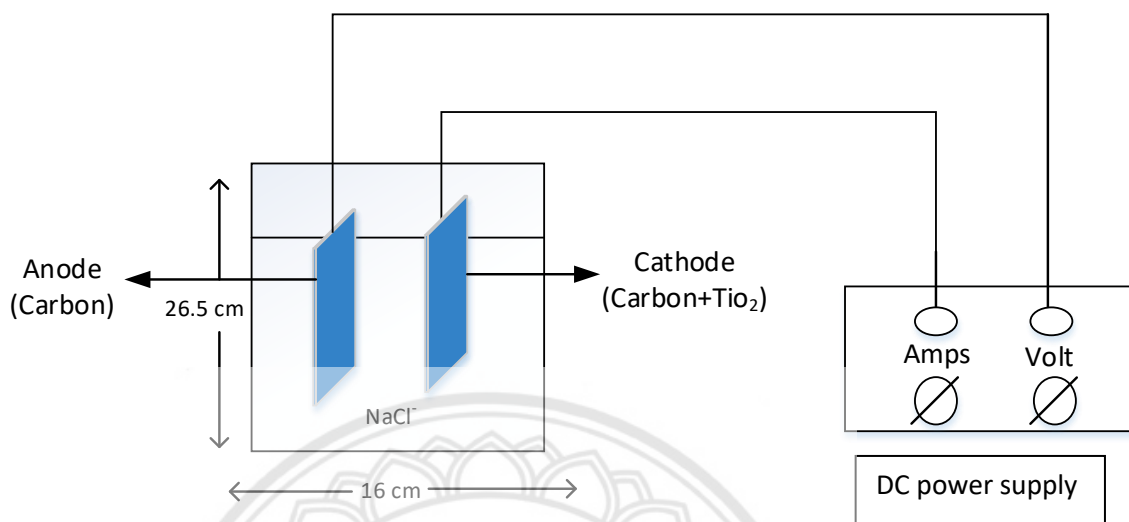
3.6.1 การทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนที่ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้น 10 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่า pH เป็น 4 6 และ 10 โดยใช้ 0.1 โมลต่อลิตร H_2SO_4 และ 0.1 โมลต่อลิตร NaOH และให้ความหนาแน่นกระแสที่ผ่านขั้วเท่ากับ 20 40 และ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยให้ช่องว่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 6 และ 10 เซนติเมตร และใช้ Na_2SO_4 ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตรเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของน้ำสีย้อมด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ค่าความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร เพื่อดูค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่หายไป การทดลองทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นแผนภาพการทดลองได้ดังแสดงในหัวข้อ 3.7

3.7 แผนภาพการทดลอง

แผนภาพการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1

3.8 Experimental setup



รูปที่ 3.2 ระบบการย่อยสลายสี้อมด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

3.8.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.8.1.1 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ Na_2SO_4 0.1 โมลต่อลิตร

3.8.1.2 เติมสารละลายเมทิลีนบลูลงใน Reactor ขนาด $16 \times 26 \times 56$ เซนติเมตร

3.8.1.3 ปรับ pH เป็น 4 6 10 ตามการทดลอง โดยจะใช้ NaOH 0.1 โมลต่อลิตร และ H_2SO_4 0.1 โมลต่อลิตรเป็นตัวปรับ pH

3.8.1.4 นำขั้วไฟฟ้าต่อกับขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมไว้ และต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ โดยขั้วมีขนาด $2.5 \times 7 \times 0.5$ เซนติเมตร ปรับระยะห่างของขั้วเป็น 2 6 และ 10 เซนติเมตร จากนั้นจุ่มขั้วลงในถังระบบการย่อยสลายสี้อมเมทิลีนบลู

3.8.1.5 ปิดเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าและโวลต์ให้มีความหนาแน่นกระแสเป็น 20 40 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความหนาแน่นกระแสจากขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 เพื่อให้ได้ความหนาแน่นกระแสตามที่กำหนดไว้ เมื่อได้ความหนาแน่นกระแสแล้ว จากนั้นเริ่มจับเวลาทุกๆ 30 นาที บันทึกค่าเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

3.8.1.6 ใช้เครื่องดูดจ่ายสารละลายดึงสารละลาย 6 ml เพื่อทำการทดสอบ โดยจะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS ที่ความยาวคลื่น 450-800 นาโนเมตร (Scan mode) เก็บสารตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเป็นเวลา 10 ชั่วโมง



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาปัจจัยของการสังเคราะห์ซัลไฟด์อิเล็กโทรดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาก่อนการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0 3 และ 5 ชั่วโมง จากนั้นบ่มเจลเป็นเวลา 3 วัน อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล (RF) ต่อ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และส่วนที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยใช้ซัลไฟด์อิเล็กโทรดที่ดีที่สุดในส่วนแรกมาทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ pH เท่ากับ 4 6 และ 10 ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 6 และ 10 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแส 20 40 และ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลีนบลู 10 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตัวแปรควบคุมในงานวิจัยนี้คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซัลไฟด์อิเล็กโทรด 750 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเผา 2 ชั่วโมง สารอิเล็กโทรไลต์ชนิดโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ระยะเวลาในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 ชั่วโมง

4.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์ซัลไฟด์อิเล็กโทรดที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

4.1.1 อัตราส่วนของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์

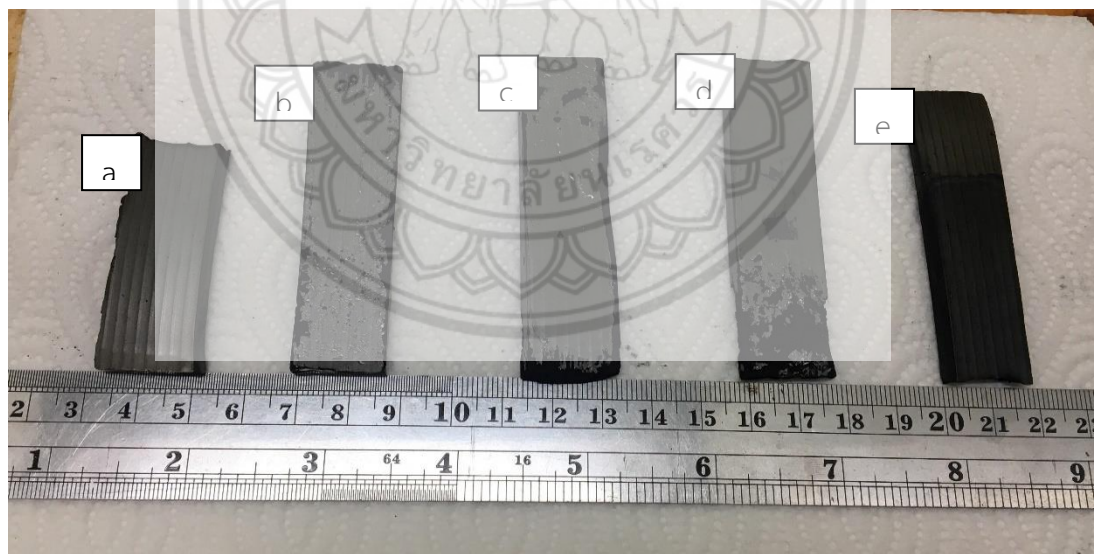
การสังเคราะห์ซัลไฟด์อิเล็กโทรดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูใช้อัตราส่วนโดยปริมาตร RF : TiO_2 ได้แก่ 2:1 1:1 1:2 RF บริสุทธิ์ และ RF ที่เคลือบด้วย TiO_2

ผลการสังเคราะห์พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นซัลไฟด์อิเล็กโทรดได้ แสดงในรูปที่ 4.1 โดยหลังจากบ่มและขึ้นรูปเป็นระยะเวลา 3 วัน โมลที่ได้มีลักษณะกร่อนทำให้เกิดการแตก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่า RF ทำให้โครงสร้างของคาร์บอนไม่ยึดติดกัน เป็นผลทำให้โมลที่ได้มีการแตกหัก (Cracking) จึงไม่สามารถใช้อัตราส่วนนี้มาสังเคราะห์เป็นซัลไฟด์อิเล็กโทรดได้ เนื่องจาก RF: TiO_2 ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ไม่สามารถขึ้นรูปได้จึงได้

ทำการเปลี่ยนอัตราส่วน RF : TiO_2 เป็น 2:1 2:0.5 2:0.25 RF บริสุทธิ์ และ RF เคลือบ TiO_2 ซึ่งพบว่าหลังทำการบ่มขึ้นรูปเป็นระยะเวลา 3 วันสามารถขึ้นรูปเป็นซีวีเล็กโทรดได้ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะของซีวีเล็กโทรดที่อัตราส่วนต่างๆ RF: TiO_2 a) 1:1 และ b) 1:2



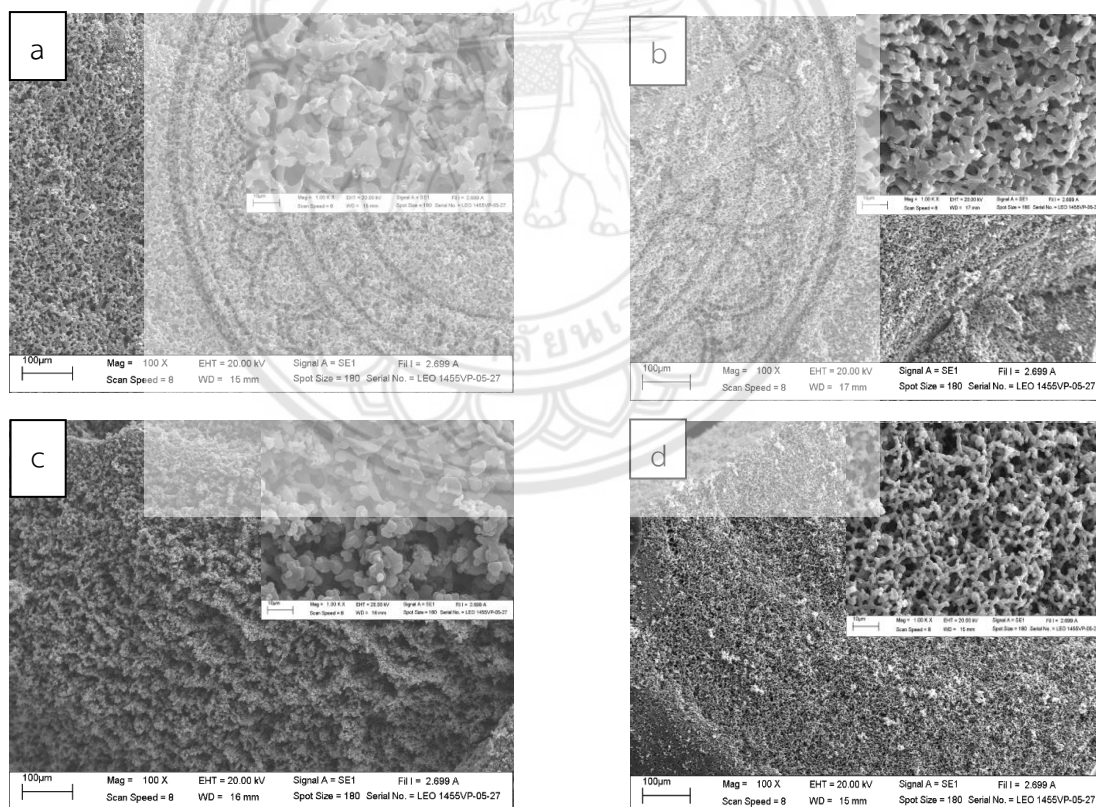
รูปที่ 4.2 แสดงซีวีเล็กโทรด 2:0.25 2:0.5 2:1 และ RF เคลือบ TiO_2

(a) RF บริสุทธิ์ (b) RF: TiO_2 2: 0.25 (c) RF: TiO_2 2:0.5 (d) RF: TiO_2 2:1

(e) RF เคลือบ TiO_2

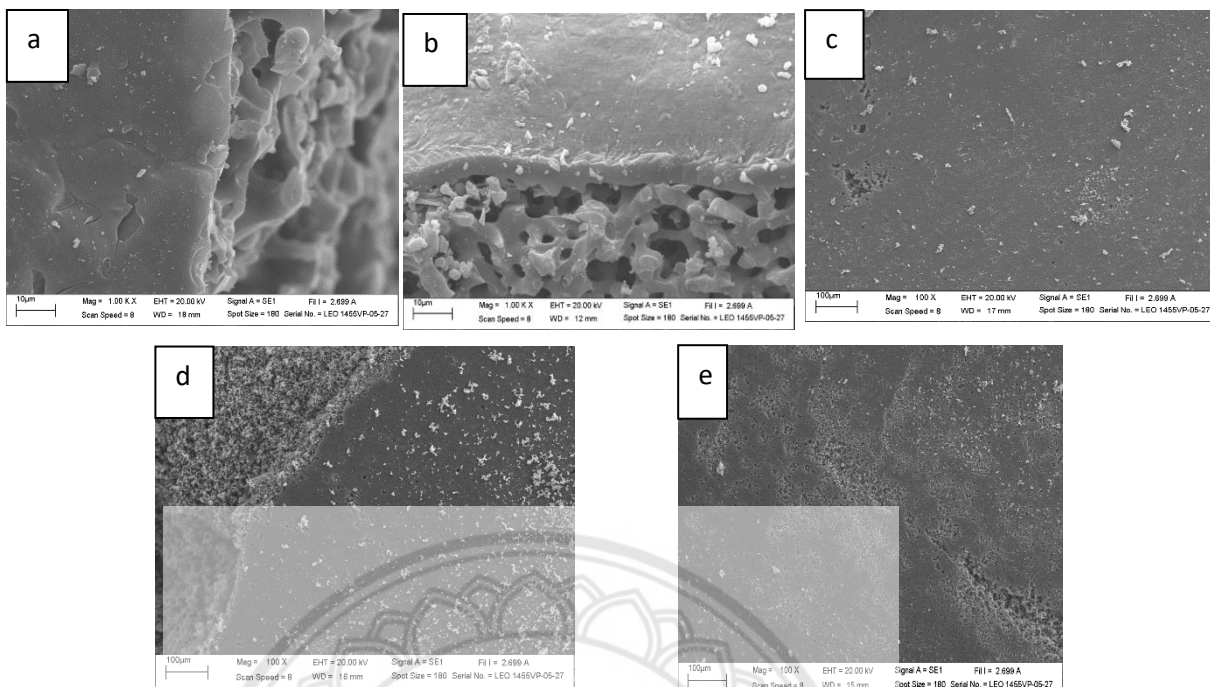
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าข้อผิดพลาด RF บริสุทธิ์ พื้นผิวของข้อผิดพลาดที่สัมผัสกับโมล จะมีพื้นผิวที่เรียบไม่กร่อนเมื่อทำการแกะข้อผิดพลาดออกจากโมล ดังรูปที่ 4.2 a แต่เมื่อผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน RF:TiO₂ 2:0.25 2:0.5 2:1 พบว่าผิวข้อผิดพลาดที่สัมผัสกับโมล จะมีการกร่อนออกเมื่อทำการแกะข้อผิดพลาดออกจากโมล ดังรูปที่ 4.2 b c และ d ตามลำดับ

จากการศึกษาลักษณะรูปร่างของข้อผิดพลาดไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนทั้ง 4 อัตราส่วน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยกำหนดให้ข้อผิดพลาดไทเทเนียม-ไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ RF ต่อ TiO₂ เท่ากับ 2:0.25 2:0.5 2:1 RF บริสุทธิ์ และ RF เคลือบ TiO₂ เป็น RFT0.25 RFT0.5 RFT1 RF บริสุทธิ์ และ RF เคลือบ TiO₂ ตามลำดับ ลักษณะของข้อผิดพลาดที่อัตราส่วนของของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลดต่อไทเทเนียม-ไดออกไซด์เจลดที่ต่างกันแสดงในรูปที่ 4.3

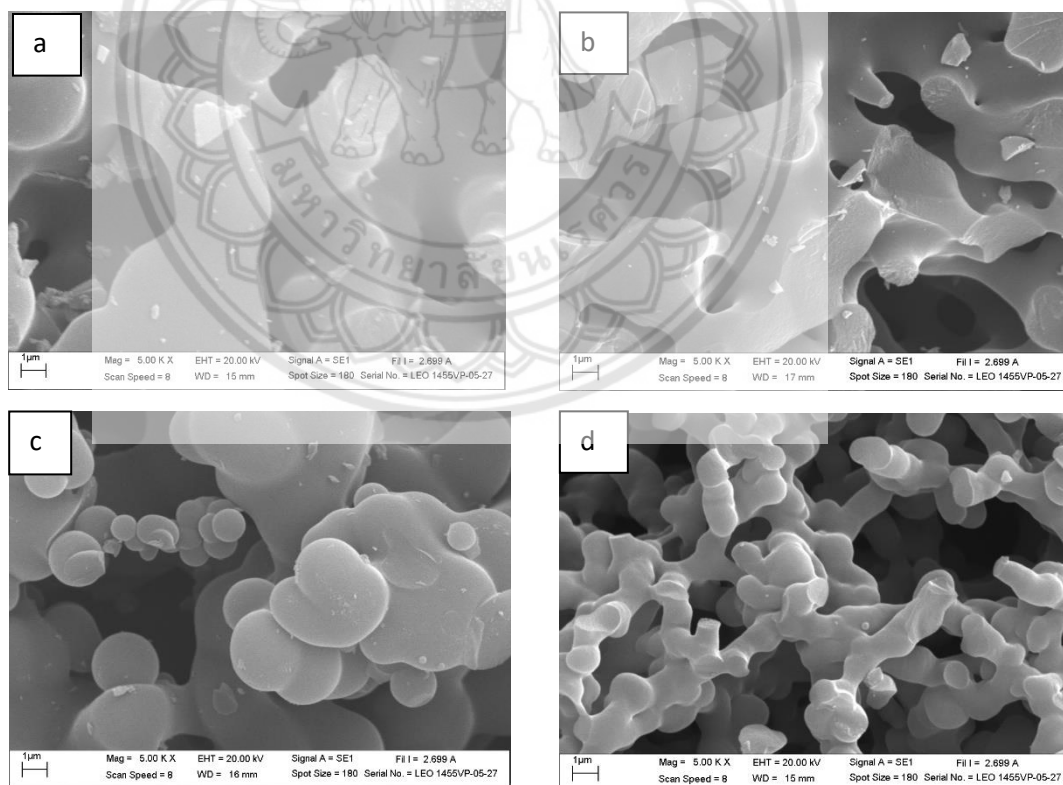


รูปที่ 4.3 ลักษณะรูปร่างของข้อผิดพลาดที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 1000 เท่า (รูปเล็ก) (a) RF (b) RFT0.25 (c) RF: RFT0.5 (d) RF: RFT1

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนของ RF ต่อ TiO_2 ที่ต่างกันจะมีลักษณะทางกายภาพโดยรวมที่คล้ายกัน กล่าวคือ มีโครงสร้างที่เป็นโครงข่ายแบบต่อเนื่อง (Continuous network) กระจายทั่วทั้งโครงสร้าง สังเกตจากอนุภาคคาร์บอนเกาะกันและเชื่อมทะลุถึงกันทั้งโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับโมลหรือโครงสร้างภายใน แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า RF เคลือบ TiO_2 และ RF แสดงในรูปที่ 4.4 a b ตามลำดับ ที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดจะมีรูพรุนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ โดยคุณสมบัติของขั้วอิเล็กโทรดที่ดีจะต้องมีลักษณะของรูพรุนจำนวนมาก เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลูกับขั้วอิเล็กโทรดซึ่งทำให้โมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลูเกิดการถ่ายเทไปยังผิวของขั้วอิเล็กโทรดได้ ทั้งนี้ลักษณะรูพรุนหรือโครงข่ายส่งผลต่อศักยภาพในการดูดซับอนุมลไฮดรอกซิล (Nidheesh et al., 2018) จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 2:1 รูปที่ 4.3 d จะมีลักษณะความต่อเนื่องของโครงสร้างรูพรุนที่ชัดเจน และมีความต่อเนื่องของรูพรุนมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นผลของการรวมตัวหรือการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 ซึ่งทำปฏิกิริยากับ RF ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของ RF ต่อ TiO_2 ต่างกัน พบว่า TiO_2 เข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของ RF สังเกตจากความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีการคายความร้อนอย่างรุนแรง ลักษณะสีของสารละลายที่เปลี่ยนไปส่งผลทำให้โครงสร้างคาร์บอนที่เกิดจากการรวมตัวของ RF กับ TiO_2 นั้นมีขนาดอนุภาคต่างกันโดย RFT1 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าคาร์บอนที่เกิดจากรีเออกชันของฟอร์มัลดีไฮด์เพียงอย่างเดียว (RF) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ YIN Bo และคณะกล่าวว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 จะส่งผลให้ขนาดอนุภาคคาร์บอนเล็กลงส่งผลต่อขนาดของโครงสร้างมีค่าลดลง (Bailón-García et al., 2017) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 a b c และ d ตามลำดับ โดยมีขนาดอนุภาคของ RF RFT1 RFT0.5 และ RFT0.25 เท่ากับ 4.19 0.85 2.10 และ 2.86 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งได้มาจากการวัดขนาดภาพตัดขวางของอนุภาคคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเฉลี่ย จำนวน 15 จุด โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ SemAfore V. 5.2



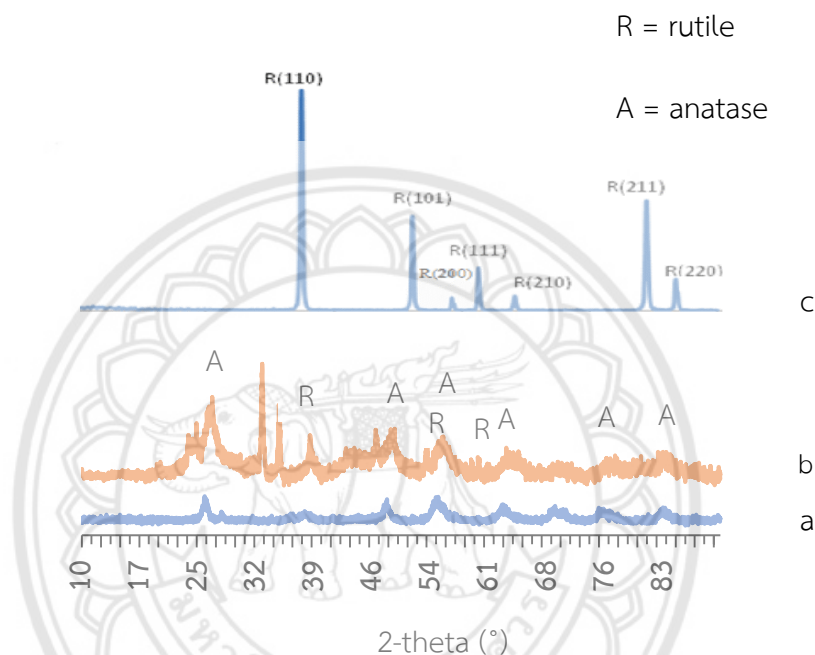
รูปที่ 4.4 พื้นผิวของซั้วอิเล็กโทรด a) RF เคลือบ TiO_2 b) RF c) RFT0.25 d) RFT0.5 และ e) RFT1



รูปที่ 4.5 SEM ของซั้วอิเล็กโทรดไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน

a) คาร์บอน b) RFT0.25 c) RFT0.5 d) RFT1

จากรูปที่ 4.6 b จะเห็นได้ว่า RFT1 มีสถานะเป็น Rutile และ Anatase เนื่องจาก TiO_2 ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส และจะมีการเปลี่ยนสถานะเป็น Anatase เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6 a เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (750 องศาเซลเซียส) TiO_2 จะเปลี่ยนสถานะเป็น Rutile ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำ TiO_2 ที่เผา ณ อุณหภูมิดังกล่าวไปทดสอบจึงอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Guoqiang Zou ดังแสดงในรูปที่ 4.6 c

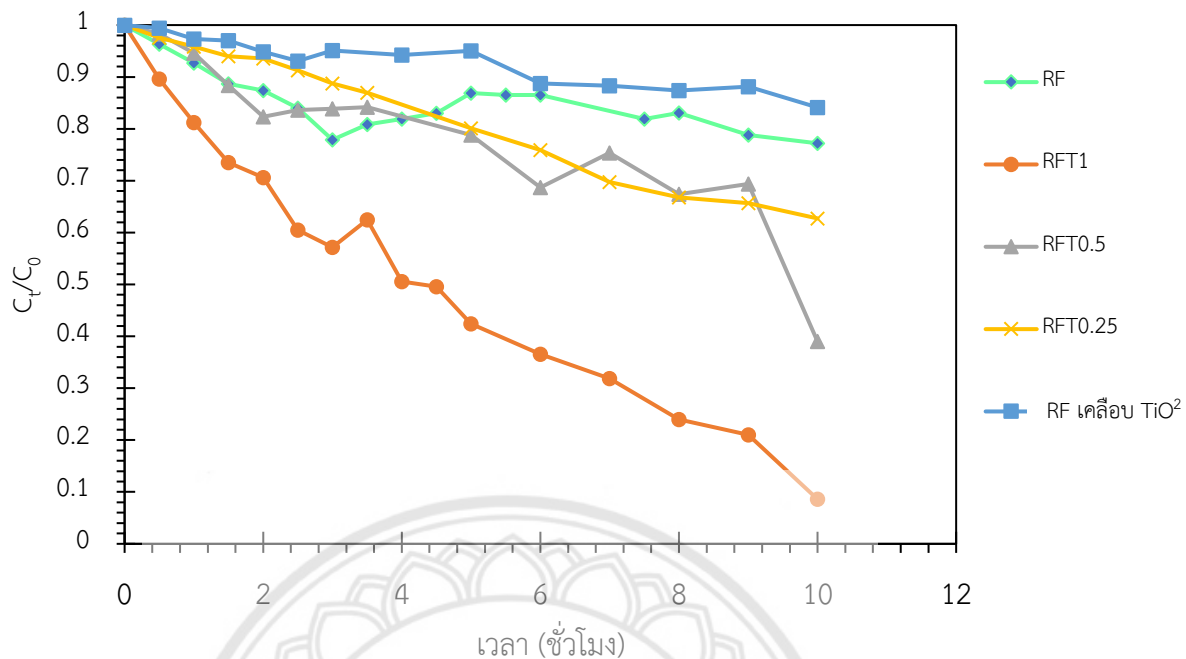


รูปที่ 4.6 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TiO_2 ในข้อวิเคราะห์ทรอด

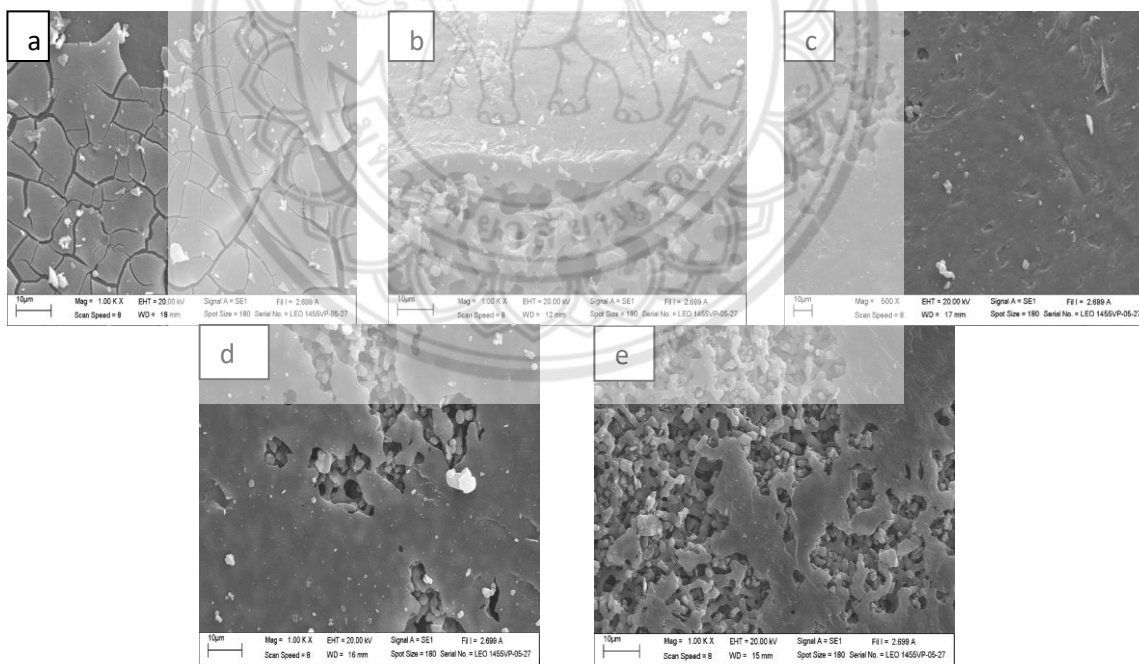
a) Anatase phase of TiO_2 b) ข้อวิเคราะห์ทรอด RF: TiO_2 เท่ากับ 2:1 c) Anatase phase of TiO_2

การทดลองได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจากข้อวิเคราะห์ทรอด RFT1 RFT0.5 RFT0.25 RF และ RF เคลือบ TiO_2 โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะห่างระหว่างข้อวิเคราะห์ทรอด เท่ากับ 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง ผลของการย่อยสลายแสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่อัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของข้อวิเคราะห์ทรอด RF พบว่าในช่วงเวลา 3 ชั่วโมงแรก อัตราการย่อยสลายสีย้อมลดลงแต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีแนวโน้มคงที่ ณ เวลา 5 ชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา 10 ชั่วโมงสามารถย่อย

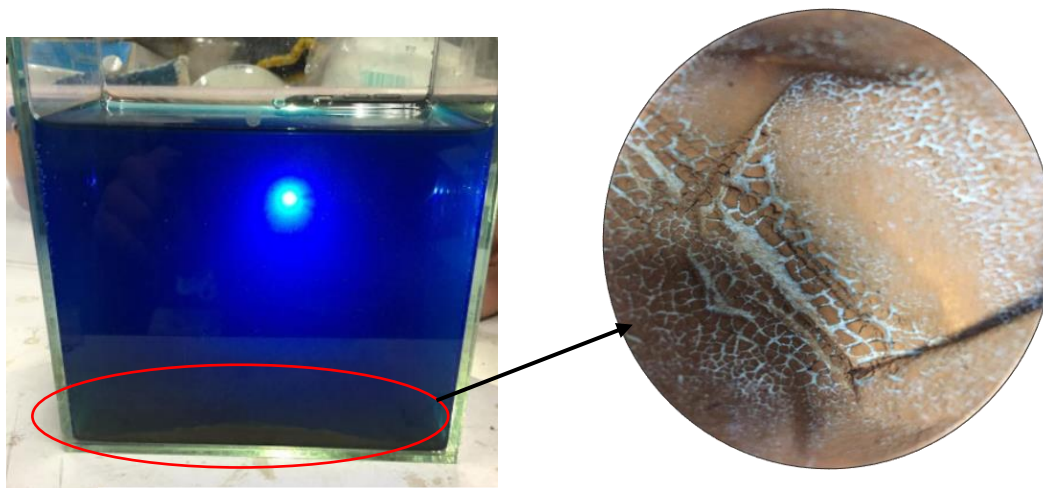
สลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 22.79 % นอกจากนี้ยังพบว่าพฤติกรรมการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของ
ซั้วอิเล็กโทรด RF เคลือบ TiO_2 RFT0.25 RFT0.5 มีค่าใกล้เคียงกันที่เวลา 3 ชั่วโมง แต่เมื่อเวลาผ่านไป
10 ชั่วโมง สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้เท่ากับ 15.87% 37.27% และ 61% ตามลำดับ เมื่อ
พิจารณาซั้วอิเล็กโทรด RF RFT1 RFT0.5 RFT0.25 และ RF เคลือบ TiO_2 พบว่าซั้วอิเล็กโทรดที่ให้ค่าการ
ลดลงของสีย้อมเมทิลีนบลูมีสูงที่สุดคือ RFT1 ซึ่งเป็นซั้วอิเล็กโทรดที่มีอัตราส่วนของ RF: TiO_2 เป็น 2:1
สามารถย่อยสลายสีย้อมได้มากถึง 91.41% ทั้งนี้เมื่อพิจารณาพื้นผิวของซั้วอิเล็กโทรด RF เคลือบ TiO_2
RF RFT0.25 RFT0.5 และ RFT1 พบว่าพื้นผิวของซั้วอิเล็กโทรด RF เคลือบ TiO_2 มีพื้นที่แน่นกว่า RF
RFT0.25 RFT0.5 และ RFT1 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาพื้นผิวซั้วอิเล็กโทรดจากภาพถ่าย SEM
จะเห็นได้ว่าซั้วอิเล็กโทรดที่เคลือบ TiO_2 นั้น มี TiO_2 เข้าไปเคลือบอุดรูพรุนของซั้วอิเล็กโทรดทำให้ดูดซับ
 OH^- ได้น้อย ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาอัตราการย่อยสลายสีย้อม
เมทิลีนบลูของ RF จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของ RF มี
พื้นที่ที่แน่น มีรูพรุนน้อย เมื่อเทียบกับซั้วอิเล็กโทรดที่มีส่วนผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้
ซั้วอิเล็กโทรดมีการดูดซับสีย้อมที่ไม่เสถียร ดังนั้นค่าสีย้อมที่วัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นและซั้วอิเล็กโทรดที่เป็น
RF เคลือบด้วย TiO_2 กับซั้วอิเล็กโทรด RF บริสุทธิ์ มีไอออนของเหล็กหลุดไปในสีย้อมเมทิลีนบลู
ซึ่งไอออนของเหล็กสามารถไปทำปฏิกิริยากับ OH^- ได้ ทำให้เกิดเป็นตะกอนของเหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.9
ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของ RF เคลือบ TiO_2 และ RF บริสุทธิ์มีค่าน้อย



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีของขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 4 ชนิด



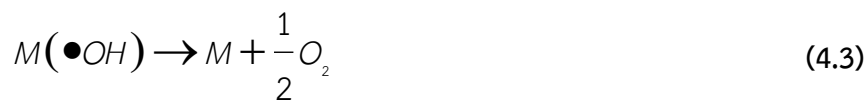
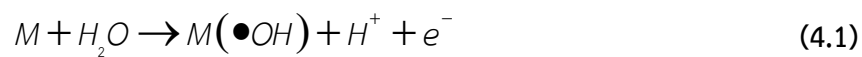
รูปที่ 4.8 พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด a) RF เคลือบ TiO₂ b) RF c) RFT0.25 d) RFT0.5 และ e) RFT1



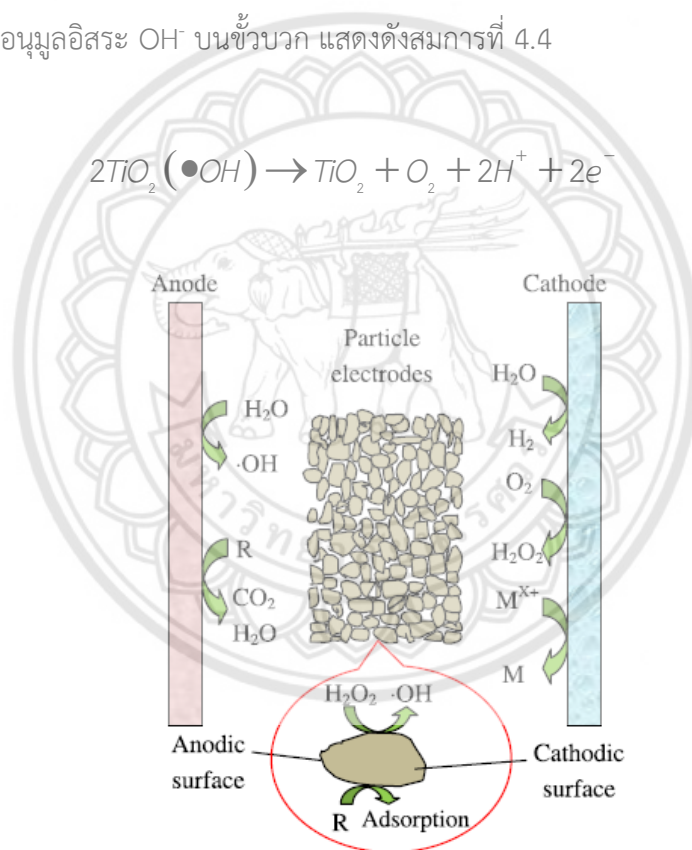
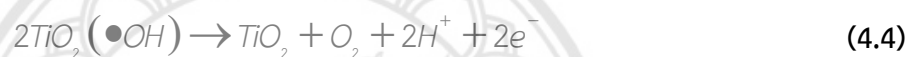
รูปที่ 4.9 ลักษณะตะกอนที่เกิดจากเหล็กในกาการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ขั้วอิเล็กโทรดที่ดีที่สุดที่สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูคือ ขั้วคาร์บอนที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน 2:1 เนื่องจากการคาร์บอนที่เตรียมได้จาก RF-gel เป็นคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจล (Yin, 2013) จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความเปราะมากขึ้นเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมทำปฏิกิริยากับเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อนำไปย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ส่งผลให้มีอนุภาคของคาร์บอนหลุดออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดสังเกตได้จากเมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้ว นำสีย้อมย้อมเมทิลีนบลูไปกรองจะได้คาร์บอน เมื่ออนุภาคของคาร์บอนหลุดแล้วไปลอยอยู่ในสีย้อมเมทิลีนบลู จะทำให้เกิดระบบการย่อยสลายสีย้อมแบบ 3 อิเล็กโทรด โดยมีอนุภาคที่หลุดลอยอยู่ในสีย้อมเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งอิเล็กโทรดอันที่ 3 นี้จะทำหน้าที่ดูดซับสารมลพิษและช่วยเพิ่มการกระจายตัวของประจุ ในขณะที่ปฏิกิริยาหลักของการย่อยสลายสีย้อมจะเกิดที่พื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดหลักที่เป็นแท่งคาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยา Direct oxidation แสดงดังสมการด้านล่างนี้ (Zhang et al., 2013)

ปฏิกิริยา Direct oxidation เป็นปฏิกิริยาที่เกิดบนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด



นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นตัวทำให้เกิด 3 อิเล็กโทรดแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ยังช่วยยืดอายุของอนุมูลอิสระ OH^\bullet บนขั้วบวก แสดงดังสมการที่ 4.4

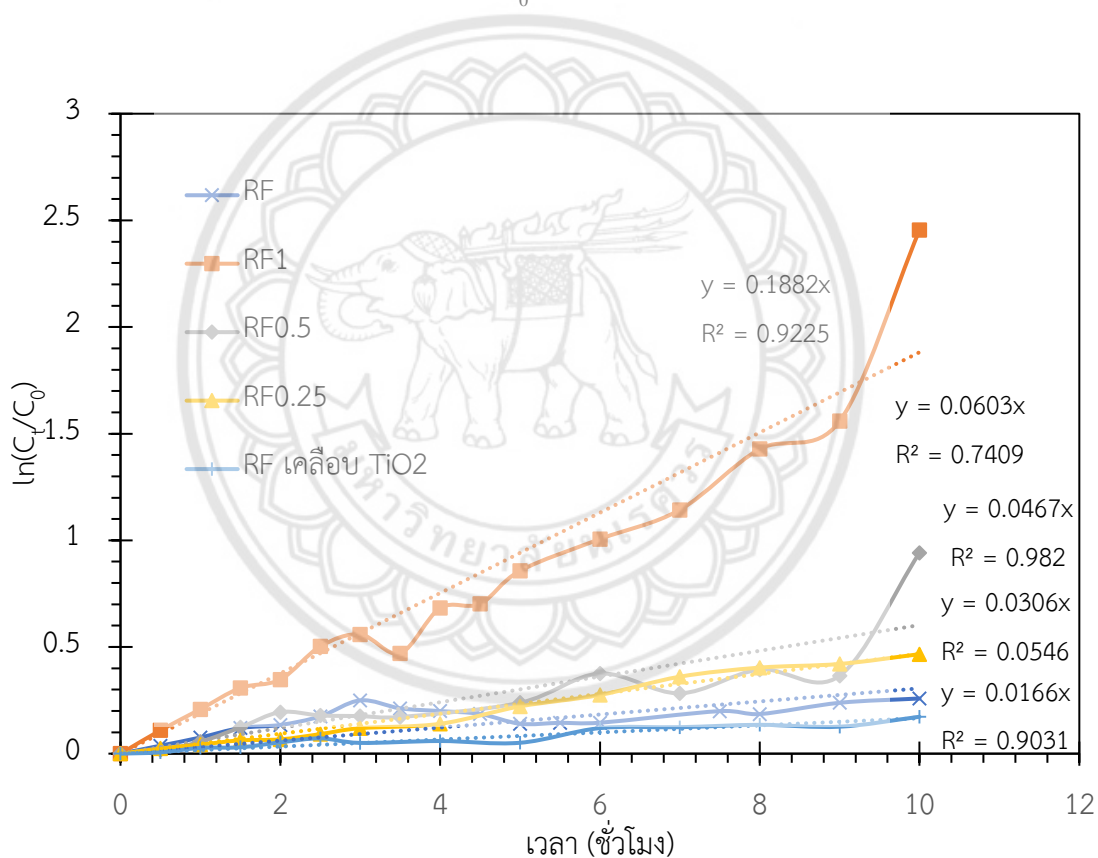


รูปที่ 4.7 กลไกการทำงานของระบบการย่อยที่มี 3 อิเล็กโทรด (Zhang et al., 2013)

4.1.2 จลนพลศาสตร์

นำค่าความเข้มข้นของการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 10 ชั่วโมง มาเขียนความสัมพันธ์ในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ดังสมการที่ 4.5 โดยพิจารณาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ กับเวลา จะสามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาได้จากความชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = kt \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.81 จลนพลศาสตร์ในปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First-order reaction) ของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

จากรูปที่ 4.11 พบว่า RFT1 มีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 1.99 ต่อวินาที ซึ่งมากกว่า RF RFT0.5 และ RFT0.25 แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งอธิบายได้ว่าการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างซัลโฟนิลไอออนกับสีย้อมเมทิลีนบลูทำให้เกิดการย่อยสลายสีย้อม

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของซัลโฟนิลไอออนแต่ละประเภท

ชนิดซัลโฟนิลไอออน	K	R ²
RF	0.0306	0.0546
RF 1	1.882	0.9225
RF 0.5	0.0603	0.7409
RF 0.25	0.0467	0.982
RF เคลือบ TiO ₂	0.0166	0.9031

4.1.3 ระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามลของเวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งการทดลองได้กำหนดเวลาในการบ่มเจลเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์ก่อนผสม TiO₂ เป็นไม่มีระยะเวลาในการบ่ม RF ระยะเวลาในการบ่ม 3 และ 5 ชั่วโมง ก่อนเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสม TiO₂ ต่อลักษณะทางกายภาพของเจลแสดงดังรูปที่ 4.12



0 ชั่วโมง



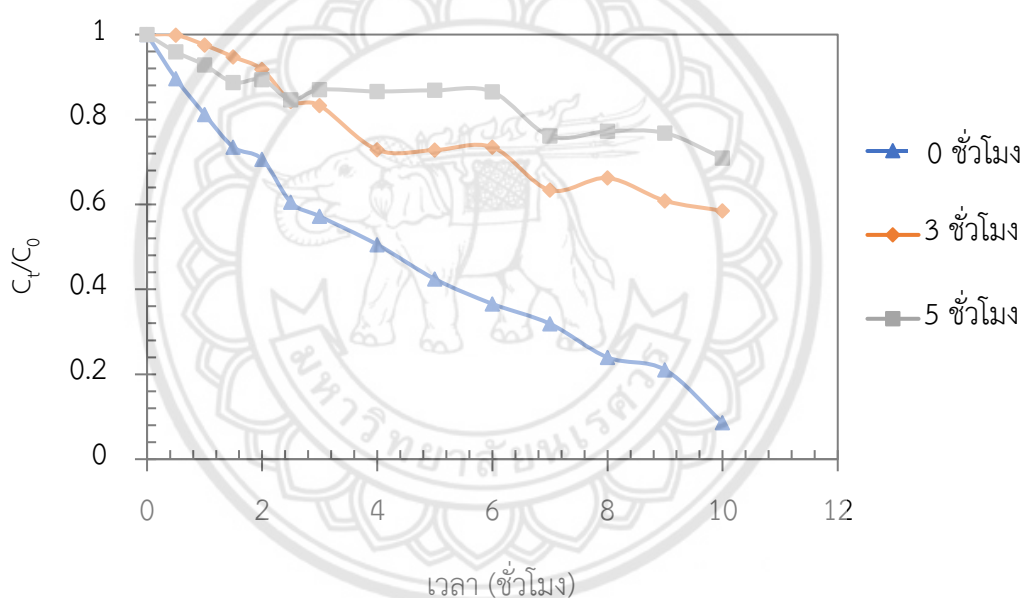
3 ชั่วโมง



5 ชั่วโมง

รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสีของ RF เมื่อระยะเวลาที่บ่มเจลต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 เมื่อสังเกตลักษณะเจลด้วยตาเปล่า พบว่าสีของเจลจะเข้มข้นตามระยะเวลาบ่มเจล ทั้งนี้เนื่องจากเจลได้ทำปฏิกิริยากันเป็นเวลานานโดยเรซอซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์จะทำปฏิกิริยากันโดยพันธะ methylene bridge กับ methyl ether bridge (วิวัฒน์, 2548) เมื่อเวลาผ่านไปโครงข่ายของเจลยึดติดกันได้เป็นสองสี่เมทิลอลเรซอซินอลทำให้ลักษณะของสีมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ระยะเวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกันจะส่งผลต่อคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยในงานวิจัยได้ทำการเลือกใช้อิเล็กโทรดในอัตราส่วน 2:1 ของ RF ต่อ TiO_2 เพื่อศึกษาผลของเวลาต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลู โดยใช้ใช้อิเล็กโทรดในอัตราส่วน 2:1 ที่เวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0 3 และ 5 ชั่วโมง มาทำการย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลูแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมที่เวลาในการบ่มเจลต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าใช้อิเล็กโทรดที่ไม่มีเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมดีที่สุด เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับ RF ได้ ทำให้โครงสร้างของอิเล็กโทรดที่เวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 0 ชั่วโมง มีความเปราะกว่าอิเล็กโทรดที่เวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น เนื่องจาก RF ได้ทำการสร้างโครงข่ายกันเป็นสองสี่เมทิลอลเรซอซินอล ส่งผลให้เมื่อมีเวลาบ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์

นาน ไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ได้น้อย นอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีผลต่ออนุภาคคาร์บอนที่จะหลุดไปเป็นซิวอิเล็กโทรดที่ 3 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 แล้วยังส่งผลต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เข้าไปช่วยยึดอายุของ OH⁻ ทำให้การดูดซับ OH⁻ มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับซิวอิเล็กโทรดที่ไม่มีเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมของซิวอิเล็กโทรดที่ไม่มีเวลาในการบ่ม RF ก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นดีที่สุด

ตารางที่ 4.2 แสดงตะกอนหลังกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

เวลาก่อนผสม TiO ₂ ในอัตราส่วน 2:1	น้ำหนักตะกอนหลังการย่อย สลาย	รูปตะกอน
0 ชั่วโมง	0.2978 กรัม (ตะกอนคาร์บอน)	
3 ชั่วโมง	0.2051 กรัม (ตะกอนคาร์บอน)	
5 ชั่วโมง	0.5921 กรัม (ตะกอนเหล็ก)	

จากตารางที่ 4.2 จะสังเกตเห็นว่าที่เวลาก่อนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 ชั่วโมง ตะกอน หลังจากการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นตะกอนที่เกิดจากเหล็ก ซึ่งพิสูจน์ได้จากการนำแม่เหล็กไปดูด พบว่าแม่เหล็กสามารถดูดตะกอนได้ แสดงดังรูปที่ 4.14

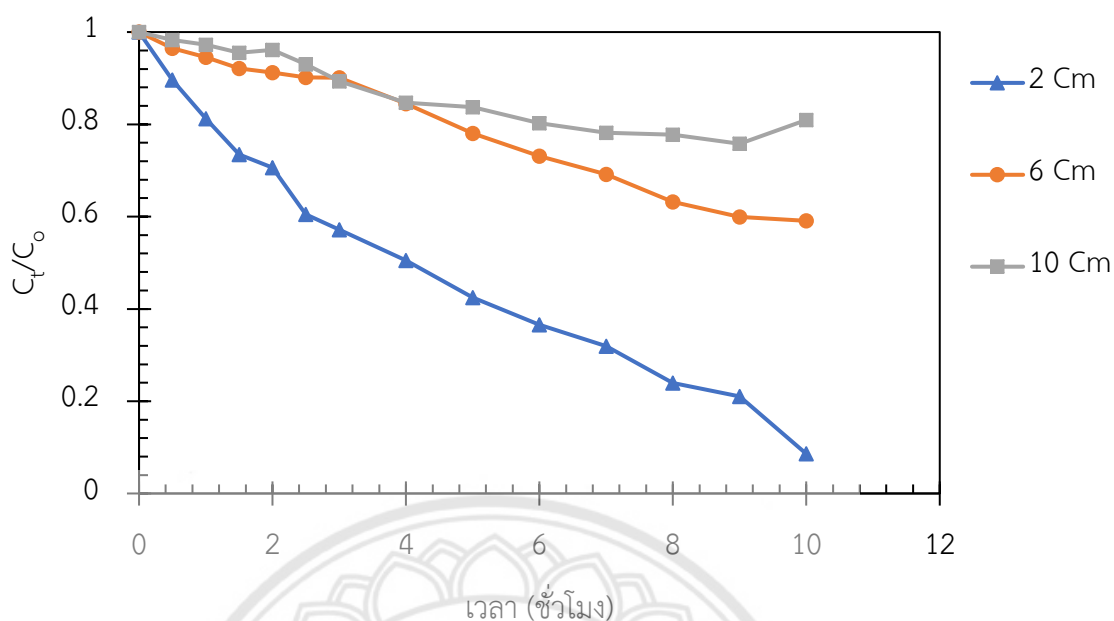


รูปที่ 4.11 แสดงการดูดติดของตะกอนที่เป็นเหล็ก

4.2 สถานะการดำเนินงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย สีย้อมเมทิลีนบลู

4.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างขั้ว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพื่อหาสถานะที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อที่จะศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วจึงได้กำหนดระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดให้ต่างกัน 3 ระยะ คือ 2 6 10 เซนติเมตร และได้ทำการทดลอง ณ สถานะเดียวกัน คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแส 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) 0.15 โมลต่อลิตร pH 4 และเวลาทำการทดลอง 10 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.15

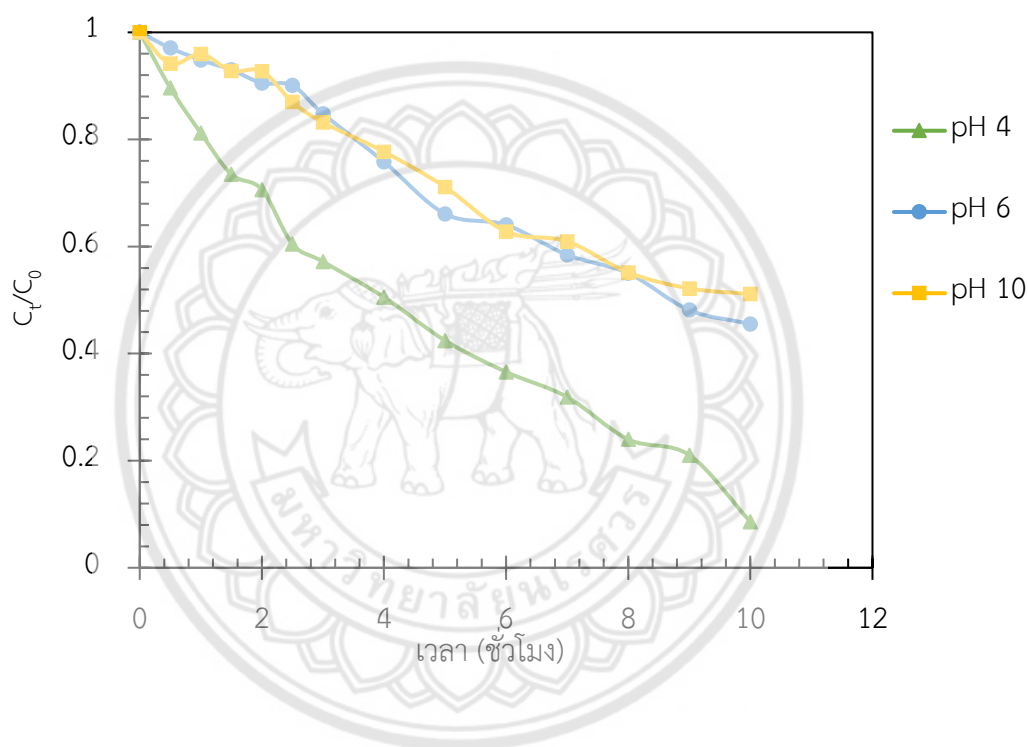


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมื่อระยะห่างขั้วที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าระยะของขั้วอิเล็กโทรดที่มีระยะห่าง 2 เซนติเมตร มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากถึง 91.41% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luxin Zhang และคณะได้ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีย้อมฟีนอล โดยใช้คาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยได้กำหนดระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดดังนี้ 1 2 4 6 และ 8 เซนติเมตร พบว่าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร สามารถย่อยสลายฟีนอลได้ดีที่สุด เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง สามารถย่อยสลายฟีนอลได้ 99.51% ทั้งนี้เป็นผลมาจากระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดนั้น มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพราะเมื่อเพิ่มระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง เมื่อความหนาแน่นกระแสลดลงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม เพราะในกระบวนการดังกล่าวจะต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าในการย่อยสลาย

4.2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

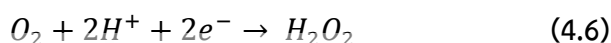
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อที่จะศึกษาผลของ pH จึงได้กำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน คือ 4 6 และ 10 ตามลำดับ โดยทำการทดลอง ณ สภาวะที่ดีที่สุดคือ ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแส 60 มิลลิแอมป์-ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) 0.15 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเวลาในการทำการทดลอง 10 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อม ณ สภาวะ pH ที่ต่างกัน

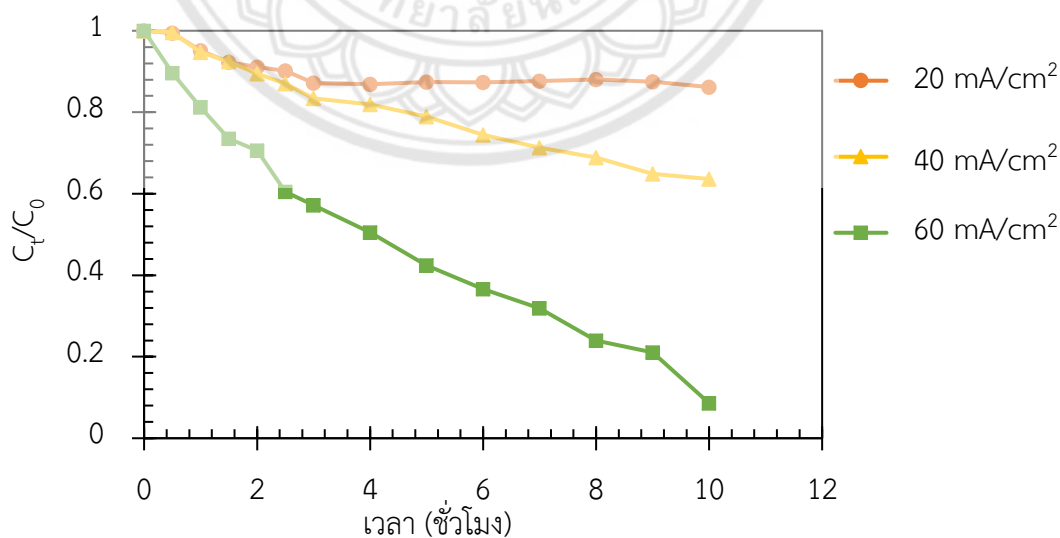
จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมจะลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และที่สภาวะ pH เท่ากับ 4 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดซึ่งสามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่า pH 6 และ pH 10 โดยสามารถย่อยสลายสีย้อมได้มากถึง 91.41% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peipei Jin และคณะ ซึ่งได้ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการย่อยสลายฟีนอล (Jin 2014) พบว่าเมื่อลด pH ของสารละลาย จะทำให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมดีขึ้น เนื่องจาก pH เริ่มต้นของสารละลายนั้น จะมีบทบาทอย่างยิ่ง

ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้กรดไนตริก (H_2SO_4) เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สำหรับปรับค่า pH เมื่อทำการทดลองการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูที่มีความเป็นกรดหรือ pH ต่ำ จะส่งผลต่อการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 4.6 เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้ส่งผลต่อสมบัติในการออกซิไดซ์ของสารอนุมูลอิสระ (OH^\cdot) ในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนุมูลอิสระหรือไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) นี้จะเป็นตัวกลางในการย่อยสลายสีของ เป็นผลทำให้อัตราการย่อยสลายที่สภาวะ pH 4 ดีที่สุด



4.2.3 ความหนาแน่นกระแส

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อที่จะศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จึงได้กำหนดความหนาแน่นกระแสต่างกัน 3 ค่า คือ 20 40 และ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และได้ทำการทดลอง ณ สภาวะเดียวกันคือ ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 2 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีของเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) 0.15 โมลต่อลิตร pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาในการทดลอง 10 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.17

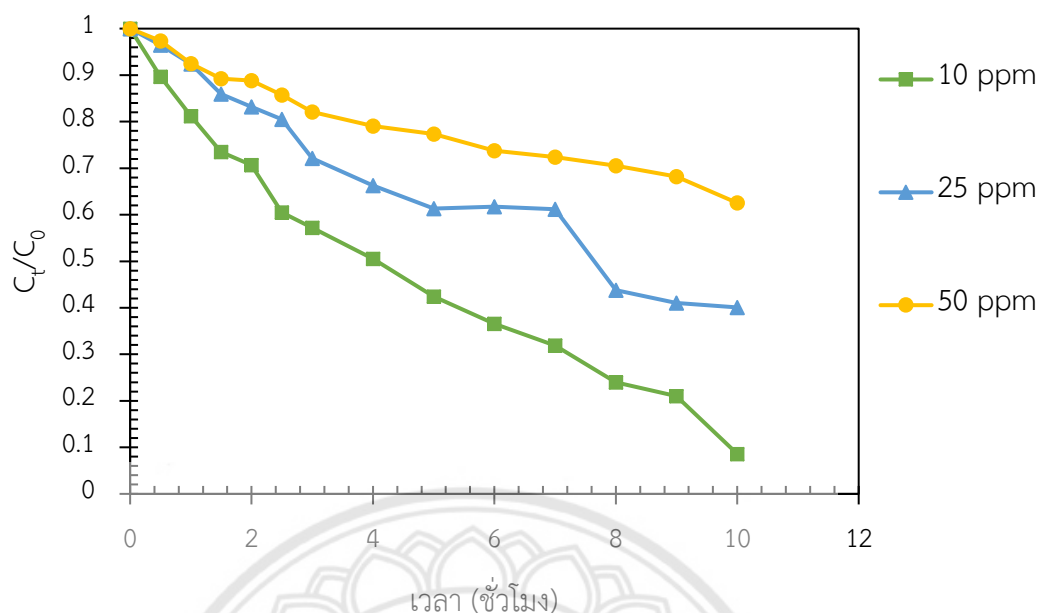


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูเมื่อความหนาแน่นกระแสต่างกัน

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ณ เวลา 10 ชั่วโมง ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเท่ากับ 0.86 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 13.82% แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสเป็น 40 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าความเข้มข้นสีย้อม ณ เวลา 10 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 0.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 13.82 % เป็น 36.37% และสุดท้ายเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสเป็น 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าความเข้มข้นสีย้อม ณ เวลา 10 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.086 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 36.37% เป็น 91.41% จากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสพบว่าความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู เนื่องจากในกระบวนการไฟฟ้าเคมีความหนาแน่นกระแสที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

4.2.4 ผลของความเข้มข้น

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อที่จะศึกษาผลความเข้มข้นของเมทิลีนบลู จึงได้กำหนดความเข้มข้นต่างกัน 3 ค่า คือ 10 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้ทำการทดลอง ณ สภาวะเดียวกันคือ ระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแส 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) 0.15 โมลต่อลิตร pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาในการทดลอง 10 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมื่อความเข้มข้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมสูงกว่า ที่ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายอยู่ที่ 91.41 % เนื่องจากการย่อยสลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่ำจะมีอัตราส่วนของไฮดรอกซิลเรดิคัลสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นสูง ทำให้การย่อยสลายของสีย้อมที่ความเข้มข้นสูงมีประสิทธิภาพน้อยกว่าหรือเกิดได้ช้ากว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณที่สามารถปล่อยลงสิ่งแวดล้อมได้ต้องมีความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ทิตยา 2558)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ผลของระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนการผสม TiO_2 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์เจลต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เจล และศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยศึกษาจากผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ความหนาแน่นกระแส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การสังเคราะห์เรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล (RF-Gel)

5.1.1.1 ในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนด จากคาร์บอนร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์เจลต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ 1:1 และ 1:2 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นขั้วอิเล็กโทรดได้

5.1.1.2 ผลของระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนการผสม TiO_2 เจล พบว่าที่ไม่มีระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนการผสม TiO_2 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม RF ก่อนการผสม TiO_2 เจล 3 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง

5.1.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอินอลพอร์มัลดีไฮด์เจลต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เจล พบว่าที่อัตราส่วน 2:1 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากถึง 91.41 %

5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

5.1.2.1 ผลของค่า pH พบว่าสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ทำการปรับให้มีค่า pH 4 ช่วยให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงกว่าที่ค่า pH 6 และ pH 10

5.1.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนด พบว่าขั้วอิเล็กโทรดที่มีระยะห่าง 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ดีกว่าระยะห่างขั้ว 6 เซนติเมตร และ 10 เซนติเมตร

5.1.2.3 ผลของความหนาแน่นกระแส พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสมากที่สุดคือ 60 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมดีกว่าความหนาแน่นกระแส 20 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และ 40 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

5.1.2.4 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู พบว่าความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้ดีกว่าความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.1.3 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

ขั้วอิเล็กโทรดเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์อัตราส่วน 2 : 1 สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้สูงสุด 91.41 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการทดลองการสังเคราะห์เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการระหว่างทำการขึ้นรูปจะต้องทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากความร้อนส่งผลต่อการแข็งตัวของเจล อาจจะทำให้เจลที่เตรียมขึ้นมาไม่ยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวรองรับ

5.2.2 ในการทดสอบลักษณะของขั้ว ควรจะทำการวิเคราะห์ BET Surface area เพื่อนำมาใช้เป็นเหตุผลประกอบในการเลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เจล

5.2.3 ในการทดลองควรมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แม่นยำ เนื่องจากในการทดลองความหนาแน่นกระแสไม่คงที่ อาจทำให้ผลการวิเคราะห์คลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย

เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร. (2553). การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ. งานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- วนิดา ชูอักษร. (2548). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 181-191
- Jin P, Chang R, Liu D, Zhao K, Zhang L & Ouyang Y. (2014). Phenol degradation in an electrochemical system with TiO_2 /activated carbon fiber as electrode. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2698–2703
- พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดฟืนฟูสภาพได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จิราภรณ์ ดำจันทร์. (2551). การพัฒนาสารเคลือบผิว TiO_2 ระดับนาโน. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จุฑามาศ ลีประเสริฐ และ นิชกมล นิธิมัย. (2010). การเตรียม TiO_2 โดยเทคนิค Sol-Gel เพื่อใช้กำจัด VOCs จากอากาศเสีย (TiO_2 Preparation by Sol-Gel Technique for VOCs Removal from waste Air). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ภุชงค์ ศรีหลิ่ง. (2558). การศึกษาการดูดซับมีเทนและไฮโดรเจนในถ่านกัมมันต์ที่มีนิกเกิลบนพื้นผิวโดยแบบจำลองมอนติคาร์โล. วิทยานิพนธ์วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. (2548). กระบวนการเตรียมเรโซซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจล และคาร์บอยเจลด้วยวิธีต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Guenfoud F, Mokhtari M & Akrouit H. (2014). **Electrochemical Degradation Of Malachite Green With BDD Electrodes Effect Of Electrochemical Parameters.** Diamond And Related Materials. 8–14

ดวงตา กิจแก้ว. (2546). การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี.

วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์ (เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยมหิดล

Avsar Y, Kurt U & Gonullu T. (2007). **Comparison Of Classical Chemical And Electrochemical Processes For Treating Rose Processing Wastewater.**

J. Hazard Mater. 340–345

Chen G. (2004). **Electrochemical Technologies In Wastewater Treatment.** Separation and Purification Technology. 11-41

Gotsi M, Kalogerakis N, Psillakis E, Samaras P, & Mantzavinou D. (2005). **Electrochemical Oxidation Of Olive Oil Mill Wastewaters.** Water Res. 4177–4187

วรรณรัตน์ วัฒนชัย. (2547). กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อานนท์ ดุษฎีพรรณ. (2538). การขจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำกากส่าโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนและแบบเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนชัย ชัยจิตรสกุล. (2548). กระบวนการเตรียมเรซซินอลฟอว์มัลดีไฮด์เจล และคาร์บอนเจลด้วยวิธีต่างกันคือใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแคโทดอานิก (RF-CS) และไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว โดย RF-NS Carbon. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยรรยง วารินทร์. (2547). การปรับปรุงสมบัติความเป็นรูพรุนของเรซซินอลฟอว์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจลที่ผ่านขั้นตอนการทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งเตรียมโดยใช้คลื่นเหนือเสียง.

วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- วินัย นุตมากุล. (2546). การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิทยาศาสตร์ (เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม)
- Tezcan Ün Ü, Uğur S, Koparal AS & Bakır Öğütveren Ü. (2006). **Electrocoagulation Of Olive Mill Wastewaters**. Separation and Purification Technology. 1-202
- Liang HC & Li XZ. (2009). **Effects Of Structure Of Anodic Tio(2) Nanotube Arrays On Photocatalytic Activity For The Degradation Of 2,3- Dichlorophenol In Aqueous Solution**. J. Hazard Mater. 720-727
- Mor GK, Varghese OK, Paulose M, Shankar K & Grimes CA. (2006). **A Review On Highly Ordered, Vertically Oriented Tio₂ Nanotube Arrays: Fabrication, Material Properties, And Solar Energy Applications**. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011-2075
- Tai-Cheng An X-HZ & Ya Xiong. (2001). **Feasibility Study Of Photoelectrochemical Degradation Of Methylene Blue With Three- Dimensional Electrode- Photocatalytic Reactor**. 897-903
- วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์. (2546). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Marco Panizza. (2007). **Electrochemical Degradation Of Methylene Blue**. Department of Chemical and Process Engineering, University of Genoa, P.le J. F. Kennedy 382-387
- Bailón-García, E., Elmouwahidi, A., Álvarez, M. A., Carrasco-Marín, F., Pérez-Cadenas, & Maldonado-Hódar, F. J. (2017). **New Carbon Xerogel-Tio 2 Composites With High Performance As Visible-Light Photocatalysts For Dye Mineralization**. *Applied Catalysis B: Environmental*. 29-40

Nidheesh, P. V., Zhou, M., & Oturan, M. A. (2018). **An Overview On The Removal Of Synthetic Dyes From Water By Electrochemical Advanced Oxidation Processes.** *Chemosphere.* 210-227

Zhang, C., Jiang, Y., Li, Y., Hu, Z., Zhou, L., & Zhou, M. (2013). **Three-Dimensional Electrochemical Process For Wastewater Treatment.** A general review. *Chemical Engineering Journal.* 455-467

รินลดา สิริแสงสว่าง. (2558). **การศึกษาการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสเมล็ดมะขามแบบซ้ำ.** วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนงคลธัญบุรี 36-42

Akira Fujishima, Tata N. Rao, (2000). **Titanium Dioxide Photocatalysis.** *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 1-112

Nanoyothai (2545). **ปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง Photocatalyst กับ TiO₂.** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 <http://nanoyothai.lnwshop.com/article>

Chadanuch Khuntrakool (2545). **โครงสร้างและคุณสมบัติของ TiO₂** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 <https://sites.google.com/site/cdnkkt082/khunsmbati>

JEOL Ltd. (2540). **Products - Scanning Electron Microscope (SEM)** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 https://www.jeol.co.jp/en/products/list_sem.html

Barbara L Dutrow (2551). **X-ray Powder Diffraction (XRD)** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html

Oasis Scientific Inc. (2555). **PG Instruments T80 UV/VIS Spectrophotometer** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560 <http://www.oasisscientific.com/t80-uvvis-spectrophotometer.html>





เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน



แม่เหล็กกวนสาร



บีกเกอร์



เครื่องดูดจ่ายสารละลาย



ขวดเก็บตัวอย่าง



น้ำกลั่น

รูปที่ ก.1 รูปอุปกรณ์ในการทดลอง

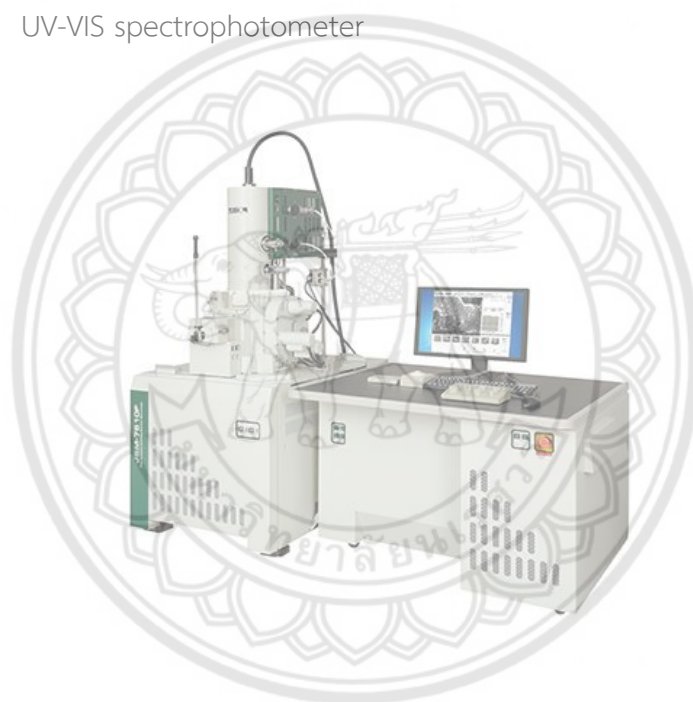




UV-VIS spectrophotometer



เครื่องชั่งดิจิทัล



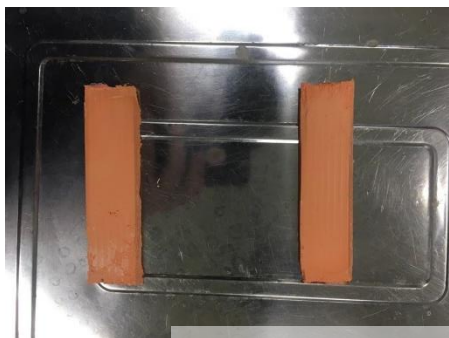
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ ข.1 รูปเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การทดลอง



ภาคผนวก ค

ขั้นตอนและการทดลอง



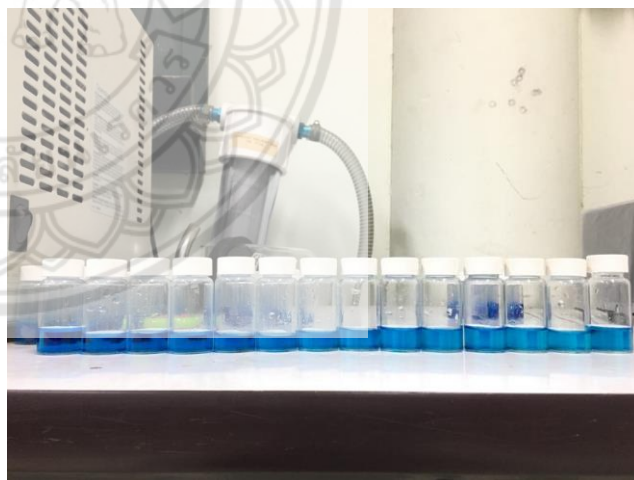
ลักษณะของขี้วก่อนอบ



ลักษณะของขี้วหลังอบ



ลักษณะของขี้วหลังเผา

การจุ่มเคลือบ TiO_2 

ตัวอย่างสารละลายสีขี้มที่วิเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ

รูปที่ ค.1 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง