



การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว
Degradation of Methylene Blue by Liquid Phase Plasma Process



นายศศิน แก้วเจริญ รหัส 54360513
นางสาวกรณิการ์ ชุนพินิจ รหัส 54362753


ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557

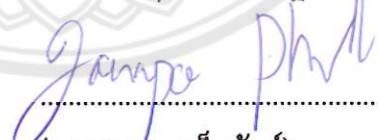


ใบรับรองปริญญาานิพนธ์


ชื่อหัวข้อโครงการ การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาภูมิภาคของเหลว
ผู้ดำเนินโครงการ นายศศิน แก้วเจริญ รหัสนิสิต 54360513
นางสาวกรณิการ์ ขุนพินิจ รหัสนิสิต 54362753
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์
ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2557

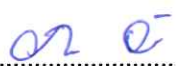
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสกลนคร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.ธนพล เพ็ญรัตน์)


.....กรรมการ
(รศ.ดร.สมร หิรัญประดิษฐกุล)


.....กรรมการ
(ดร.นพวรรณ โม้ทอง)


.....กรรมการ
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายศติน	แก้วเจริญ	รหัสนิสิต 54360513
	นางสาวกรณิการ์	ขุนพิณีจ	รหัสนิสิต 54362753
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.อิสราวุธ	ประเสริฐสังข์	
	ดร.ธนพล	เพ็ญรัตน์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2557		

บทคัดย่อ

ในโครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ระยะเวลาที่ใช้ในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 60 นาที พลังงานความถี่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ต ร่วมกับสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 75 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวพบว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดงสามารถให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 92.41 ภายในเวลา 60 นาที และเมื่อเพิ่มความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดงให้ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวที่ดีของเมทิลีนบลู และเมื่อนำไปตรวจวัดหาค่า TOC พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูได้รับการบำบัดส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนลดลงจากการสลายตัวด้วยพลังงานพลาสมา และเมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายเมทิลีนบลู พบว่าการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอิเล็กโทรดชนิดทองแดงให้อัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูดีที่สุด และกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวยังช่วยลดความเข้มข้นของสีได้ดีในช่วงความเข้มข้นต่ำของสารละลายเมทิลีนบลู

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำคำปรึกษา รวมถึงแนวทางการแก้ปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมา โดยตลอดและขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการแก่บุคคลทั่วไป นิสิต นักศึกษาที่สนใจค้นคว้าและเพิ่มพูนความรู้เกี่ยวกับการศึกษา กระบวนการสลายสีย้อมด้วยพลาสมาวิภาคของเหลว

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนการดำเนินงานจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงการ

นายศศิน แก้วเจริญ

นางสาวกรณิการ์ ชุนพิณิจ

พฤษภาคม 2558

สารบัญ

หน้า

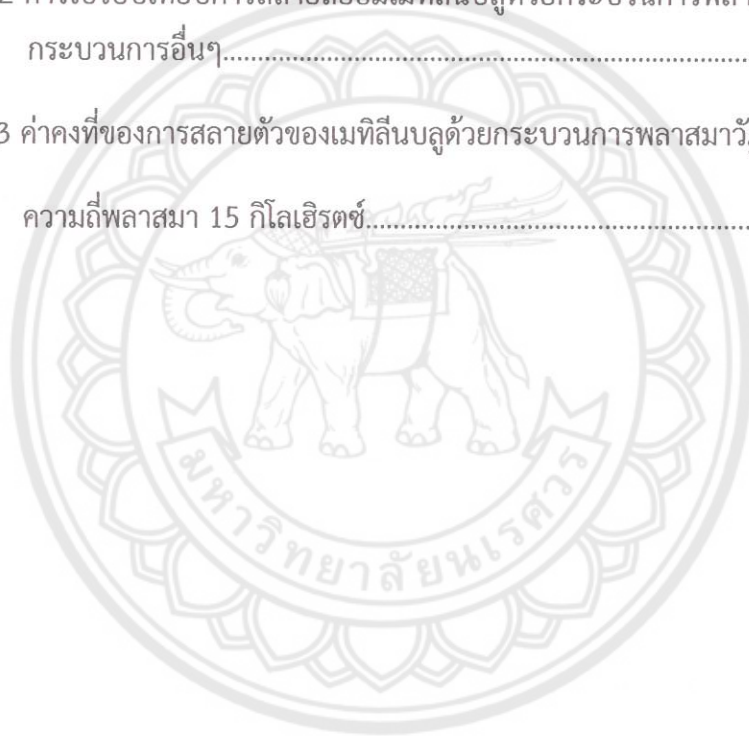
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 เมทิลีนบลู.....	3
2.2 การกำจัดสีในน้ำเสีย.....	5
2.3 Advance oxidation process.....	11
2.4 Fenton Reaction.....	13
2.5 พลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	19
2.6 Optical Emission Spectrometer.....	22
2.7 UV-VIS Spectrophotometer.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC).....	25
2.9 การสำรวจเอกสารงานวิจัย.....	26
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	30
3.2 อุปกรณ์.....	30
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	
4.1 คุณลักษณะของพลาสติกที่เกิดของจากขี้วัวเล็กไทรดแต่ละชนิด.....	35
4.2 ผลของชนิดขี้วัวเล็กไทรดที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	37
4.3 จลนพลศาสตร์การย่อยสลายของเมทิลีนบลู.....	45
4.4 การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนด้วยเทคนิค TOC.....	47
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงสีจากการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสติกชีวภาคของเหลว..	48
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทสรุป.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก.....	55

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของสาร Methylene Blue.....	3
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสมบัติการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue.....	4
ตารางที่ 4.1 ร้อยละการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	41
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวกับ กระบวนการอื่นๆ.....	42
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของการสลายตัวของเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	47



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	19
รูปที่ 2.2 หลักการของเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	20
รูปที่ 2.3 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอะตอม.....	23
รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงการทำงานของ Optical Emission Spectrometer.....	23
รูปที่ 2.5 รูปแสดงหลักการการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	24
รูปที่ 2.6 รูปแบบเครื่องมือของเครื่องวิเคราะห์ TOC.....	26
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว.....	32
รูปที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดทั้งสแตนท์ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	36
รูปที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดหลักที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	36
รูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้อผิดพลาดทองแดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	37
รูปที่ 4.4 ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นต่ำด้วยข้อผิดพลาดต่างชนิดที่ ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	38
รูปที่ 4.5 ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูงด้วยข้อผิดพลาดต่างชนิดที่ ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	40
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยข้อผิดพลาดต่างชนิดกันที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยข้าวเปลือกทอดทองแดง ที่ความถี่ต่างกัน.....	44
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูงด้วยข้าวเปลือกทอดต่างชนิด ที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์.....	46
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนก่อนและหลังทำการบำบัด.....	48
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นที่ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ของข้าวเปลือกทอดทองแดง.....	49
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นที่ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ของข้าวเปลือกทอดทองแดง.....	49



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหที่เกิดขึ้นเกิดจากสารปนเปื้อนสีย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่แหล่งน้ำในเขตชุมชน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหายุ่งยากในการกำจัดและการจัดการ โดยทั่วไปกระบวนการกำจัดสีย้อมเหล่านี้สามารถทำได้หลายวิธี อาทิ ทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่นวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสียคือการนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าใช้จ่ายสูง วิธีการกรองด้วยเยื่อแผ่นจำเป็นต้องมีการควบคุมระดับความดันน้ำ ค่า pH และอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ วิธีการทางกายภาพและเคมีมีข้อจำกัดเนื่องจากการใช้สารเคมีซึ่งนอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองแล้วยังก่อให้เกิดตะกอนและสารเคมีสะสมมากขึ้นในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่วนการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพนั้น มีข้อจำกัดในเรื่องของความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยต่างๆ ซึ่งการเลือกเทคโนโลยีในการกำจัดที่เหมาะสมนั้นควรคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพ [1]

ปัจจุบันกระบวนการพลาสมา (Plasma) ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อม อาทิ Dielectric Barrier Discharged (DBD) Plasma [2] และ Pulsed Discharged Plasma [3] เป็นต้น ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็วและมีการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และนิยมไปใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามทั้งสองเทคนิคนี้ยังคงมีข้อเสียเนื่องจากต้องมีการควบคุมพลังงานและปริมาณอัตราการไหลของก๊าซที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตพลาสมาในระบบ อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดความยุ่งยากอีกทั้งยังมีหลายขั้นตอนในการบำบัดทำให้มีการใช้ต้นทุนที่สูงขึ้น พลาสมาวัฏภาคของเหลวเป็นกระบวนการที่ถูกค้นพบโดย O.Takai [4] และได้รับความนิยมนำมาใช้ งานทางด้าน การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การดัดแปลงพื้นผิวของโลหะและการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศ อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังสามารถควบคุมการสัมผัสกันระหว่างพลาสมากับสารที่จะบำบัดได้ง่าย จากงานวิจัยของ Yanping Jin และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการสลาย Methylene Blue และ Methyl Orange ในน้ำเสีย ด้วยเทคนิค Pulsed discharged plasma โดยสารสีที่ใช้ในการทดลองคือ Methylene Blue และ Methyl Orange ที่มีความเข้มข้น 1.4×10^{-6} M โดยทำการศึกษาผลการตอบสนองต่อผิวของสารตัวอย่างเพื่อวัดประสิทธิภาพของการสลายสีย้อมทั้ง 2 ชนิดภายใต้เงื่อนไขต่างๆ จากการศึกษาพบว่า Methylene Blue ถูกสลายไปกว่าร้อยละ 94.5 และ Methyl Orange ถูกสลายไปกว่าร้อยละ 80.2 และยังทราบว่าเทคนิค Pulsed discharged plasma oxidation process นั้นช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับ

การบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าพลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถนำมาใช้งานทางด้านการสลายสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยหรือสภาวะของพลาสมาที่สามารถส่งผลต่อการสลายสีย้อม อาทิ เช่น ชนิดของอิเล็กโทรด พลังงานพลาสมา ยังไม่ได้รับการศึกษา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการสลายสีย้อมในสารละลายด้วยเทคนิคพลาสมาวิทยุภาคของเหลว และศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของเมทิลีนบลูด้วยเทคนิคพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการสลายสีย้อมในสารละลายด้วยเทคนิคพลาสมาวิทยุภาคของเหลว (Liquid Phase Plasma)

1.2.2 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายของเมทิลีนบลูด้วยเทคนิคพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลวและตรวจวัดคุณลักษณะของพลาสมาที่สภาวะต่างๆด้วยเทคนิค Optical Emission Microscopy (OES)

1.3.2 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆและนำไปตรวจวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายโดย เมทิลีนบลู ใช้ค่าความยาวคลื่น 628 นาโนเมตร และนำไปสร้างกราฟ Calibration curve

1.3.3 เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 1.5 ppm จากนั้นนำไปบำบัดด้วยพลาสมาโดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

1.3.3.1 เวลาที่ใช้ในการบำบัดพลาสมาในช่วง 0-60 นาที

1.3.3.2 ชนิดของขั้วอิเล็กโทรด คือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง

1.3.3.3 ความถี่ช่วง 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์

1.3.4 ตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสีย้อมด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

1.3.4.1 ตรวจวัดปริมาณการสลายตัวของสีย้อมด้วย UV/VIS Spectrophotometer

1.3.4.2 ตรวจวัด ปริมาณ การเกิด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วย UV/VIS Spectrophotometer

1.3.4.3 ตรวจวัดปริมาณการสลายตัวของสีย้อมด้วยเครื่อง TOC

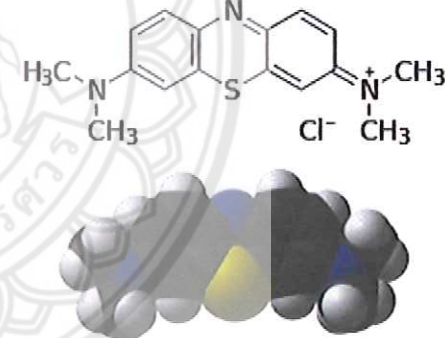
1.3.5 วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมในสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมา

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue) [5]

เมทิลีนบลูเป็นสารประกอบอินทรีย์เคมีที่มีสูตรโมเลกุล $C_{16}H_{18}N_3SCl$ ถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1876 โดยนักวิทยาศาสตร์เคมีชาวเยอรมัน Heinrich Caro ซึ่งมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งด้านเคมีและชีววิทยา ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง ไม่มีกลิ่น เป็นผงสีเขียวเข้ม สามารถละลายได้ในน้ำในอัตราสัดส่วนน้ำ 3 ส่วนต่อเมทิลีนบลู 1 ส่วน มักใช้ในทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นสารสำคัญในระบบทางการแพทย์ แสดงดังในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารเมทิลีนบลู

ชื่อผลิตภัณฑ์	Methylene blue
องค์ประกอบ/ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสม	
สูตร	$C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot xH_2O (x=2-3)$ 
มวลโมเลกุล	319.86 g/mol (ปราศจากน้ำ)
สมบัติทางกายภาพและเคมี	
รูปแบบ	ของแข็ง
สี	สีฟ้าเข้ม
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	โดยประมาณ 3 ที่ 10 g/l 20 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	โดยประมาณ 180 องศาเซลเซียส (สลายตัว)
ความหนาแน่นบัลก์	โดยประมาณ 400-600 kg/m ³
ความสามารถในการละลายน้ำ	โดยประมาณ 50 g/l 20 องศาเซลเซียส และไม่ละลายใน diethyl ether

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารเมทิลีนบลู (ต่อ)

ความเสถียรและความว่องไวต่อปฏิกิริยา	<p>สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง</p> <p>ความร้อนสูง (ก่อให้เกิดการสลายตัว)</p> <p>สารเคมีที่ควรหลีกเลี่ยง</p> <p>สามารถเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับตัวออกซิไดซ์อย่างแรง,เบส,ตัวรีดิวซ์,สารประกอบของโลหะอัลคาไล,สารพวกไอโอไดต์,โปแตสเซียมไดโครเมต</p>
-------------------------------------	--

ที่มา : www.chemdat.info,2014

2.1.1 คุณสมบัติการดูดกลืนแสง

เมทิลีนบลู เป็นสารที่สามารถดูดกลืนความเข้มของแสงได้มากที่สุดที่ 670 nm ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของ เมทิลีนบลู แต่ละตัวนั้นมีค่าแสดงดังในตาราง 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าสมบัติการดูดกลืนแสงของ Methylene Blue

Species	Absorption peak	Extinctioncoefficient (dm ³ /mole·cm)
MB ⁺ (solution)	664	95,000
MBH ²⁺ (solution)	741	76,000
(MB ⁺) ² (solution)	605	132,000
(MB ⁺) ³ (solution)	580	110,000
MB ⁺ (adsorbed on clay)	673	116,000
MBH ²⁺ (adsorbed on clay)	763	86,000
(MB ⁺) ² (adsorbed on clay)	596	80,000
(MB ⁺) ³ (adsorbed on clay)	570	114,000

ที่มา : www.chemdat.info,2014

2.2 การกำจัดสีในน้ำเสีย [1]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม มีหลายวิธีได้แก่วิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อจำกัดคือการนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ก็จะต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิ การสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้มปูนขาว และสารประกอบเหล็ก ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัดกระบวนการเฟนตัน ก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่างและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา การใช้โอโซน ก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ค่าความเป็นกรดต่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ในการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมีมีข้อจำกัด เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในการกำจัดนอกจากจะสิ้นเปลืองแล้วตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากและเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับสีด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีโดยใช้เชื้อราบางชนิด มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม

2.2.1 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม

สีในแหล่งน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

2.2.1.1 สีแท้หรือสีจริง (True color)

สีที่เกิดจากสารต่างๆ ในน้ำ และละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิก และฟัลวิก (Humic acid and Fulvic acid) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต และผลผลิตจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ การกำจัดสีแท้จึงทำได้ยาก

2.2.1.2 สีปรากฏ (Apparent color)

สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา เช่น แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง หรือการตกตะกอน

สำหรับสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ โดยสีแท้มักเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มและอบไม้ยางพารา ส่วนสีปรากฏเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำจาก 2 กรณี คือสีของน้ำเสียเองเนื่องจากการปนเปื้อนมาแต่แรกในน้ำเสีย เช่น สีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้า ฟอกย้อมเยื่อกระดาษ ซึ่งสีที่เกิดขึ้นเป็นสีปรากฏจากสารเคมี ในกระบวนการผลิตรวมทั้งลิกนินและแทนนิน โดยอาจแบ่งประเภทตามการแตกตัวให้ประจุ เส้นใยที่ใช้ย้อมหมู่ช่วยละลาย รวมทั้งโครงสร้างทางเคมีของสี นอกจากนี้สีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียหลังจากการเก็บกัก หรือหลังจากผ่านการบำบัดเช่น ในระบบบำบัดแบบบ่อฝิ่ง (Oxidation pond) ที่อาศัยสาหร่ายให้ออกซิเจน แต่สาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียว เป็นต้น

2.2.2 เทคโนโลยีการกำจัดสี (Color Removal Technology)

2.2.2.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical Technology)

ก. การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาด ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัสดุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน บิโตรเลียมกะลาสาหร่าย เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากชานอ้อย ชี้เสื่อย กระดุกสัตว์เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอับอากาศ และเผาแรงที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุดความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500-1,600 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 ไมครอน ในการกำจัดสีนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในถังรูปทรงกระบอก (Fixed bed system) แล้วปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5-25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถัง และมีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 10-15 นาที ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างมีความพรุนสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงต่างๆ กันทุกทิศทาง ส่วนโมเลกุลที่อยู่บนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์จะถูกกระทำด้วยแรงที่ไม่สมดุล ซึ่งแรงนี้สามารถทำให้สมดุลได้โดยทำให้โมเลกุลอื่นมาเกาะติดที่ผิวสัมผัสด้วยแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) โมเลกุลของสารละลายจะถูกยึดไว้ ในสภาวะที่ความเป็นกรดต่ำจะดูดซับได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีสภาพเป็นประจุบวกอันเนื่องมาจากดูดซับประจุบวกของไฮโดรเจนไว้ ในขณะที่เดียวกันสารคอลลอยด์และสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีมีประจุลบแรงดึงดูดระหว่างกันจึงมีมาก แต่การเกาะยึดกันเป็นแรงอ่อนๆ ดังนั้นสามารถเกิดการเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ทำให้การฟื้นตัวของตัวดูดติดผิวทำได้ง่ายแต่ก็มักเกิดปัญหาสารแขวนลอยติดค้างอุดตัน

ผิวหน้าของชั้นถ่านจนทำให้อัตราการไหลผ่านลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการอัดน้ำล้างเข้าทางด้านล่าง (Backwashing) เมื่อรูปพรุนของเม็ดถ่านจะถูกอุดตัน

ข. การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธีคือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้แก่สีแท้ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรองเป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพการดูดซับสามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาในเตาอับออกซิเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส และผ่านไอน้ำเพื่อเร่งคุณสมบัติของถ่าน การกำจัดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำ โดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสีจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็ม ถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพแต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยมเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 94 สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอินทรีย์เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสีย้อมที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสมากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการกรองผ่านด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดัน ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ

นอกจากนี้ก็มีกระบวนการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แผ่นกรองร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรงแยกสารประจุบวกและประจุลบออกจากน้ำ โดยมีแผ่นกรองที่มีประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้นๆ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นกรอง และขณะเดียวกันก็มีการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองประจุบวกยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปพร้อมกับน้ำส่วนหนึ่ง และแผ่นกรองประจุลบยอมให้สารประจุลบไหลผ่าน โดยน้ำที่มีประจุบวกและประจุ

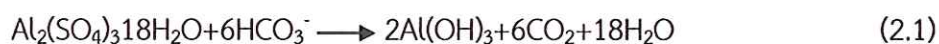
ลบรวมกันแล้วไหลทิ้งออกไป แต่มักเกิดปัญหาตะกอนเกาะติดแผ่นกรองทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก และต้องทำล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งจึงไม่ได้รับความนิยม

ค. เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี

ค.1 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการกำจัดสีแท้และสีปรากฏในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่าง สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือสารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) โดยถ้าโมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte)

การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้างและรวมตะกอน ในขั้นแรกจะเติมปริมาณน้อยเพื่อให้ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) ไปทำลายประจุลบ และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้น จะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆ ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน โดยสามารถละลายน้ำได้ดีถึง 71 ส่วนในน้ำ 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อละลายน้ำจะทำปฏิกิริยาดังสมการ 2.1



จากสมการ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดเหนียวๆ (คล้ายเม็ดแมงลักแต่เล็กกว่า) ไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ และระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพดีที่ความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.0-7.0 ถ้า น้ำมีค่าสภาพต่างต่ำเติมสารส้มมากทำให้สภาพต่างจะถูกทำลายหมด และจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำลดลงจนเป็นกรด ดังนั้นในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเติมต่างไปพร้อมกับสารส้มเพื่อชดเชยซึ่งปริมาณสารส้มที่ต้องใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับลักษณะของน้ำ จึงจำเป็นต้องหาปริมาณที่

ถูกต้องด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (Jar test) โดยการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วเริ่มการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที แล้วเปลี่ยนความเร็วใบพัดมากวนช้า ประมาณ 5-20 นาที และหยุดให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี ทำให้มีกากตะกอน (Sludge) จำนวนมากต้องกำจัดต่อไป สำหรับปูนขาว (CaO) มีประสิทธิภาพไม่เท่าสารส้ม การใช้งานส่วนใหญ่มักจะเติมพร้อมกับสารส้ม เพื่อให้สารส้มตะตะกอนและปูนขาวปรับค่าความเป็นกรดต่างให้กับน้ำ ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปแบบต่างๆไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะมีราคาแพงกว่าสารส้ม และตะกอนของเหล็ก (Fe(OH)_3) ที่เกิดขึ้นอาจจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารพิษ

ง. การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิเดนต์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเพนตัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีแบบรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการลอยตัว (Floatation) ทำให้สามารถกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสี

2.2.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

เทคโนโลยีทางกายภาพ และเคมีเป็นการใช้สารเคมีในการกำจัดสีทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และเกิดตะกอน ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ จึงมีการศึกษาการย่อยสลายโครงสร้างของสีย้อมกลุ่มอะโซ (ประกอบด้วยหมู่ $-\text{N}=\text{N}-$ เกาะกับวงแอมโรแมติก) และแอนทราควิโนน (ประกอบด้วยหมู่ Conjugated aromatics) โดยจุลินทรีย์จำพวกยีสต์ ราและแบคทีเรียที่ย่อยบริเวณหมู่โครโมฟอร์และลดความเป็นพิษของสี นอกจากนี้ ศึกษาการย่อยสีรีแอกทีฟกลุ่มไดอะโซโดยยีสต์ *Candida oleophila* ที่แยกได้จากน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันมะกอก พบว่าการย่อยเกิดได้ดีในช่วง การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในอัตราคงที่ (Exponential growth phase) โดยการย่อยเกิดโดยเอนไซม์ที่มีกิจกรรมคล้ายกับเอนไซม์

อะโซเรดักเตส (Azoreductase) ที่พบในแบคทีเรีย ซึ่งสามารถลดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมได้ เทคโนโลยีทางชีวภาพสามารถนำมากำจัดสีแท้และสีปรากฏจากจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษและอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae adsorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยการดูดซับสีเหล่านั้น ภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี ซึ่งสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสิคจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ โดยสมดุลของการดูดซับ เป็นไปตามทั้งโมเดลของ Langmuir และ Freundlich นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และ กลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยมีปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มข้นแสง ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง และเมื่อนำปฏิกิริยาเฟนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น

2.2.3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

กระบวนการกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยเชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่ม ลิกนินโอไลติก (Ligninolytic enzyme) ย่อยสลายเนื้อไม้โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราขาวหรือทหรือ บราวหรือท (White or brown rot fungi) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ โดยในเนื้อไม้มี องค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ได้ นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคส เพอร์แมงกานีสและ ไฮลาเนสซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดสีโดยย่อยสลายลิกนินในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.0-9.0 นอกจากนี้รา Isolate A19 ที่แยกได้จากเห็ดและรา Isolate B7 ที่แยกได้จากเห็ดและกิ่งไม้ผู้สามารถกำจัดสีและ ลิกนินของน้ำทิ้งในสภาวะที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นอาหาร คาร์บอนและโซเดียมไนเตรตเป็นแหล่งอาหาร ไนโตรเจน ที่ความเป็นกรดต่าง 5 รวมทั้งเชื้อราเส้นใยสีขาว *Datronia sp.* KAPI0039 สามารถผลิต เอนไซม์ย่อยสลายลิกนินแลคเคสและแมงกานีสเปอร์ออกซิเดส ซึ่งทำให้สีรีแอคทีฟของน้ำทิ้งจาก โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอลดลง การใช้ราในการกำจัดสีย้อมผ้าไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากมีข้อด้อยใน ด้านความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่งจึงมีการทดลองนำราชนิด *Lentinus polychrous* Lev. ซึ่งอยู่ในรูปของเส้นใยแห้งที่ได้จากการทำแห้งแบบฟลูอิดไรซ์ (Fluidized bed drying) กำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อม พบว่าสามารถกำจัดสีได้รวมทั้งการทำแห้งเป็น วิธีง่ายและสะดวก อีกทั้งสามารถประหยัดพลังงานทำให้มีต้นทุนต่ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อกิจกรรม เอนไซม์และการเจริญเติบโตได้แก่ สารอาหาร คือ ระดับความเข้มข้นไนโตรเจน และคาร์บอน อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง สารยับยั้ง จากกระบวนการแคทาไลซิส หรือไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ และอ็อกซิเจน ได้แก่ แมงกานีส

2.2.3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสียด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีหลายประเภทโดย Walker & Weatherley (2000) ศึกษาการดูดซับสีกลุ่มแอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 13 19 และ 18 ตามลำดับ และการย่อยสลายสีรีแอกทีฟ Red 2 พบว่า สามารถกำจัดได้ดีโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสี 3 สกุล คือ *Pseudomonas* sp., *Proteus* sp. และ *Klebsiella* sp. นอกจากนี้ศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า กระบวนการบำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลเร่งการกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถขจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหาร ที่จำเป็นต่อการเจริญรวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

2.3 Advanced oxidation process [7]

ปฏิกิริยาเคมีที่มีแสงเป็นตัวกระตุ้น (Photochemical reactions) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) ได้รับความสนใจในประเภทของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes: AOPs) เป็นระยะเวลากว่า 30 ปี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการทำความสะอาดทางเคมีโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ อาทิ เช่น โอโซน หรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษจำนวนมากได้ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสามารถจัดจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะคือการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) และวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) ความแตกต่างของทั้งสองลักษณะนี้คือเป็นระบบเฟสเดียวและเป็นระบบสองเฟสตามลำดับ ส่วนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นกระบวนการแบบวิวิธพันธ์งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้สารกึ่งตัวนำ มีมาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1940s โดย Laider และคณะผู้ซึ่งวิจัยทางด้านปฏิกิริยาเคมีของซิงก์ออกไซด์ ภายใต้การส่องสว่างในระยะเวลาเดียวกัน Mashio และ Kato ได้ศึกษาปฏิกิริยาที่มีตัวออกซิไดซ์ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic oxidantaction) ของแอลกอฮอล์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1971 Honda และ Fujishima ได้ค้นพบสิ่งสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบสารกึ่งตัวนำในปี ค.ศ. 1969 Fujishima และคณะทำการฉายแสงไปยังอิเล็กโทรดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเชื่อมติดอยู่กับอิเล็กโทรดแพลตินัมพบว่าสามารถแยกน้ำให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนได้โดยน้ำถูกออกซิไดซ์และรีดิวซ์ในเวลาเดียวกันและนี่คือการค้นพบที่เป็นเป้าหมายในอนาคตสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ต่อมาไม่นานก็พบว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์เกิดขึ้นได้โดยการฉายแสงที่สอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาคกึ่งตัวนำชนิดต่างๆในปี ค.ศ. 1998 Kraeutler

และ Bard ได้ทำการศึกษาออกซิเดชันของการปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของสารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย เช่น แอลกอฮอล์และกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) ช่วงปลาย ค.ศ. 1980s การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถูกศึกษากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดจนกระทั่งในปี ค.ศ.1990s กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการฉายแสงยูวี (UV/TiO₂) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อทำความสะอาดน้ำเสียที่มีสารมลพิษอินทรีย์โดยใช้ในทางการค้า

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการใช้อย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ของพลาสติกวัสดุเคลือบเส้นใยเทียมวัสดุอิเล็กทรอนิกส์และยางโดยยังสามารถใช้เป็นผงสีที่ให้ความขาวตามพวกผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางค์ที่มีอยู่ในปัจจุบันด้วยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความขาวที่บ่งชี้ด้วยค่าดัชนีหักเหที่สูงมากไม่เป็นที่นิยมนำกลับมาใช้ได้ใหม่หาได้ง่ายราคาไม่แพงซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีประโยชน์หลายอย่างรวมทั้งยังสามารถใช้ได้กับช่วงความเป็นกรด-เบสที่กว้างและสามารถสลายโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ให้เล็กลงได้เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงที่อยู่ในช่วงใกล้ยูวีซึ่งอาจถูกกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ได้เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกฉายแสงจะเกิดชนิดของตัวออกซิไดซ์ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (OH[•]) ซึ่งเป็นอนุมูลที่แรงและมีประสิทธิภาพสูงในการลดมลพิษและตัวรีดิวซ์ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O²⁻) ที่อ่อนกว่าดังนั้นการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีความสามารถรีดิวซ์สารมลพิษที่เป็นพิษ อย่างเช่น ไอออนโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษได้ดี อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างเดียวยังไม่เพียงพอเนื่องจากการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นจึงมีการพัฒนาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ทำเป็นอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, การเจือด้วยโลหะมีสกุล (Noble metal) ไอออนโลหะทรานซิชัน (Transitional metal ion) ไอออนโลหะแรเอิร์ท (Rare earth metal ion) และแอนไอออน, การตกสะสมด้วยโลหะ (Metaldeposition) การเพิ่มตัวกักเก็บอิเล็กตรอนและโฮล (Addition of electron and holescavenger) การทำเป็นวัสดุผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับสีย้อม (Dye sensitized-TiO₂) การปลูกฝังไอออนโลหะ (Metal ion implantation) และการทำเป็นสารกึ่งตัวนำคอมโพสิต (Composite semiconductor) เป็นต้น อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เนื่องจากผลของขนาดทางควอนตัม (Quantum size effects: QSE) อนุภาคนาโนสารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางเคมีและทางอิเล็กทรอนิกส์แตกต่างจากของแข็งขนาดใหญ่หรือโมเลกุลเดี่ยว ดังนั้นจึงจำแนกเป็นวัสดุประเภทใหม่สมบัติของอนุภาคนาโน อาทิ เช่น สมบัติทางแสงสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และสมบัติทางเคมีเด่นชัดตามขนาดของอนุภาคและรูปร่างในหลายๆ กรณีความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และบทบาททางปฏิกิริยาเคมีที่มีแสงเป็นตัวกระตุ้นยังคงไม่เพียงพออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี อาทิ โซล-เจล (Sol-gel) ไฮโดรเทอร์มอล กระบวนการอัลคอกไซด์ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส กระบวนการซอลสเปรย์แคลซิเนชัน (Sol-spraying-calcination) กระบวนการตกตะกอนซึ่งวิธีโซล-เจล มีข้อดีที่โดดเด่นคือได้สารที่อยู่ในระดับนาโนเมตรอีกทั้งมีความบริสุทธิ์สูง มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความสม่ำเสมอส่วนอนุภาคนาโน

โนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาได้จากหลายวิธี เช่น ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โซล-เจลอัลตราโซนิค (Ultrasolgelnic) ซอลโวเทอร์มอล (Solvothermal) ปฏิกิริยาโซลิดเฟส (Solid phase reaction) เฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (Flame spray pyrolysis : FSP) โฟโตดีโพสิชัน (Photo deposition) และอิมเพรคเนชัน (Impregnation) สำหรับอิมเพรคเนชันนั้น เป็นกระบวนการหนึ่งที่ย่างและให้ผลได้ (Yield) ของโลหะที่เจือถึงร้อยละหนึ่งร้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาและพัฒนาปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจลที่ดัดแปรแล้วและเจือด้วยรูทีเนียมโดยวิธีอิมเพรคเนชันโดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

2.3.1 เพื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซล-เจลที่ดัดแปรแล้วและอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยรูทีเนียมโดยวิธีอิมเพรคเนชัน

2.3.2 เพื่อศึกษาและตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางกายภาพของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยรูทีเนียม

2.3.3 เพื่อศึกษาผลรูทีเนียมที่ใช้ในการเจืออนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

2.3.4 เพื่อศึกษาปริมาณการเจือรูทีเนียมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อกิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

กระบวนการการออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดทั่วไปจะเป็นกระบวนการเติมโอโซนซึ่งถือเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process) เพราะสามารถบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้มากกว่าประมาณร้อยละ 60 (Siddiquinceet *al.*,1997) โอโซนที่ใช้บำบัดนั้นได้มาจากการใช้สนามไฟฟ้าไฟฟ้าแรงสูงหรือจากรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านไปยังออกซิเจนโมเลกุล (O_2) จนแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอม (O) จากนั้นออกซิเจนอะตอมที่ได้ก็จะไปรวมตัวกับออกซิเจนโมเลกุลตัวอื่นในบริเวณใกล้เคียงเกิดเป็นโอโซน (O_3) ออกซิไดส์โมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการนี้มักจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลากหลายปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นและคุณสมบัติจำเพาะของสารอินทรีย์ธรรมชาติคุณสมบัติทางเคมีของสารอินทรีย์ในน้ำ เช่น สารโบรมेटและประสิทธิภาพในการถ่ายโอโซน อย่างไรก็ตามกระบวนการการออกซิเดชันโดยการเติมโอโซนนั้นก็สามารถทำให้เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้เช่นกัน

2.4 Fenton Reaction

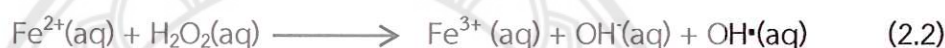
ปฏิกิริยาเฟนตัน เป็นปฏิกิริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1894 จนถึงปี 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกิริยานี้ได้อย่างสมบูรณ์ และนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ และสารเคมีต่างๆที่ได้มาจากยาฆ่าแมลง วัสดุสีย้อม ยาง และพลาสติก รวมทั้งกระบวนการนี้

สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสีย และตะกอน ได้ดังนี้ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction) ลดค่า BOD และ TOC (BOD and TOC removal) ลดกลิ่นและสี (Odor and Color removal) [8]

2.4.1 กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งค้นพบโดย H.J.H Fenton พบว่าศักยภาพของปฏิกิริยานี้มีมากในระดับที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำที่ได้อย่างสมบูรณ์

ปฏิกิริยาเฟนตัน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัสซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังสมการ 2.2

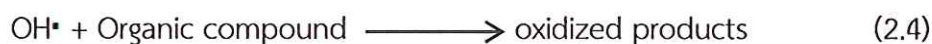


เมื่อปฏิกิริยา (2.2) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้

ปฏิกิริยาต่อมาคือ อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้อิออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังสมการ 2.3

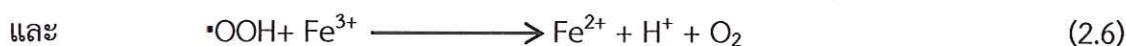


หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายดังสมการ 2.4



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นก๊าซออกซิเจนและอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังสมการ 2.5 และสมการ 2.6





อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อน แต่มีความสำคัญมากในกระบวนการเกิดไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมดและให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นตอนสุดท้าย ปัญหาโดยตรงของปฏิกิริยานี้คือการควบคุมสารเคมี (Reagents) และพีเอช (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น

ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized product) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือ คาร์บอนไดออกไซด์เพราะหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในแง่ของการตรวจสอบสมบัติของน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการตรวจสอบค่า COD หรือค่า TOC ถ้าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากการเกิดปฏิกิริยา คือ คาร์บอนไดออกไซด์แล้วค่า COD หรือค่า TOC ที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยาจะย่อมมีค่าน้อยจนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

2.4.2 ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical Reactivity)

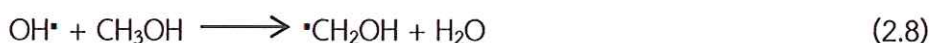
อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) เป็นอนุมูลที่รู้จักกันดีเนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงรองจากฟลูออรีน โดยปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลไฮดรอกซิลแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

2.4.2.1 การรวมตัว (Addition)



โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไม่อิ่มตัว อะลิฟาติกหรืออะโรมาติกแล้วให้อนุมูลของผลิตภัณฑ์ (เช่น Cyclohexadienyl ดังตัวอย่างในสมการข้างต้น)

2.4.2.2 การสลัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction)



อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (Organic free radical)

2.4.2.3 การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer)



อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์

2.4.2.4 การทำปฏิกิริยาซ้ำกันของอนุมูล (Radical interaction)



โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสถานะของปฏิกิริยาที่ถูกปรับเปลี่ยนอยู่ 2 กระบวนการคือ การสกัดไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) และการรวมตัว (Addition) ซึ่งมีผลมากกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ

2.4.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของไอออนเหล็ก (Effect of Iron ion Concentration)

อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นได้น้อยมาก ถ้าหากในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนของเหล็ก เช่น การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำเสียที่มีฟีนอลอยู่โดยที่ไม่มีการเติมไอออนของเหล็กลงไป แต่ถ้าหากมีการเติมไอออนของเหล็กลงไปก็จะเร่งให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น จนถึงที่ความเข้มข้นของเหล็กค่าหนึ่งปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาเฟนตัน

2.4.4.1 ความเข้มข้นของไอออนเหล็กที่จุดเริ่มต้น 3-15 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นต่ำที่สุดที่จะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์

2.4.4.2 สัดส่วนคงที่ของไอออนเหล็กต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (Substrate) เมื่ออยู่สูงกว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา คือ 1 ส่วนของไอออนเหล็กต่อ 10-50 ส่วนของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.4.4.3 สารประกอบของเหล็กที่อิมตัวเป็นสมบัติของคีเลตซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรจะแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อใช้ไอออนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลทั้งนี้ สัดส่วนโดยน้ำหนักของไอออนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ควรอยู่ในช่วง 1 ต่อ 5-25 (wt/wt)

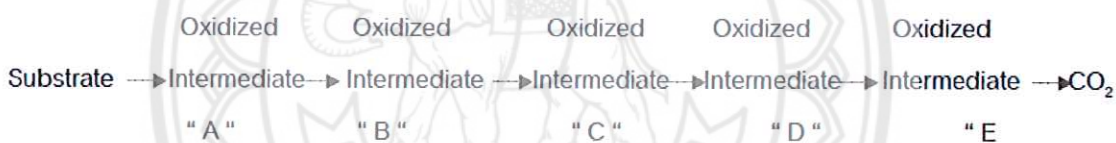
ก. อิทธิพลของชนิดของเหล็กเฟอรัสหรือเฟอริก (Effect of Iron Type)

ในการนำมาประยุกต์ใช้เราไม่สามารถรู้ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แท้จริงเป็นไอออนของเฟอรัส (Fe^{2+}) หรือไอออนของเฟอริก (Fe^{3+}) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทันทีถ้ามีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารอินทรีย์อยู่มากพอ

ข. อิทธิพลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Effect of H₂O₂ Concentration)

การใช้ออกซิไดเซอร์ในการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญมาก ซึ่งสามารถนำมาเขียนปฏิกิริยาอย่างคร่าวๆ สำหรับการบำบัดน้ำเสียในแต่ละชนิด ได้ดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละลำดับที่ต่อเนื่องกันจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาของมันเองโดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของสารประกอบฟีนอลจะมีสารที่ไม่เสถียร (Intermediate) นั่นก็คือ ควิโนน (Quinones) ซึ่งเป็นสารที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยปริมาณที่พอเหมาะจึงจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้นเพื่อให้เลยจุดที่เกิดเป็นสารที่ไม่เสถียร ซึ่งเราจะพบได้ในการบำบัดเบื้องต้นของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนเพื่อช่วยลดความเป็นพิษ ถ้ามีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่า COD ลดลง ความเป็นพิษอาจจะลดลงได้น้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปอีกจะทำให้ความเป็นพิษลดลงอย่างรวดเร็ว



2.4.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิ (Effect of Temperature) อัตราของการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเฟนตันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิน้อยกว่า 20 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 40-50 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากจะมีการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักจะใช้ที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส

2.4.5 หน้าที่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการลดค่า BOD และ COD ในอุตสาหกรรมน้ำเสียมาหลายปีแล้ว เนื่องจากมีสมบัติดังนี้

- ช่วยย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสียเบื้องต้นก่อนที่จะไปสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น ยาฆ่าแมลง สารย้อมสี เรซิน สารทำความเย็น

- ช่วยบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราความเข้มข้นของน้ำเสียมากหรือน้อยในเบื้องต้น ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถทำได้ ก่อนที่จะมีการปล่อยออกไป

- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์ ซึ่งใช้กระบวนการลอยหรือการตกจม

ช่วยทำให้การละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพในขณะที่อุปกรณ์ให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ หรือเกิดภาวะที่ปริมาณของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมากเกินความสามารถของระบบจะรับได้

ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD และ COD แบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

2.4.5.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยตรง (Direct Chemical Oxidation)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้เพียงลำพัง หรือใช้ร่วมกับคะตะลิสต์ซึ่งคะตะลิสต์ที่ใช้ได้แก่ ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+} หรือ Fe^{3+}) แสงอุลตราไวโอเลต (UV) โอโซน (O_3) และพวกแอลคาไล ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยออกซิเดซ์สารประกอบในน้ำเสียทำให้ค่า BOD หรือ COD ในน้ำเสียลดลง

2.4.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกทางกายภาพ (Enhanced Physical Separation)

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการลดค่า BOD/COD สามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ กรณีแรกการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นผลให้สารมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนแล้วตกตะกอนลง และพบว่าเมื่อทำการทดลองโดยการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงไปจะทำให้สารอินทรีย์เกิดการรวมตัวกันและเกิดการตกตะกอนมากขึ้นกว่าเดิม ส่วนกรณีที่สอง เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ละลายน้ำ จะเกิดการแตกตัวไปเป็นก๊าซออกซิเจนและน้ำ เป็นผลให้พวกไขมัน น้ำมัน และจาระบีเป็นสารไม่มีขั้วจึงไม่ละลายซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นของน้ำมันเบาว่าความหนาแน่นของน้ำเพราะฉะนั้นน้ำมันจึงลอยตัวอยู่บนผิวน้ำ จึงทำให้สามารถกำจัดน้ำมันเหล่านี้ได้ง่ายขึ้น

2.4.5.3 การเพิ่มแหล่งผลิตออกซิเจน (Supplemental Qxygen Source)

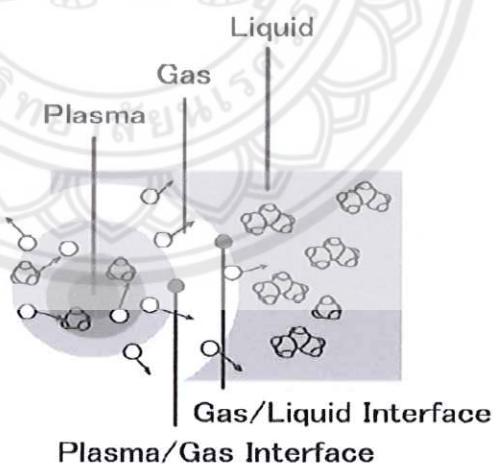
การลดค่า BOD โดยใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะที่ต้องใช้อากาศ (Aerobic biological treatment) จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่การไหลเข้าของน้ำเสีย อัตรา F:M อุณหภูมิ ปริมาณสารอาหาร และความเข้มข้นของค่า DO การบำบัดทางชีวภาพจะง่ายขึ้นถ้ามีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อช่วยเพิ่มการละลายของออกซิเจนในน้ำ ซึ่งทำให้ค่า BOD ในน้ำลดลง แต่เราไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นร้อยละ 100 เนื่องจากการไหลเข้าของน้ำ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และอุณหภูมิกล่าวคือ ถ้าอากาศร้อนการละลายของออกซิเจนในอากาศจะลดลง

2.5 พลาสมาวิญญากาศของเหลว (Liquid Phase Plasma)

2.5.1 หลักการของพลาสมาวิญญากาศของเหลว

พลาสมาวิญญากาศของเหลว คือ กระบวนการผลิตพลาสมาที่ล้อมรอบไปด้วยวิญญากาศของเหลว โดยใช้ความต่างศักย์ของไฟฟ้ามากระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว [9, 10, 11] ข้อดีของพลาสมาวิญญากาศของเหลว คือ สามารถใช้งานได้หลากหลาย เนื่องจากสามารถเลือกชนิดของตัวทำละลายและสารละลายที่ใช้ในการผลิตพลาสมาได้ ในปัจจุบันกระบวนการพลาสมาที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อาทิเช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การดัดแปลงพื้นผิวของโลหะและการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น [4]

รูปแบบการเกิดพลาสมาวิญญากาศของเหลวจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดยพลาสมาจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งถูกล้อมรอบด้วยก๊าซและของเหลว ส่งผลให้เกิดผิวสัมผัสระหว่างสถานะ 2 บริเวณกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง เมื่อถึงจุดที่สารเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคหรือสถานะพลาสมาที่สามารถนำไฟฟ้าได้จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นบริเวณรอบๆ พลาสมา ในขณะที่พลาสมาถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจะทำให้อนุมูลอิสระระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นเกิดการเคลื่อนตัวไปอยู่บริเวณของเหลวที่มีอนุมูลอิสระน้อยกว่าโดยอาศัยหลักการการถ่ายโอนมวล ดังนั้นสารที่อยู่ในวิญญากาศของเหลวจะแพร่เข้ามาแทนที่และถูกกระตุ้นให้แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระต่อไป จากหลักการดังกล่าวส่งผลให้อนุมูลอิสระภายในสารละลายเพิ่มขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาเร็วเกิดขึ้นด้วย [4, 12, 13]



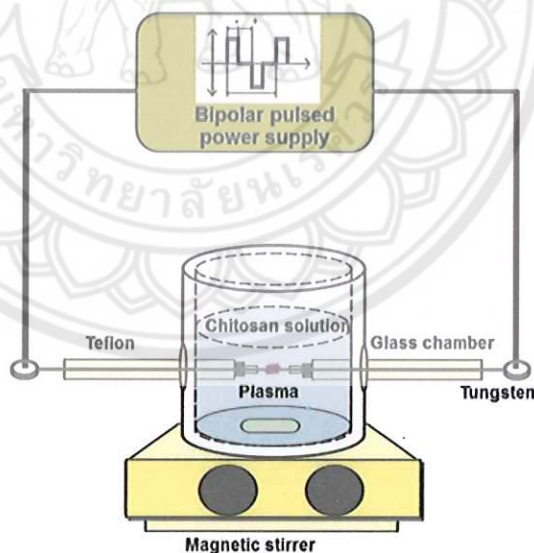
รูปที่ 2.1 แบบจำลองของพลาสมาวิญญากาศของเหลว [4]

ที่มา : O. Takai, Solution plasma processing (SPP)*,

Pure Appl.Chem, 2008;80:2003-2011

2.5.2 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

พลาสมาวิทยุภาคของเหลวสามารถผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเครื่องกำเนิดพลาสมาจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นเพาเวอร์ซัพพลายแรงดันและความถี่สูงระบบกระแสตรง ซึ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ให้กับระบบ โดยมีทิศทางกรไหลของกระแสไฟฟ้าแบบสลับขั้วบวกและลบ (Bipolar pulsed) เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ดังนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้ในเพาเวอร์ซัพพลายที่มีหน้าที่ในการแปลงระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ก่อนที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังถังปฏิกรณ์พลาสมาเพื่อผลิตพลาสมาต่อไป สำหรับองค์ประกอบส่วนที่ 2 คือ ถังปฏิกรณ์พลาสมา โดยทั่วไปแล้วนิยมทำจากแก้วรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-10 เซนติเมตร ซึ่งตำแหน่งด้านข้างทั้ง 2 ด้านของถังปฏิกรณ์จะติดตั้งอิเล็กโทรดที่ทำจากวัสดุทั้งสแตน เหล็กและทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกหุ้มด้วยเซรามิก เพื่อป้องกันความร้อนและการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตพลาสมา ในการผลิตพลาสมาวิทยุภาคของเหลวจะเชื่อมต่อเพาเวอร์ซัพพลายเข้ากับอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน โดยใช้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สูง โดยค่าแรงดันและความถี่ที่ใช้ในการผลิตพลาสมาจะขึ้นอยู่กับ การนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายภายในเครื่องกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 2.2 หลักการของเครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว [4]

ที่มา : O. Takai, Solution plasma processing (SPP)*,

Pure Appl.Chem, 2008;80:2003-2011

พลาสมาสามารถสร้างหมว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยหมว่องไวที่เกิดขึ้นเป็นสารตัวนำไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ไอออนเหล่านี้เรียกว่า หมว่องไว หมว่องไวที่มักเกิดขึ้นระหว่างการบำบัดสารละลายด้วยพลาสมา เช่น Hydroxyl radical (OH \cdot), Hydroperoxyl radical (H $_2$ O $_2\cdot$), Free electron (e $^-$), Superoxide anion (O $^-$) เป็นต้น นอกจากนี้ชนิดของข้อผิดพลาดยังมีผลต่อความสามารถในการสร้างหมว่องไว สีของแสงพลาสมาที่เกิดขึ้นระหว่างข้อผิดพลาดซึ่งอยู่ภายในสารละลายแสดงถึงชนิดของหมว่องไวซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วย Optical Emission Spectrometer (OES) [4]

2.5.3 การประยุกต์ใช้พลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในปัจจุบันพลาสมาวัฏภาคของเหลวได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิ การสังเคราะห์อนุภาคนาโน การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากการบวนการที่สามารถดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้ต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสมาวัฏภาคของแก๊ส [4]

2.5.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในการสังเคราะห์อนุภาคทองขนาดนาโนด้วยพลาสมาจะสังเคราะห์ภายใต้สารละลาย H $AuCl_4$ ซึ่งเป็นสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ (Aqueous Solution) และไม่ใช่ในน้ำ (Nonaqueous Solution) ในระบบเปิด ในกระบวนการสังเคราะห์ จะติดตั้งระบบพลาสมาแรงดัน 2.5 kV ความถี่ 60 kHz และ Pulse width 2 μ s จากการศึกษาพบว่า อนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลวโดยใช้สารละลาย H $AuCl_4$ ความเข้มข้น 0.60 มิลลิโมลาร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงสุด 10.5 ± 3.6 นาโนเมตร จากการศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray analyzer (EDX) และ Infrared Spectroscopy (IR) พบว่าอนุภาคนาโนมีองค์ประกอบของทองและมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยความเข้มข้นของพีคจะสูงขึ้นตามระยะเวลาในการดีสชาร์จ (Discharge time) นอกจากนี้พลาสมาวัฏภาคของเหลวยังสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่เป็นทองให้มีรูปร่างแบบเรขาคณิตที่แตกต่างกันได้ อาทิ สามเหลี่ยมห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยใช้สารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ ดังนั้นการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยวิธีพลาสมาวัฏภาคของเหลวจึงง่ายต่อการควบคุมรูปร่างของอนุภาคนาโนในรูปแบบต่างๆได้ [12]

2.5.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว

ในการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะด้วยพลาสมาจะใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล สารละลายที่ใช้มีค่าความเป็นด่างอยู่ระหว่าง 8 และ 12 จากการศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่มีต่อการปรับปรุงพื้นผิวโลหะ พบว่าช่วงที่ให้ค่าความต่างศักย์ต่ำ 0 ถึง 150 V ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของขั้วแอโนดและแคโทด จากการเพิ่มค่าความต่าง

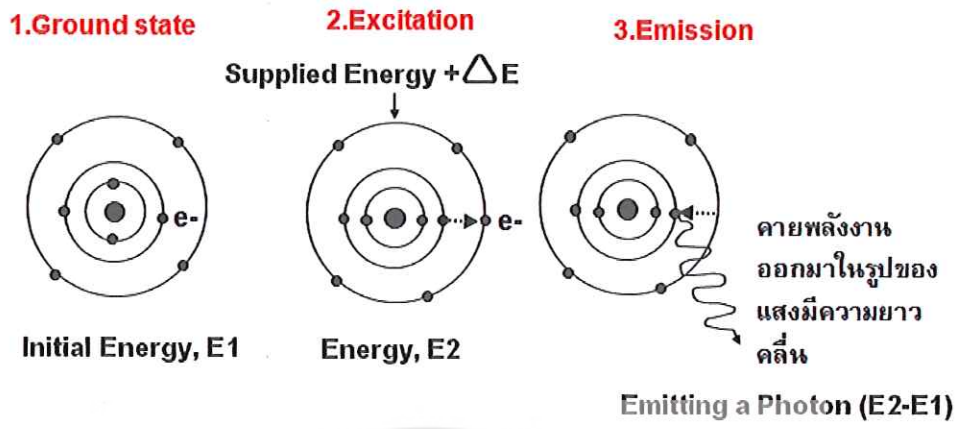
ศักย์มากขึ้น จะสังเกตเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นบนพื้นผิว เมื่อให้ค่าความต่างศักย์มากกว่า 175 V พบว่าพื้นผิวของขั้วแอโนดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นยังพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการพลาสมาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากผลการศึกษาสัณฐานพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ของพื้นผิวโลหะ พบว่าพื้นผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมมีรูพรุนสูง ส่งผลให้มีความแข็งแรงต่ำ ในขณะที่พื้นผิวชั้นในของอะลูมิเนียมจะมีความหนาแน่นของเนื้อโลหะสูงกว่าชั้นนอกและมีความแข็งแรงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวชั้นนอกของอะลูมิเนียมสัมผัสกับพลาสมาได้มากกว่าพื้นผิวชั้นใน ทำให้พื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลว

การบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาจะใช้ค่าความต่างศักย์ 800 V เวลาที่ใช้ในการเปิด-ปิดพัลส์ 40 วินาที และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมา คือ สารละลาย Na_2SO_4 และ CH_3COONa จากการทดลองกับน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรีย *E.Coli* uc 4100 (แบคทีเรียแกรมลบ) และ *Staphylococcus aureus* (แบคทีเรียแกรมบวก) พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาที่เวลาสูงสุด 30 วินาที แบคทีเรียที่อยู่ในสารละลายตายทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าพลาสมาสามารถทำลายแบคทีเรียได้ [4]

2.6 Optical Emission Spectrometer

Optical Emission Spectrometer หรือ OES เป็นเทคนิคการหาชนิดและปริมาณของธาตุ โดยใช้หลักการของการกำเนิดรังสี X-ray โดยที่จะเป็นการวิเคราะห์พลังงานของ X-ray ที่ได้จากผิวของชิ้นงาน ซึ่งในการวิเคราะห์แต่ละครั้งสามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุภายในเวลา 1-2 นาที และวิเคราะห์โดยเมื่อขั้วไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้าจะให้กำเนิดอิเล็กตรอนด้วยกำลังประมาณ 800-1,000 V และตกกระทบผิวชิ้นงาน ผ่านบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน ซึ่งอิเล็กตรอนในอะตอมของชิ้นงานที่มีระดับพลังงานต่ำสุด เรียกว่า Ground state จะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานสูงขึ้น Excited state ซึ่งอะตอมที่อยู่ในสภาวะนี้จะไม่เสถียร จึงพยายามลดพลังงานลงมาโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของแสง (Light Emission) หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัว

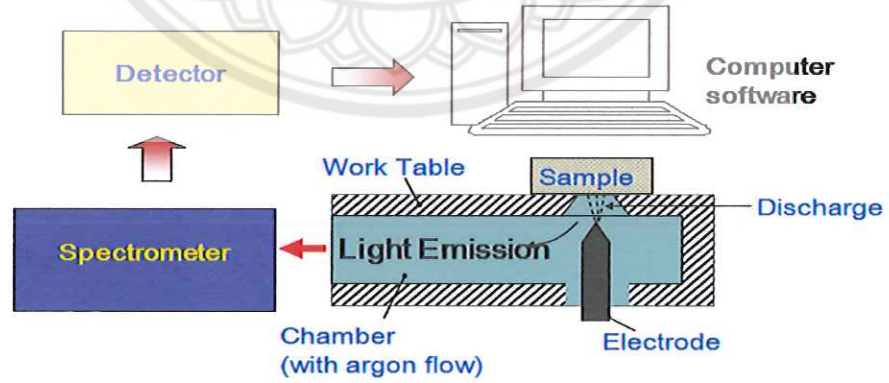
Emission of atom



รูปที่ 2.3 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอะตอม

ที่มา : Sukangkana Lee, Chemical composition analysis, OES, Industrial Materials Testing, 18-24, 2015

แสงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังระบบแยกความยาวคลื่นแสงซึ่งเรียกว่า Spectrometer ซึ่งมีลักษณะเป็นเลนส์นูน และปริซึมสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดการหักเหของแสงเป็น Spectrum จากนั้นแสงที่ถูกแยกความยาวคลื่นแล้วจะถูกส่งไปยัง Detector เพื่อเปลี่ยนความเข้มแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และระบบวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าให้เป็นความเข้มข้นของธาตุ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณของมาตรฐานที่เราทราบความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์และบันทึกไว้



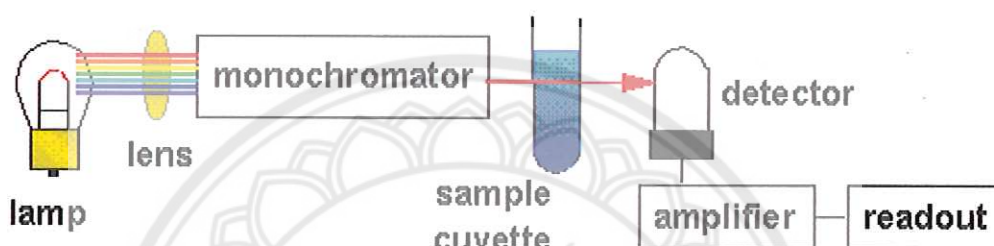
รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงการทำงานของ Optical Emission Spectrometer

ที่มา : Sukangkana Lee, Chemical composition analysis, OES, Industrial Materials Testing, 18-24, 2015

2.7 UV-VIS Spectrophotometer

2.7.1 หลักการของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้



รูปที่ 2.5 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ที่มา : <http://glasswarechemical.com/scientific-instrument,2014>

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.7.2 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

2.7.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วยหลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2.7.2.2 Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติ้ง (Grating)

2.7.2.3 เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง

เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvette) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

2.7.2.4 Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)

2.8 การวิเคราะห์ Total Organic Carbon (TOC)

TOC (Total Organic Carbon) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์ เราสามารถหาปริมาณคาร์บอนประเภทนี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

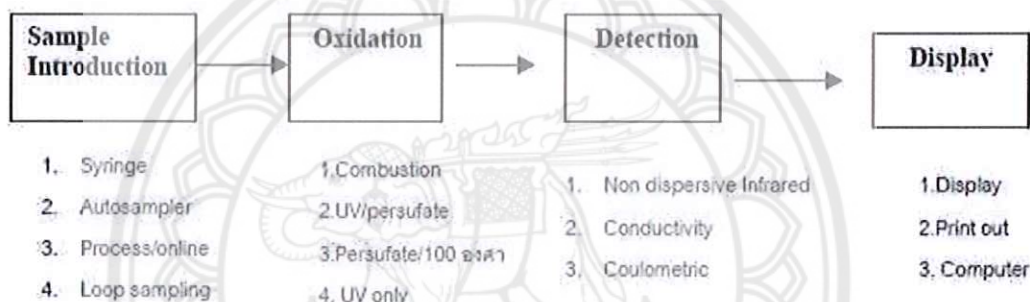
TIC (Total Inorganic Carbon) หมายถึง ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ประกอบอยู่ในสารอนินทรีย์ เราสามารถหาปริมาณคาร์บอนประเภทนี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เช่นกัน คาร์บอนในธรรมชาติจะมีอยู่ด้วยกัน 2 สถานะ คือ อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ โดยทั่วไปคาร์บอนรูปสารประกอบอินทรีย์ จะเป็นคาร์บอนที่พบในผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ หรือได้จากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ หรือได้จากการสังเคราะห์ของมนุษย์ ส่วนคาร์บอนในรูปของสารอนินทรีย์ ที่พบอยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของ CO₃²⁻/ HCO₃⁻ และเมื่อ CO₂ อยู่ในสภาวะกรด CO₂ จะสามารถละลายได้ เครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ หาปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำหรือที่อยู่ในรูปของแข็งมีองค์ประกอบหลักด้วยกันดังต่อไปนี้

2.8.1. Sampling introduction คือ ส่วนนำ สารตัวอย่างเข้าไปในระบบการวิเคราะห์ ได้แก่ Loop sampling, Syringe, Autosampler เป็นต้น

2.8.2 Reaction คือส่วนของการทำ ปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิด แก๊ส mCO_2 หลังจากนั้นทำ การวัด CO_2 ที่ เกิดขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แบ่ง ได้ 2 แบบ คือ ปฏิกิริยา Wet Oxidation และ ปฏิกิริยา Combustion

2.8.3. Detection หรือ Detector คือส่วนที่วัดค่า CO_2 ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาหรือ อ่านค่าของความเป็นกรดที่เกิดขึ้นซึ่งมี Detector ให้เลือกหลายแบบ เช่น Detector แบบ NDIR (Non dispersive Infrared) ใช้วัด CO_2 หรือ Columetric ใช้วัดค่าความเป็นกรด เป็นต้น

2.8.4. Display คือส่วนรายงานผลของข้อมูลการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถรายงานอยู่ในรูปของ รายงานต่างๆ เช่น เป็นข้อมูลต่างๆ เป็นกราฟได้เป็นต้นหรือบันทึกข้อมูลต่างๆ



รูปที่ 2.6 รูปแบบเครื่องมือของเครื่องวิเคราะห์ TOC

ที่มา : <https://sites.google.com/site/bmsanalyzer/home/analyzer/toc>

2.9 การสำรวจเอกสารงานวิจัย

ในปี ค.ศ.2002 AntoTri Sugiarto และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการสลายสีย้อมในน้ำด้วยเทคนิค pulsed discharge plasma โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรด 2 ชนิดคือ แบบเข็มและแบบแผ่น ซึ่งจะใช้ระบบปฏิบัติการ 3 ระบบ ด้วยกัน คือ streamer mode spark mode และ spark-streamer mixed mode โดยทำการทดลองกับสีย้อม 3 ชนิด คือ Rhodamine B Methyl Orange และ Chicago Sky Blue ที่ความเข้มข้น 0.01 g/l และ 0.05 g/l จากการศึกษาพบว่า กระบวนการสลายสีย้อมด้วย Spark-streamer mixed mode มีประสิทธิภาพมากที่สุด และอัตราการสลายสีย้อมขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารตัวอย่างด้วย โดยค่า pH ต่ำจะให้อัตราการกำจัดสีที่สูงกว่าสารตัวอย่างที่มีค่า pH สูง และพบว่า มี H_2O_2 เกิดขึ้นภายหลังการบำบัด

ในปี ค.ศ. 2002 Claudio และคณะ [17] ได้ศึกษาเทคนิค HPLC/UV-VIS diode และ เทคนิค HPLC/MS (Sulfonated azo dyes) ซึ่งสีย้อมที่นำมาทดสอบคือ Methyl orange โดยการทดสอบการสลายสีย้อมด้วย TiO_2 20 mgL^{-1} ของ Methyl orange และ 600 mgL^{-1} ของสารกึ่งตัวนำ

ซึ่งสารกึ่งตัวนำจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในรูปแบบการออกซิไดซ์จากนั้นทำทดสอบโดยการฉายรังสีตั้งแต่เวลา(5 10 15 22 27 37 นาที) และจากการทดสอบพบว่า Methyl orange จะสลายตัวได้ดีในเวลาที 0 5 10 22 และ 27 นาที ตามลำดับและยังพบอีกว่าเทคนิค HPLC/MS เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการสลายสีของ Methyl orange

ในปี ค.ศ. 2010 Fangmin Huang และคณะ [18] ได้ศึกษาการสลาย Methylene Blue ด้วยเทคนิค Dielectric barrier discharge โดยใช้ Methylene Blue ที่ความเข้มข้น 100 mg/L มาบำบัดด้วย Dielectric barrier discharge reactor ที่แรงดันไฟฟ้า 22 kV และความถี่ 10.5 kHz จากการศึกษาพบว่าอัตราการสลาย Methylene Blue เพิ่มขึ้นในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง และมีอัตราการสลายตัวของ Methylene Blue ในสภาวะที่เป็นกลางต่ำ และพบว่าในระหว่างทำการทดลองเกิดหมู่ว่องไวไฮดรอกซิล (OH) เกิดขึ้น ซึ่งการเกิดหมู่ว่องไวเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการสลาย Methylene Blue

ในปี ค.ศ. 2012 P.Manoj Kumar Reddy และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาการสลาย Methylene Blue ในน้ำเสียด้วยเทคนิค Dielectric barrier discharge โดยใช้ความเข้มข้นของ Methylene Blue ที่ 50-100 mg/L โดยทำการศึกษาวัดอัตราการสลาย Methylene Blue การเกิด H_2O_2 และสารต่างๆ และวัดประสิทธิภาพในการสลาย Methylene Blue ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการสลาย Methylene Blue จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ความเข้มข้นของ Methylene Blue เท่ากับ 100 mg/L และมีการเกิดขึ้นของ H_2O_2 หมู่ว่องไวไฮดรอกซิล (OH) และโอโซน (O_3) และพบว่าจลนพลศาสตร์การสลาย Methylene Blue เป็นไปตาม 1st Order kinetics

ในปี ค.ศ. 2012 Bo Jiang และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการสลายสีของ Methylene Blue โดยใช้ Circulatory airtight reactor ด้วยเทคนิค Non-thermal plasma advance oxidation process โดยสารสีที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองคือ Methyl Orange ที่ความเข้มข้น 40-80 mg/L โดย Reactor จะถูกตั้งค่าต่างๆดังนี้ แรงดันไฟฟ้า 0-60 kV และช่วงความถี่ 0-320 Pulses/second (pps) และมีการป้อนสารละลาย Methyl Orange เข้าสู่ reactor ที่ 60 ml/min ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราการสลาย Methyl Orange นั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นตั้งต้นและปริมาณของสารประกอบทั้งหมด อีกทั้งประสิทธิภาพในการสลายขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการป้อน O_2 และพบว่า Methyl Orange ถูกสลายไปกว่า 92% ใน 20 นาที ที่อัตราการไหลของกระแสก๊าซเข้าที่ $0.08 m^3/h$ และมีการให้พลังงาน reactor ที่ 5.67 W

ในปี ค.ศ. 2012 Bruno Mena Cadornin และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการสลาย Methylene Blue ในน้ำ ด้วยวิธี Non-thermal plasma (NTP) ถูกทดสอบโดยใช้ก๊าซ 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน อาร์กอน และ ออกซิเจนโดยมีการเสนอการใช้แร่ Pyrite จากสารละลายของ Methylene Blue เพราะแร่ Pyrite จะสร้าง H_2O_2 และ OH กับน้ำ ดังนั้นแร่ Pyrite จึงสามารถใช้เป็น Catalyst ร่วมกับเตาปฏิกรณ์ของ NTP ได้ จากนั้นทำการทดสอบ Methylene Blue ที่ความเข้มข้น 20 mg/L ที่ค่า pH 5.4 และค่า Conductivity $14 \mu S(m^{-1})$ ในช่วงระยะเวลาการบำบัด 60 นาทีและใช้ความ

ยาวคลื่นในการดูดซึม 664 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ในการตรวจสอบและจากการศึกษาพบว่าก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเตาปฏิกรณ์ของ NTP สูงมากและแร่ Pyrite ยังช่วยลดประสิทธิภาพในการสลาย Methylene Blue อีกทั้งยังพบว่าหลังจาก 60 นาทีของการบำบัด มีแร่ Pyrite ถูกเพิ่มขึ้นในเตาปฏิกรณ์ของ NTP มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก (70% ใน 30 นาที) ของการบำบัดอีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2013 Xuegang Luo และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการสลายของ Methylene Blue โดยการใช้ Thermocatalytic ที่เร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำโดยทดสอบที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือ 10 20 30 40 และ 50 mg/L และที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า การดูดซับทาง Thermocatalytic ในกระบวนการการย่อยสลายสามารถดูดซับได้สูงสุดถึง 82.07 % ซึ่งสามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิในที่มืดได้และตามผลการทดลองอัตราการสลายตัวใน reactional ยังคล้ายกับ Langmuir-Hinshelwood และยังถูกค้นพบว่า Thermocatalytic ช่วยลดประสิทธิภาพของ Methylene Blue ได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 2013 Martynas Tichonovas และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการสลายสีย้อมผ้าในน้ำเสียด้วยเทคนิค Dielectric Barrier Discharge plasma treatment ซึ่งสีย้อมที่นำมาศึกษาได้รับจากกลุ่มอุตสาหกรรม 13 ชนิดโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มคือ Astrazon Lanaset Optilan และ Realan ที่มีความเข้มข้น 50 mg/L ซึ่งได้ทำการสลายสีย้อมทั้งหมดนี้ด้วย DBD plasma semi-continuously operated reactor โดยในการศึกษาการสลายสีย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ การเตรียมตัวอย่างน้ำที่จะใช้ในการทดลอง การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ปริมาณ O_3 ที่เกิดขึ้น ค่าสื่อนำไฟฟ้าและค่า pH ของตัวอย่างน้ำเสีย ปริมาณสารตกค้าง ปริมาณการสลายของสีย้อม เป็นต้น และการออกแบบการทดลอง โดยจะนำมาวัดผลต่อในเรื่องของปริมาณ O_3 ที่เกิดขึ้น คุณสมบัติที่เกิดขึ้นภายหลังการสลายสีย้อมด้วยเทคนิค DBD และการทดสอบความเป็นพิษของน้ำตัวอย่าง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า Astrazon Brilliant Red เป็นสารสีที่สลายออกไปได้มากที่สุด แต่ Lanaset Yellow Optilan Yellow และ Optilan Red เป็นสารสีที่มีการสลายสีน้อยที่สุด อีกทั้งยังพบว่าสารตกค้างที่ยังคงเหลืออยู่คือ Carboxylic acids Nitrates Amides และ Amines ในด้านการทดสอบความเป็นพิษหลังการบำบัดพบว่า Astrazon Brilliant Red มีความเป็นพิษน้อยที่สุดหลังผ่านการบำบัด

ในปี ค.ศ. 2014 Yanping Jin และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการสลาย Methylene Blue และ Methyl Orange ในน้ำเสีย ด้วยเทคนิค Pulsed discharged plasma โดยสารสีที่ใช้ในการทดลองคือ Methylene Blue และ Methyl Orange ที่มีความเข้มข้น 1.4×10^{-6} M โดยทำการศึกษาผลการตอบสนองต่อผิวของสารตัวอย่างเพื่อวัดประสิทธิภาพของการสลายสีย้อมทั้ง 2 ชนิดภายใต้เงื่อนไขต่างๆ จากการศึกษาพบว่า Methylene Blue ถูกสลายไปกว่า 94.5% และ Methyl Orange ถูกสลายไปกว่า 80.2% และยังทราบว่าเทคนิค Pulsed discharged plasma oxidation process นั้นช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการบำบัดน้ำเสีย

ในปี ค.ศ. 2014 Qian Wang และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาในการสลายสีย้อมของ Methylene blue โดยทดสอบด้วยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ต่างกัน ที่มีชื่อว่า Fe(II)Fe(III)-LDHs ในอัตราส่วน $[Fe^{2+}]/[Fe^{3+}] = 1:0$ ที่ความดันบรรยากาศ ที่ Methylene blue 10 mg/L ในเวลา 1 ชั่วโมง และจากการทดสอบพบว่า Fe(II)Fe(III)-LDHs ประสบความสำเร็จในการนำมาใช้ในกระบวนการ Fenton และภาพที่ได้จาก SEM และ BET ซึ่งให้เห็นว่า Fe(II)Fe(III)-LDHs จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ที่ความดันบรรยากาศของพื้นที่ $123 \text{ m}^2/\text{g}$ ในกระบวนการ Fenton Methylene blue 10 mg/L สามารถเปลี่ยนสีใน เวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขที่เป็นกรดและเป็นกลางได้ดีที่สุด



บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

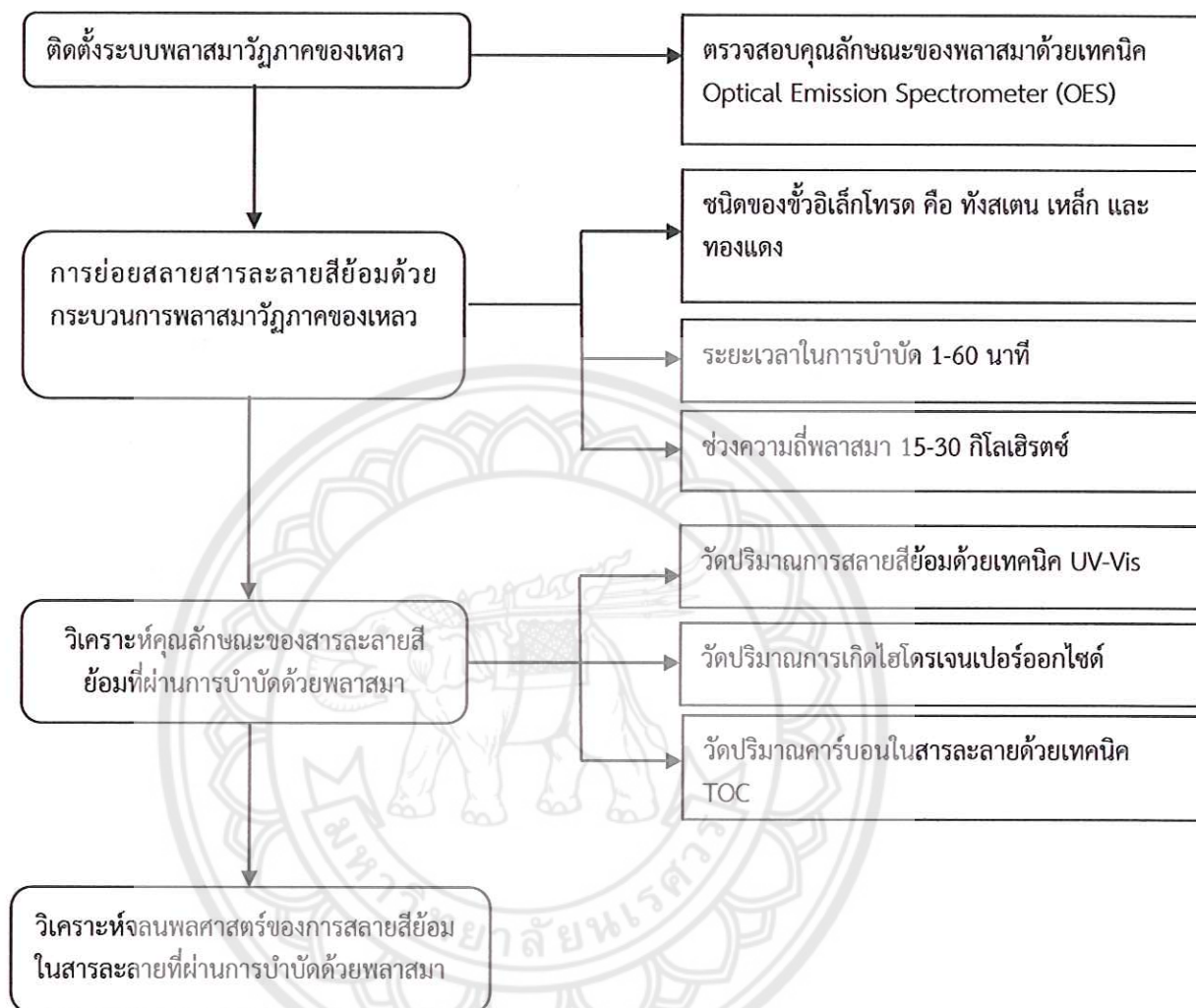
- 3.1.1 เมทิลีนบลู (Methylene Blue)
- 3.1.2 น้ำกลั่น
- 3.1.3 สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10%W/V

3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่องกำเนิดพลาสมาวิทยุภาคของเหลว
- 3.2.2 ขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง
- 3.2.3 เครื่องวัดปริมาณการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer)
- 3.2.4 Optical Emission Spectroscope (OES)
- 3.2.5 เครื่องปั่นกวนสาร (Magnetic stirrer)
- 3.2.6 เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.2.7 Cuvette ขนาด 3.5 มิลลิเมตร

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

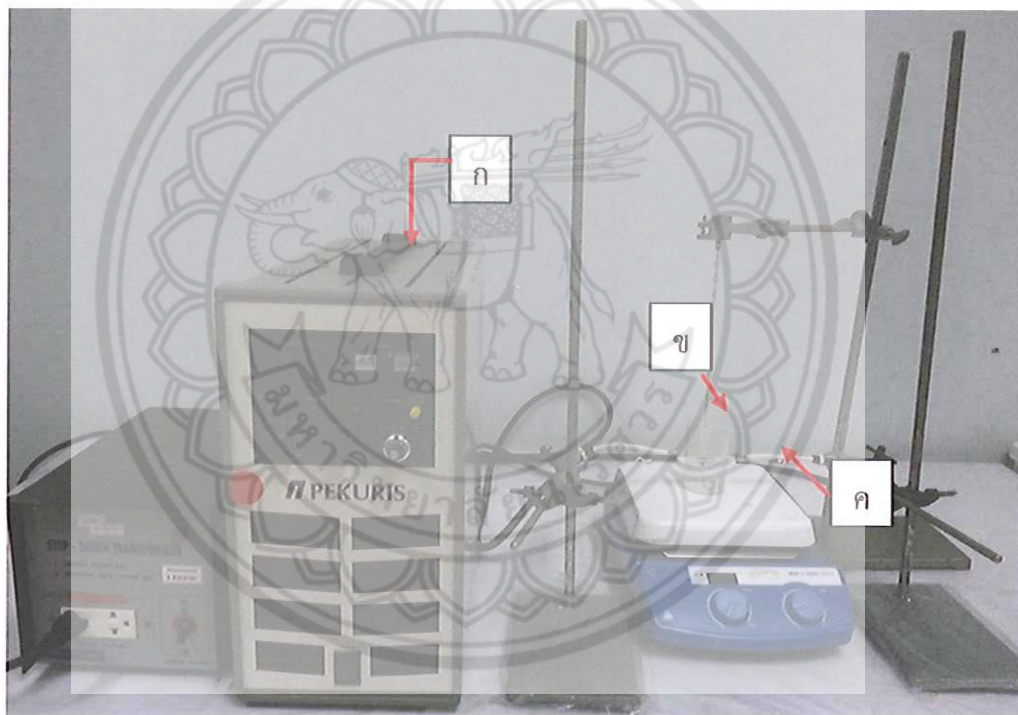
ในการศึกษาการสลายสีย้อม เมทิลีนบลู มีขั้นตอนการดำเนินงานดัง แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การติดตั้งระบบพลาสมาวินิจฉัยภาคของเหลวและการตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสมา

การติดตั้งระบบของเครื่องกำเนิดพลาสมาวินิจฉัยภาคของเหลวแสดงดังรูป 3.2 พลาสมาจะถูกผลิตขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาที่ทำจากแก้ว โดยเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดแบบเข็ม (Needle electrodes) ซึ่งทำจากวัสดุชนิดต่างๆ คือ ทังสเตน เหล็ก และทองแดง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดประมาณ 0.2 มิลลิเมตร ในการผลิตพลาสมาจะเชื่อมต่ออิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับเพาเวอร์ซัพพลายระบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ ในการตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสมาจะใช้เทคนิค Optical Emission Spectrometer (OES) โดยนำหัววัดจุ่มลงในสารละลายสีย้อมขณะทำการบำบัดด้วยพลาสมาเพื่อวัดระดับการเปล่งแสง ผลที่ได้จากการวัดจะแสดงในรูปของกราฟแสดงพีคในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงเพื่อระบุชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการพลาสมา



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กำเนิดพลาสมาวินิจฉัยภาคของเหลว

- ก. เพาเวอร์ซัพพลาย
- ข. ถังปฏิกรณ์พลาสมา
- ค. ขั้วอิเล็กโทรด

3.3.2 การย่อยสลายสารละลายสีย้อมด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

เตรียมสารละลาย เมทิลีนบลู โดยเติมผงเมทิลีนบลูในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตรและปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนสาร (Magnetic stirrer) จนเป็นสารละลายความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 75 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเตรียมสารได้ตามความเข้มข้นที่ต้องการ จำเป็นต้องนำไปปรับค่าการนำไฟฟ้าด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จนมีค่าการนำไฟฟ้า 1000 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (Microsiemens per cm, $\mu\text{S/cm}$) จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ปริมาณ 120 มิลลิลิตร มาทำการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ในการบำบัดด้วยพลาสมาจะใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกัน 3 ชนิดคือ ทังสเตน เหล็ก และทองแดง ระยะเวลาในการบำบัดใช้เวลา 1-60 นาที ความต่างศักย์ในการผลิตพลาสมา 2-3 กิโลวัตต์ (kV) ความถี่ 15-30 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) และ Pulse width 3 ไมโครเซคคัน (μs) ในระหว่างการย่อยสลายสารละลายสีย้อมด้วยพลาสมาจะทำการปั่นกวนสารด้วยอุปกรณ์ผสมสาร (Magnetic stirrer) เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันระหว่างสารละลายสีย้อมกับพลาสมา และดูดสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวทุกๆ 10 นาที เพื่อนำไปตรวจวัดคุณลักษณะต่างๆต่อไป

3.3.3 การวัดปริมาณการสลายสีย้อมด้วยเทคนิค UV-Vis

นำสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวมาวัดปริมาณการสลายสีย้อมด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer โดยก่อนการตรวจสอบต้องนำสารละลายที่ผ่านการบำบัดมาลดความเข้มข้นลงจนมีค่าความเข้มข้นต่างๆในช่วงของกราฟมาตรฐานก่อนนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และนำไปตรวจวัดโดยตั้งค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย เมทิลีนบลู ที่ความยาวคลื่น 668 นาโน ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานจากสารละลายเมทิลีนบลูมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นสารละลายสีย้อมหลังจากผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ดังสมการ (3.1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อม} = \frac{\text{ปริมาณความเข้มข้นสารตั้งต้น} - \text{ปริมาณความเข้มข้นสารที่เหลือ}}{\text{ปริมาณความเข้มข้นสารตั้งต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.3.4 การวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นำสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นเวลา 60 นาทีมาวัดปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยนำสารละลายที่ผ่านการบำบัดปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับไทเทเนียมซัลเฟตปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมน้ำจนได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐาน

เพื่อหาปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายหลังจากผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเนื่องจากขณะการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว หมู่ว่องไวไฮดรอกซิลอาจเกิดการรวมตัวระหว่างหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลเกิดเป็นสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เป็นตัวขัดขวางการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

3.3.5 การวัดปริมาณคาร์บอนในสารละลายด้วยเทคนิค TOC

นำสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมาวิทยุภาคของเหลวเป็นเวลา 60 นาทีโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดง วัดปริมาณการเกิดคาร์บอนด้วยเครื่อง TOC โดยนำสารละลายที่ผ่านการบำบัดปริมาตร 30 มิลลิลิตร เพื่อหาปริมาณการเกิดคาร์บอนที่เกิดขึ้นในสารละลายหลังจากผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว ซึ่งสารประกอบคาร์บอนในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีการจับตัวกับสารประกอบตัวอื่นที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

3.3.6 วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมในสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วยพลาสมา

การศึกษาจลนพลศาสตร์และอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลู ทำได้โดยการนำผลของค่าความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis มาคำนวณดังสมการ 3.2 [19]

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -k_1 t \quad (3.2)$$

- เมื่อ C_t = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านการบำบัดที่เวลาใดๆ
 C_0 = ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมตั้งต้น
 k_1 = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min^{-1})
 t = เวลาที่ใช้ในการบำบัดด้วยพลาสมา (min)

จากนั้นทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ผ่านการบำบัดที่เวลาใดๆต่อค่าความเข้มข้นของละลายสีย้อมตั้งต้น ซึ่งความชันที่ได้บอกถึงค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลู

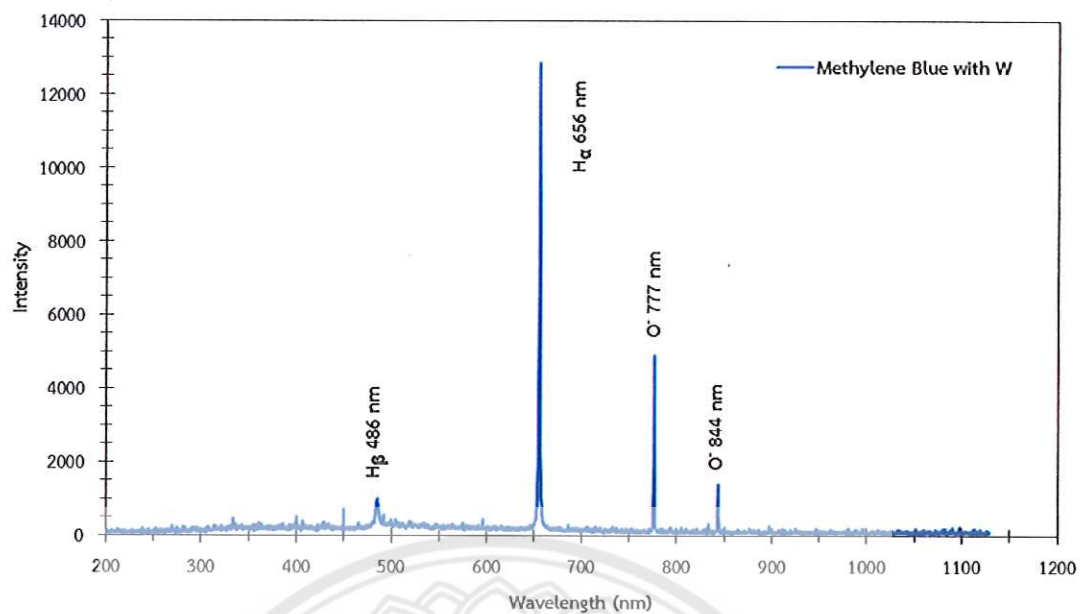
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

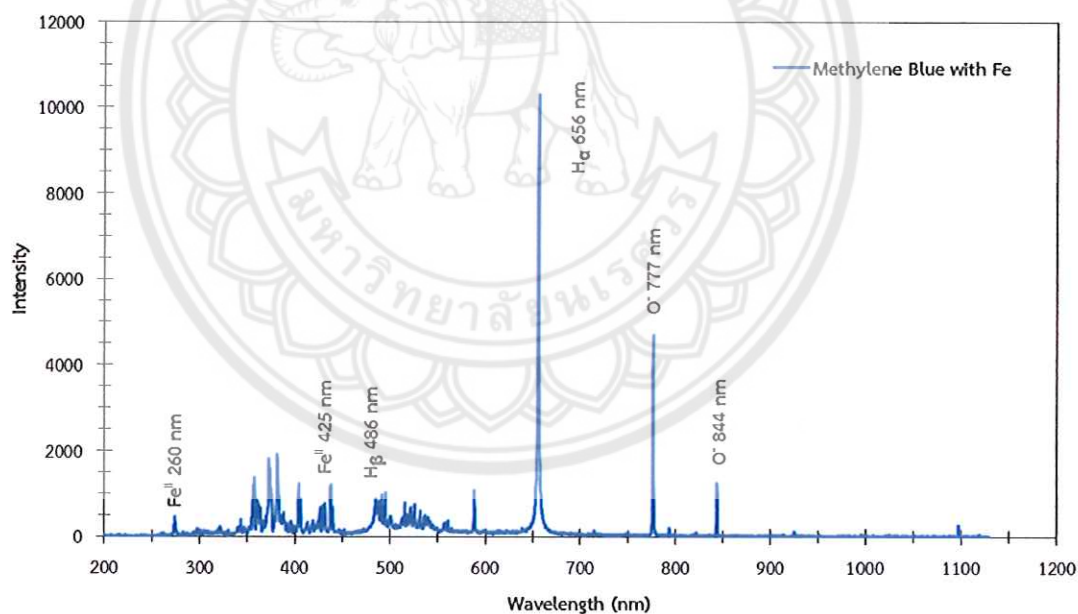
จากการศึกษาผลของสภาวะพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่มีต่อการย่อยสลายเมทิลีนบลู ใน การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลู คือชนิดของขั้วอิเล็กโทรด 3 ชนิด ได้แก่ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 0.5 1.0 1.5 75 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย 0 ถึง 60 นาที และการปรับความถี่ของเครื่องกำเนิด พลาสมาที่ 15 22.5 และ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยภายหลังจากการทำทดลองแล้วได้นำผลที่ได้ไป ทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.1 คุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดของจากขั้วอิเล็กโทรดแต่ละชนิด

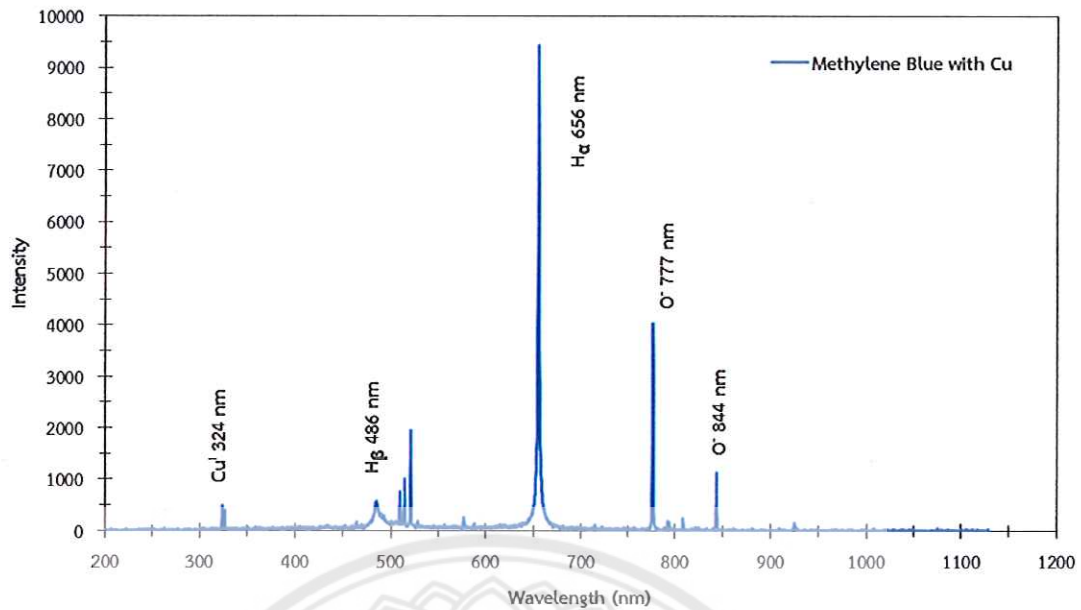
จากการศึกษาคุณลักษณะของพลาสมาที่ได้หลังจากผ่านการบำบัดด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิด คือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ที่แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมของหมู่ไอออนที่เกิดขึ้นภายในระบบการ บำบัดด้วยพลาสมาวัฏภาคของเหลวที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงต่างๆของขั้วอิเล็กโทรดที่เวลาการ บำบัด 5 นาที โดยเมื่อใช้ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนพบว่าหมู่ไอออนที่เกิดจากการดิซซาร์จของพลาสมาวัฏ ภาคของเหลวพบหมู่ไอออนในสารละลายคือ $H\beta$ $H\alpha$ และ O^- พบที่ความยาวคลื่นแสงที่ 486 นาโน เมตร 656 นาโนเมตร 777 นาโนเมตร และ 844 นาโนเมตร ตามลำดับ และพบได้ในระบบบำบัดด้วย ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิด [24] ดังรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 เนื่องจากในสารละลายเมทิลีนบลูมี ส่วนประกอบของน้ำ เมื่อเกิดการดิซซาร์จด้วยพลาสมาเกิดขึ้นส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการแตก ตัวออกเป็นหมู่ไอออนของไฮโดรเจน และหมู่ไอออนของออกซิเจน ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการสลายสีย้อม เมทิลีนบลู [25]



รูปที่ 4.1 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากขั้วอิเล็กโทรดเหล็กที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

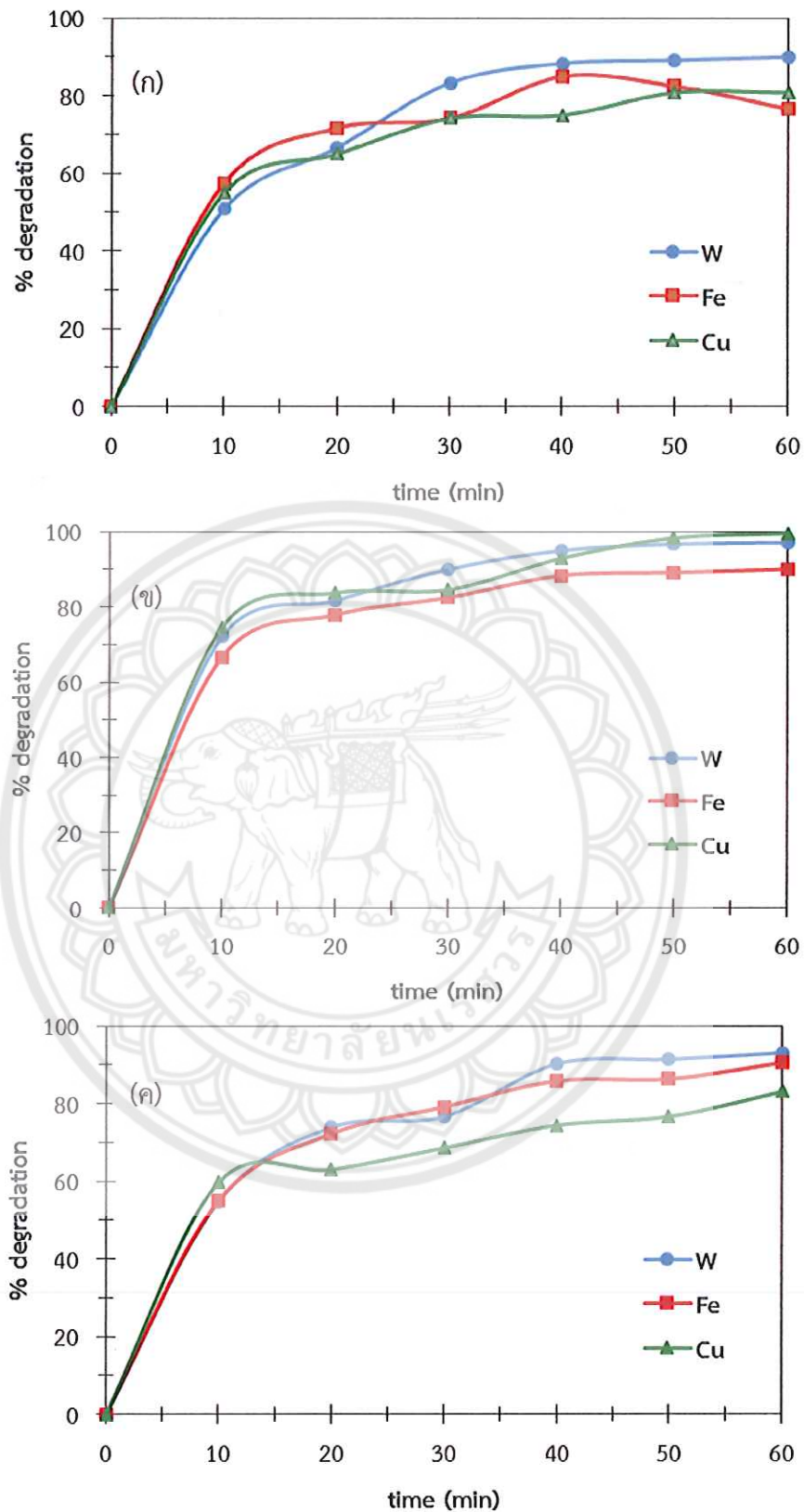


รูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของพลาสมาที่เกิดจากข้ออิเล็กโทรดทองแดงที่ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

และเมื่อใช้ข้ออิเล็กโทรดเหล็กพบว่ามีการเกิดขั้วไอออน Fe^{II} ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร และ 425 นาโนเมตร และเมื่อใช้ข้ออิเล็กโทรดทองแดงพบว่ามีการเกิดขั้วไอออน Cu^I ที่ความยาวคลื่น 324 นาโนเมตร เนื่องจากข้ออิเล็กโทรดทั้งสองชนิดสามารถแตกตัวเป็นขั้วไอออนโลหะไอออนต่างๆได้ดีจึงมีการแสดงอยู่ของขั้วไอออน Fe^{II} และ Cu^I ในระบบการบำบัด แต่เมื่อใช้ข้ออิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสพบว่าไม่เกิดขั้วไอออนของทั้งสแตนเลสเนื่องจากความต้านทานการแตกตัวของข้ออิเล็กโทรดทั้งสามชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งทั้งสแตนเลสที่มีความต้านทานสูงที่สุดจึงไม่พบการเกิดขั้วไอออนดังกล่าวในระบบ [26] ดังนั้นจากผลการตรวจสอบคุณลักษณะของพลาสมาด้วยเทคนิค OES สำหรับกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลว สามารถสรุปได้ว่า พลาสมามีคุณสมบัติที่สามารถทำให้เกิดขั้วไอออนเหล่านี้ได้ ซึ่งขั้วไอออนบางตัวนั้นมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอื่นๆ ที่ได้จากการทดลองในการย่อยสลายเมทิลีนบลูต่อไป

4.2 ผลของชนิดอิเล็กโทรดที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายสีข้อมเมทิลีนบลู

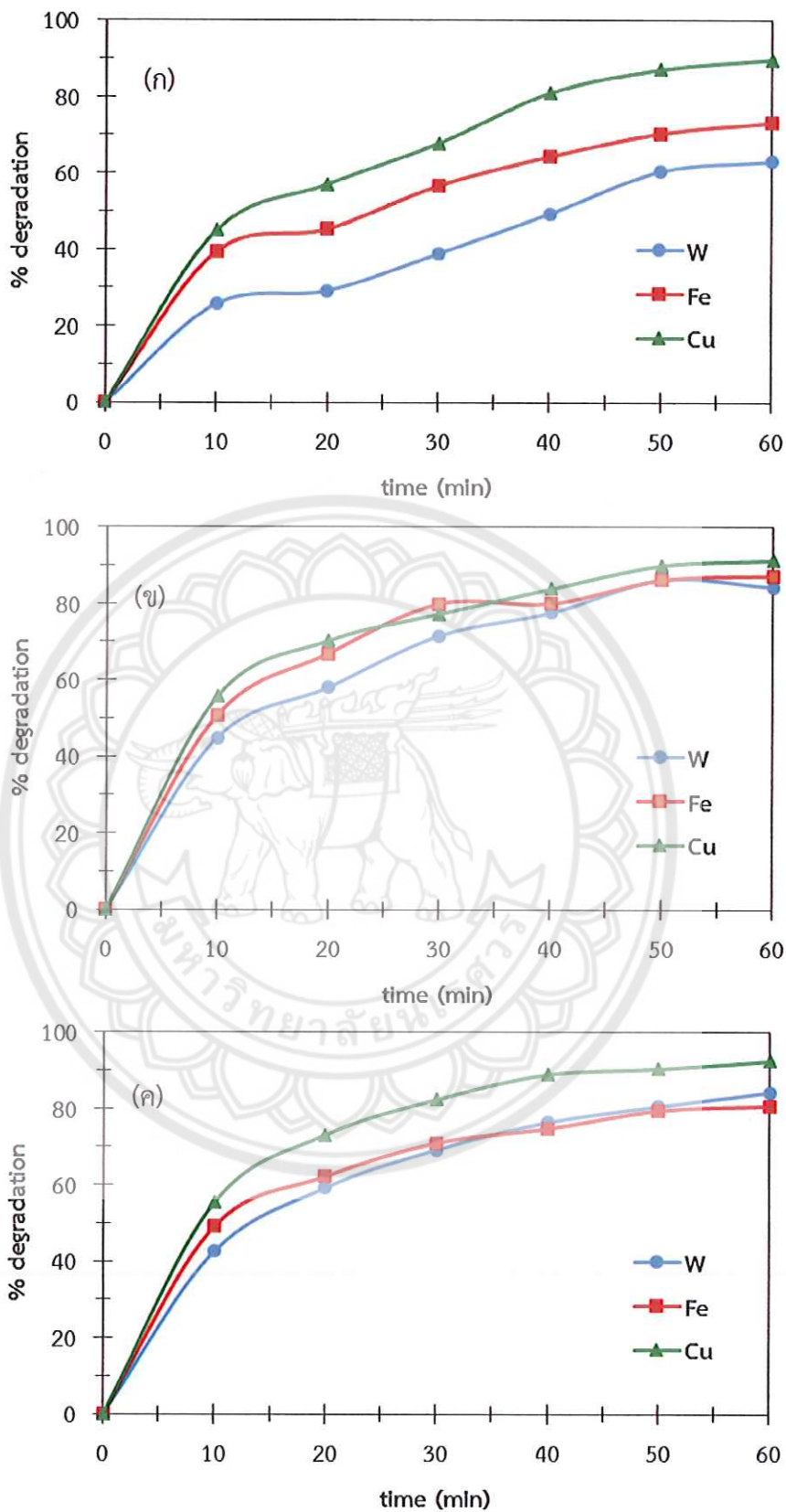
จากการศึกษาอัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่ำของข้ออิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ สแตนเลส เหล็ก และทองแดง ที่ค่าความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ หลังผ่านการบำบัด 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวัฏภาคของเหลวจากการใช้ข้ออิเล็กโทรดทั้งสามชนิดไม่มีผลต่อกระบวนการสลายสีข้อมเมทิลีนบลู เนื่องจากความเข้มข้นของ เมทิลีนบลูที่น้อยทำให้เกิดการสลายตัวไปได้เร็วโดยใช้ช่วงเวลาในการบำบัดสั้นๆ จึงไม่สามารถบอกได้ถึงความแตกต่างในการบำบัดเมทิลีนบลูได้ ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ข้ออิเล็กโทรดชนิดใดก็ได้ในการบำบัด



รูปที่ 4.4 ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นต่ำด้วยขี้เถ้าไฟฟ้าชนิดที่ความถี่ 15 กิโลเฮิรตซ์ ก) 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ข) 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค) 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาวิจัยการย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นสูงของซั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ที่ค่าความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ หลังผ่านการบำบัด 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าชนิดของซั้วอิเล็กโทรดมีผลมากขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดเจน โดยทองแดงมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อเทียบกับซั้วอิเล็กโทรดอีกสองชนิด ซึ่งที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 75 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสลายตัวของเมทิลีนบลูร้อยละ 89.65 ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสลายตัวของเมทิลีนบลูร้อยละ 91.24 และที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 125 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสลายตัวของเมทิลีนบลูสูงที่สุดถึงร้อยละ 92.41 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากทองแดงมีความเหมาะสมกับระบบการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูจึงทำให้สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดี ซึ่งทองแดงสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นอะตอมหรือโลหะไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสแตนและเหล็ก [27] ซึ่งหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลนั้นเป็นตัวสำคัญที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเมทิลีนบลูเพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูลง [19,28] ซึ่งสามารถบอกถึงผลของความเข้มข้นที่สูงขึ้นโดยเมื่อความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการพลาสมาวิภาคของเหลวมีค่าสูงขึ้น





รูปที่ 4.5 ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูงด้วยซั้วอิเล็กโทรดต่างชนิด ที่ความถี่ 15 กิโลเฮิรตซ์ ก) 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ข) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค) 125 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.1 ร้อยละการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่
ความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์

ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ขั้วอิเล็กโทรด	ร้อยละการสลายตัว
0.5	ทั้งสแตน	89.9875
	เหล็ก	76.6375
	ทองแดง	80.8093
1.0	ทั้งสแตน	97.0797
	เหล็ก	89.9875
	ทองแดง	99.5828
1.5	ทั้งสแตน	93.0469
	เหล็ก	90.5437
	ทองแดง	83.0343
75	ทั้งสแตน	63.0371
	เหล็ก	73.2165
	ทองแดง	89.6537
100	ทั้งสแตน	84.3137
	เหล็ก	87.2340
	ทองแดง	91.2390
125	ทั้งสแตน	84.2303
	เหล็ก	80.6245
	ทองแดง	92.4072

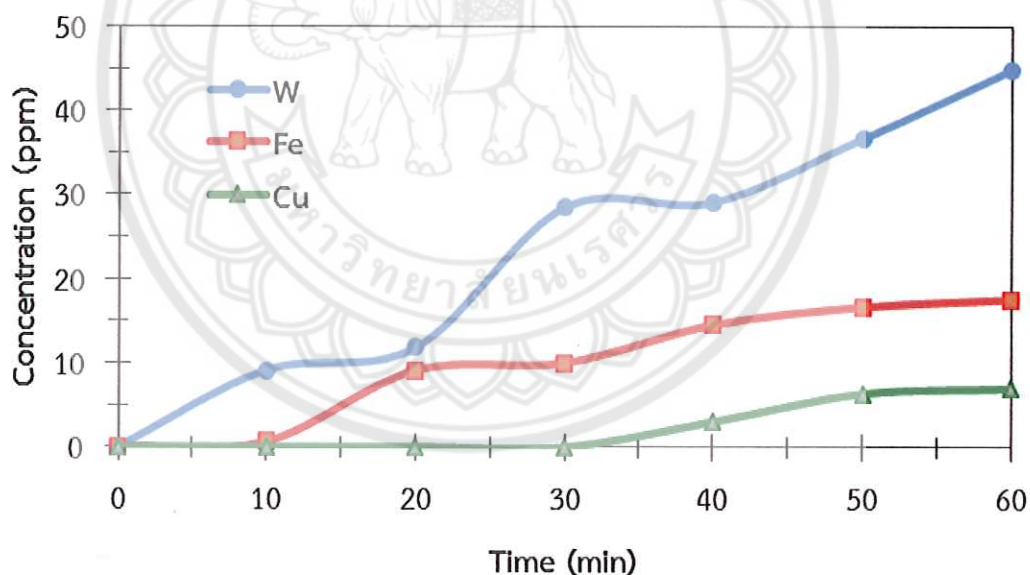
และจากการเปรียบเทียบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวกับกระบวนการอื่นๆ จะเห็นได้ว่ากระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวใช้เวลาเพียง 60 นาที สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึงร้อยละ 92.41 เทียบกับกระบวนการโซลเจลโดยใช้ปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนซึ่งใช้เวลาในการสลายสีย้อมนาน 1,620 นาที จึงจะสามารถสลายสีย้อมได้ร้อยละ 97 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการ Pulsed discharged plasma ใช้เวลาในการสลายสีย้อม 30 นาที สามารถสลายสีย้อมได้ร้อยละ 94.5 แต่กระบวนการนี้มีข้อเสียเนื่องจากต้องมีการควบคุมพลังงานและอัตราการไหลของก๊าซที่จำเป็นต่อกระบวนการพลาสมา และกระบวนการในการบำบัดมีหลายขั้นตอนส่งผลให้ใช้ต้นทุนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย และสามารถดำเนินการได้ในสภาวะความดันบรรยากาศและที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญูของเหลวกับกระบวนการอื่นๆ

กระบวนการ	เวลา (นาที)	ร้อยละการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู	แหล่งอ้างอิง
กระบวนการพลาสมาวิญญูภาคของเหลว	60	92.41	งานวิจัยนี้
กระบวนการโซลเจลโดยใช้ปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน	1,620	97	ก้องภพ ยศแพง และคณะ [29]
กระบวนการ Pulsed discharged plasma	30	94.5	Y. Jin et al. [5]

4.2.1 ผลของปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

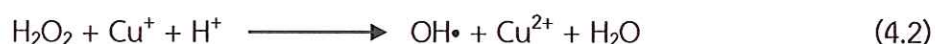
จากการศึกษาปริมาณการเกิดขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ ทังสเทน เหล็ก และทองแดง ที่ค่าความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิดกันที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์

พบว่าปริมาณการเกิดขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีปริมาณการเกิดขึ้นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ทังสเทน และเหล็ก เนื่องจากการเกิดขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายสีย้อมเกิดจากการรวมตัวของหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดการขัดขวางการสลายสีย้อมและเกิดเป็นการสะสมสารพิษขึ้น แต่ในกระบวนการพลาสมาวิญญูภาคของเหลวนั้นขณะทำ

การบำบัดจะเกิดการแตกตัวของโลหะไอออนหลุดออกมา ซึ่งโลหะไอออนดังกล่าวคือทองแดงที่เกิดการแตกตัวดังสมการที่ 4.1 ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อแตกตัวกลับมาเป็นหมู่ว่องไวไฮดรอกซิลที่สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาการสลายสีย้อมได้ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาเฟนตันซึ่งแสดงดังนี้ [30]



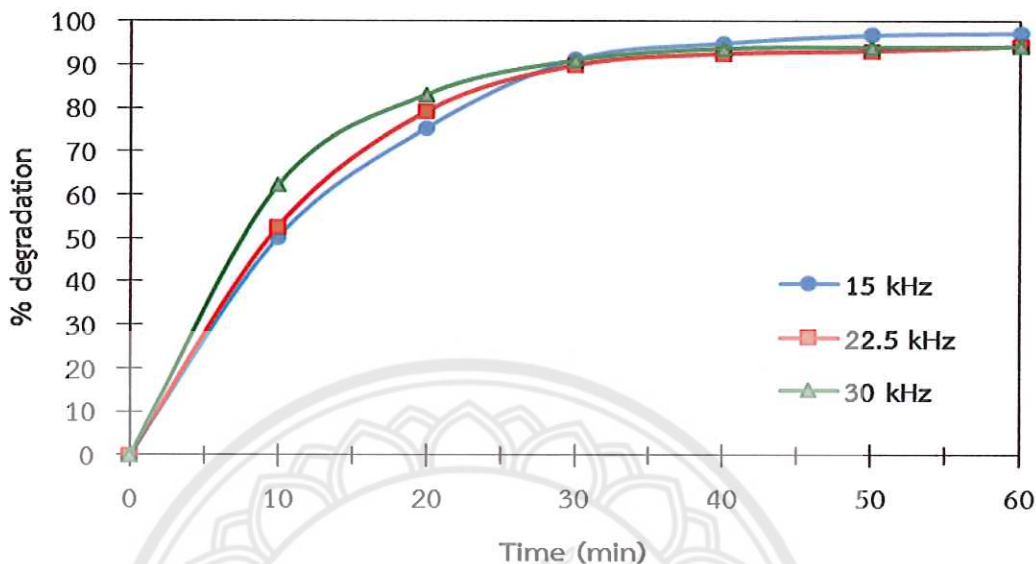
และจากการเปลี่ยนขั้วอิเล็กโทรดเป็นเหล็กพบว่าปริมาณการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าขั้วอิเล็กโทรดทองแดงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดเหล็กมีความสามารถในการแตกตัวเป็นโลหะไอออนได้เช่นกันดังสมการที่ 4.3 แต่อาจเกิดได้น้อยกว่าทองแดงเพราะสภาวะการแตกตัวของเหล็กนั้นสามารถทำได้ดีในสารละลายที่เป็นกรดจึงสามารถแตกตัวเป็นโลหะไอออนได้น้อยและเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้น้อยกว่าทองแดง ซึ่งโลหะไอออนของเหล็กสามารถเข้าทำการแตกตัวสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบได้ดังนี้ [31]



ซึ่งจากผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าขั้วอิเล็กโทรดทองแดงและเหล็กสามารถนำมาใช้กับระบบการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีและมีประสิทธิภาพในการแตกตัวไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาเฟนตันโดยเฉพาะขั้วอิเล็กโทรดทองแดง [32] และยังสนับสนุนผลของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดทองแดงได้อีกด้วย ดังนั้นขั้วอิเล็กโทรดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้ในกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูคือขั้วอิเล็กโทรดทองแดง

4.2.2 ผลของความถี่พลาสมา

จากการศึกษาอัตราการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดงที่สภาวะความถี่พลาสมาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 อัตราการย่อยสลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทองแดง ที่ความถี่ต่างกัน

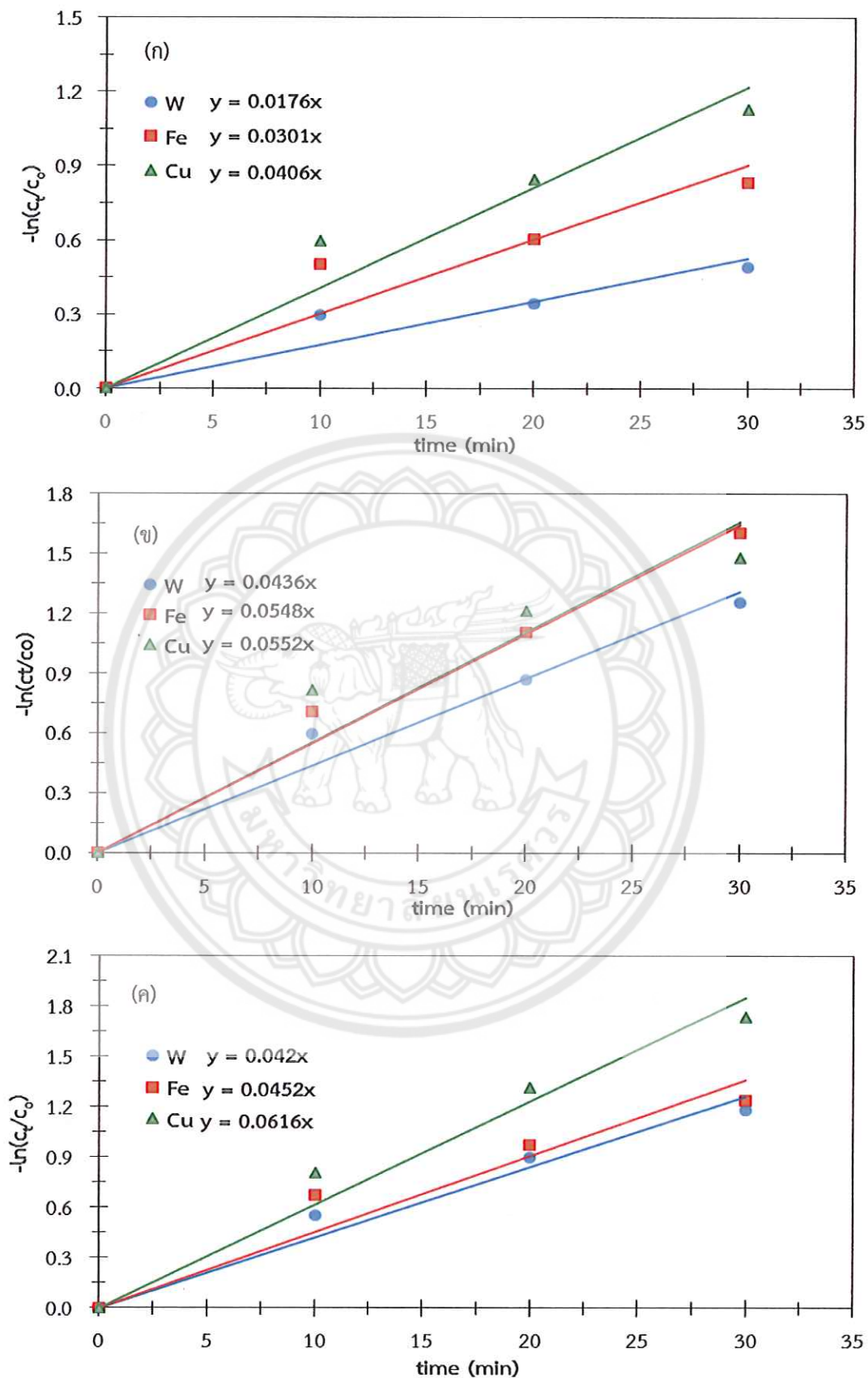
พบว่า การเพิ่มความถี่พลาสมาส่งผลให้อัตราการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูดีขึ้นซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟทุกความถี่ในช่วงเวลา 0 ถึง 30 นาที และประสิทธิภาพในการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าใกล้เคียงกันโดยการสลายตัวจะเริ่มเข้าสู่สมดุลการสลายตัวในช่วงเวลา 30 นาที ในทุกความถี่พลาสมา เนื่องจากการเพิ่มความถี่พลาสมาส่งผลให้เกิดพลังงานที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเกิดหมู่อวอไฮดรอกซิลที่ทำให้เกิดการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่พลาสมาถึงสองเท่าไม่ส่งผลให้อัตราการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นสองเท่า แต่ปริมาณของสีย้อมเมทิลีนบลูไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย กระบวนการการสลายตัวจึงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนักเพียงแต่การสลายตัวในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 30 นาทีที่ความถี่พลาสมาสูงขึ้นอาจเกิดปริมาณของหมู่อวอไฮดรอกซิลที่มากขึ้นจากการแตกตัวของโลหะไอออนที่มากขึ้นส่งผลให้เมทิลีนบลูเกิดการสลายตัวไปได้หมดเร็วกว่าการสลายตัวในสภาวะความถี่พลาสมาต่ำกว่าเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามการดำเนินการสลายตัวสีย้อมเมทิลีนบลูที่สภาวะความถี่ 15 กิโลเฮิร์ตซ์นั้นเพียงพอต่อกระบวนการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเนื่องจากได้ประสิทธิภาพในการสลายตัวใกล้เคียงกันและเริ่มเข้าสู่สมดุลการสลายตัวที่เวลาเท่ากัน อีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่าถึงสองเท่าซึ่งประหยัดกว่าและไม่เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

4.3 จลนพลศาสตร์การย่อยสลายของเมทิลีนบลู

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การย่อยสลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นแตกต่างกันด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิดคือ ทั้งสแตน เหล็ก และทองแดง ที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าจลนพลศาสตร์การย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิญญากาศของเหลวเป็นไปตามอันดับการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังสมการที่ 4.5 [33]

$$-\ln(C_t/C_0) = kt \quad (4.5)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิด ซึ่งสังเกตได้จากค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย (k) หรือค่าความชันดังตารางที่ 4.3 โดยเมื่อเปรียบเทียบที่ความแตกต่างของพบว่าขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสูงที่สุดทุกความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู ดังที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0406 ต่อนาที ที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0552 ต่อนาที และที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 125 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0616 ต่อนาที และเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ชนิดของขั้วอิเล็กโทรดต่างกันพบว่าขั้วอิเล็กโทรดทั้งสแตนมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0420 ต่อนาที ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0452 ต่อนาที และขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.0616 ต่อนาที ซึ่งพบว่าขั้วอิเล็กโทรดทองแดงมีจลนพลศาสตร์การย่อยสลายดีที่สุดที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ทั้งสแตน และเหล็ก เนื่องจากทองแดงมีความเหมาะสมกับระบบบำบัดที่มีเมทิลีนบลูปนเปื้อนสามารถแตกตัวให้เป็นโลหะไอออนได้มากขึ้นและเกิดหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมากขึ้นจึงทำให้สามารถย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีซึ่งเป็นผลที่สนับสนุนการศึกษาวิจัยการย่อยสลายสีย้อม และเมื่อเพิ่มความถี่พลาสมาเพิ่มสูงขึ้นในการทดลองกับขั้วอิเล็กโทรดทองแดงที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าการเพิ่มความถี่พลาสมาส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นจาก 0.0616 ต่อนาที เป็น 0.0842 ต่อนาที ซึ่งเป็นผลที่สนับสนุนกับการศึกษาการเพิ่มความถี่พลาสมา ดังนั้นจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจึงสามารถบอกได้ถึงความสามารถของทองแดงที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นหมู่ฟังก์ชันหรือไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสแตนและเหล็ก และอัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูที่ดีที่สุด



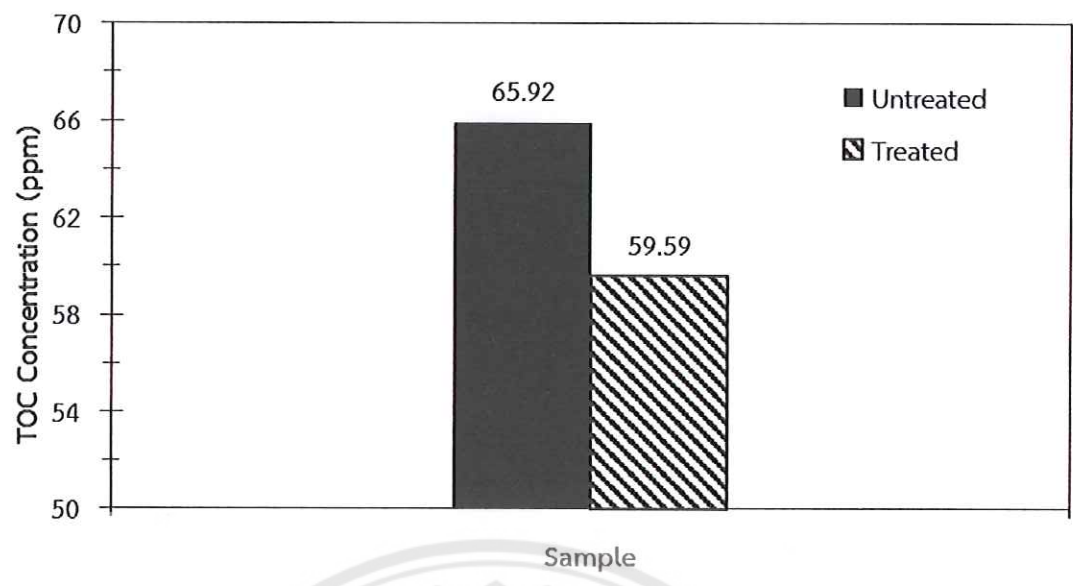
รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การย่อยสลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูงด้วยขั้วอิเล็กโทรดต่างชนิด ที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ก) 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ข) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค) 125 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของการสลายตัวของเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์

ความเข้มข้นของสารละลาย เมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ข้อผิดพลาด	k (min ⁻¹)	R ²
75	ทั้งสแตน	0.0176	0.8734
	เหล็ก	0.0301	0.8797
	ทองแดง	0.0406	0.9342
100	ทั้งสแตน	0.0436	0.9661
	เหล็ก	0.0548	0.9109
	ทองแดง	0.0552	0.9802
125	ทั้งสแตน	0.0420	0.9635
	เหล็ก	0.0452	0.9191
	ทองแดง	0.0616	0.9659
125	ทองแดง (30 kHz)	0.0842	0.9882

4.4 การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนด้วยเทคนิค TOC

จากการศึกษาปริมาณการเกิดคาร์บอนในสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ข้อผิดพลาดทองแดง ที่ความถี่พลาสมา 15 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 0-60 นาที ด้วยเทคนิค TOC พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวมีปริมาณคาร์บอนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งก่อนการบำบัดพบปริมาณคาร์บอนอยู่ถึง 65.92 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อนำไปผ่านการบำบัด 60 นาทีพบว่าปริมาณคาร์บอนลดลงเหลือเพียง 59.59 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการป้อนพลังงานเข้าสู่ระบบทำให้เกิดเป็นพลังงานพลาสมาเพื่อทำการสลายสารพิษที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งพลังงานดังกล่าวจะทำการสลายองค์ประกอบของสารที่มีความเป็นพิษออกจึงส่งผลให้สารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดนั้นมีปริมาณคาร์บอนลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบเป็นร้อยละการมีอยู่ของปริมาณคาร์บอนพบว่าปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ร้อยละ 90.4 หลังผ่านกระบวนการบำบัด ดังนั้นกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวมีความสามารถในการลดปริมาณคาร์บอนได้ดี



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนก่อนและหลังทำการบำบัด

4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงสียอมจากการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสียอมจากการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ ที่ 0.5 1.0 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ช่วงความเข้มข้นสูงที่ 75 100 และ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้งสามชนิด คือ ทั้งสแตนเลส เหล็ก และทองแดง ซึ่งพบว่าเมื่อทำการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่ำ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีฟ้าอ่อนไปเป็นสีเขียวอ่อนในช่วงเวลา 20 ถึง 30 นาที แล้วจึงเปลี่ยนเป็นสีใสภายในเวลาไม่ถึง 60 นาที ดังรูป 4.10 และเมื่อทำการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นสูง พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีฟ้าที่เข้มข้น ดังรูป 4.11 เนื่องจากกระบวนการกำจัดสีของสารนั้นเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับรังสียูวีที่เกิดจากแสงหรือกระบวนการโฟโตคะตะไลส์ที่เป็นตัวแปรสำคัญในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารให้เกิดการสลายตัวของสีออกไป ซึ่งที่ความเข้มข้นต่ำแสงยูวีสามารถผ่านสารละลายได้ง่ายจึงเกิดการกำจัดสีของสารละลายได้ดี แต่เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงสียอมจะมีสีเข้มขึ้นทำให้แสงยูวีส่องผ่านได้น้อยลงจึงเกิดการกำจัดสีได้น้อยลง [34] และอาจเกิดจากสารบางตัวที่เกิดขึ้นภายในระบบการสลายสียอมด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว อย่างเช่น คลอไรด์ที่หลุดออกมาจากโมเลกุลของสียอมเมทิลีนบลู ซึ่งการเกิดคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการขัดขวางการกำจัดสีของสารละลายได้ [34] ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สีเข้มขึ้นจนแสงไม่สามารถส่องผ่านและเกิดการกำจัดสีได้และชนิดของขั้วอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย



รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นที่ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ของข้าวอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นที่ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ของข้าวอิเล็กทรอนิกส์ทองแดง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาการย่อยสลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ทั้งสแตน เหล็กและทองแดง พบว่า ขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดงสามารถให้ร้อยละการย่อยสลายเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด 92.41 ภายในเวลา 60 นาที และเมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้น แต่ความถี่พลาสมาที่เหมาะสมกับการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวคือ 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และเมื่อวัดค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดงให้ค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์น้อยที่สุดซึ่งบ่งบอกถึงการสลายตัวที่ดีของเมทิลีนบลู และเมื่อนำไปตรวจวัดหาค่า TOC พบว่าสารละลายเมทิลีนบลูได้รับการบำบัดส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนลดลงจากการสลายตัวด้วยพลังงานพลาสมา และเมื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายเมทิลีนบลู พบว่าการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และอิเล็กโทรดทองแดงให้อัตราการสลายตัวของเมทิลีนบลูดีที่สุดโดยมีค่าคงที่อัตราการสลายสีย้อมเท่ากับ 0.0616 ต่อนาที และกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลวยังช่วยลดความเข้มข้นของสีได้ดีในช่วงความเข้มข้นต่ำของสารละลายเมทิลีนบลู

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการทดลองที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเพิ่มสูงขึ้นเพื่อประสิทธิภาพของระบบที่มากขึ้น

5.2.2 ควรมีการดัดแปลงเครื่องปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่มากขึ้นเพื่อที่จะได้ลองทำการบำบัดปริมาณสารได้มากขึ้น

5.2.3 ในขั้นตอนการวิเคราะห์ควรมีการตรวจสอบองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆด้วยเทคนิค High pressure liquid chromatography (HPLC) เพื่อบ่งบอกถึงสภาพความเป็นพิษหลังการบำบัดด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

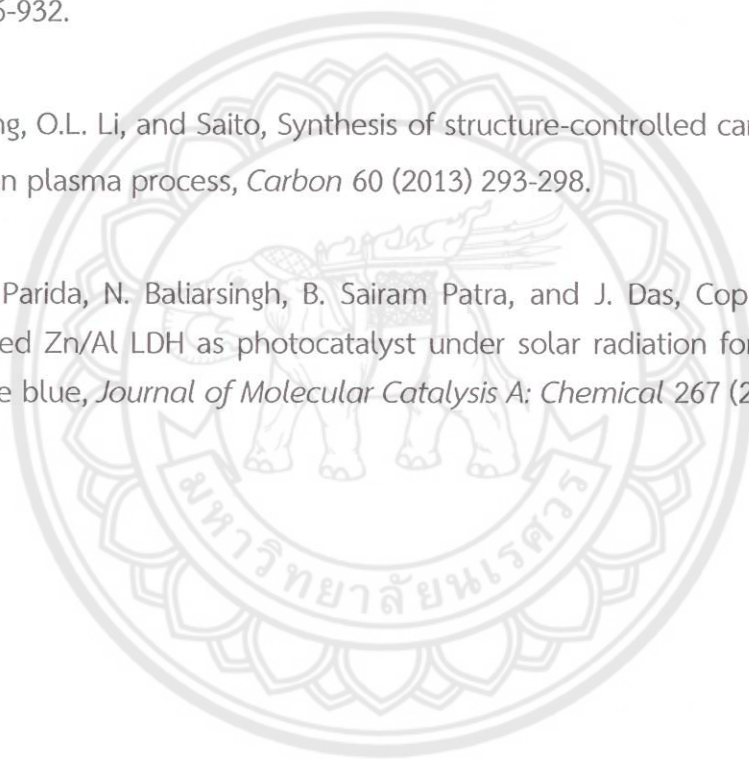
เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Chooakson, Color Removal Technology in Industrial Wastewater, *Burapha Sci. J.* 17 (2012) 1 : 181-191
- [2] M. Tichonovas, E. Krugly, and V. Racys, Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment, *Chemical Engineering Journal*, (2013) 9–19
- [3] Y. Jin, Y. Wu, J.Cao, and Y. Wu, Optimizing decolorization of Methylene Blue and Methyl Orange dye by pulsed discharged plasma in water using response surface methodology, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 45 (2014) 589–595
- [4] O. Takai, Solution plasma processing (SPP), *Pure Appl. Chem*, 2008;80:2003-2011
- [5] เมทิลีนบลู [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.chemdat.info,2014
- [6] advanced oxidation process [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.archive.lib.cmu.ac.th/full/T-2551
- [7] ปฏิกริยาเฟนตัน [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.h2o2.com/applications/industrial
- [8] Z. Juanhua, Z. Beixiao, and Z. Jingqiang, Effect of phoric acid pretreatment on enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose, *Biotechnology Advances*, 2010;28:613-619
- [9] G. Miller, Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, *Analytical Chemistry*, 1959
- [10] C. Yang, Z. Shen, and G. Yu, Effect and aftereffect of radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of wheat straw, *Bioresource Technology*, 2008;99:6240-6245

- [11] I. Prasertsung, S. Damrongsakkul, and N. Saito, Degradation of β -chitosan by solution plasma process (SPP), *Polymer Degradation and Stability*, 2013;98:2089-2093
- [12] O. Pornsunthorntawe, Depolymerization of chitosan-metal complexes via a solution plasmatechnique, *Carbohydrate Polymer*, 2014;102:504-512
- [13] นางนงภัส โฆษวิทิตกุล, คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสุรนารี, 2014
- [14] UV-Vis [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://glasswarechemical.com/scientific-instrument,2014>
- [15] Anto Tri Sugiartoa, S. Itoa, and T. Ohshima, Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water, *Journal of Electrostatics*, (2003) 135–145
- [16] C. Baiocchia, M. C. Brussino, E. Pramauro, A. B. Prevot, L. Palmisano, and G. Marc'i, Characterization of methyl orange and its photocatalytic degradation products by HPLC/UV-VIS diode array and atmospheric pressure ionization quadrupole ion trap mass spectrometry, *International Journal of Mass Spectrometry* 214 (2002) 247–256
- [17] F. Huang, L. Chen, and H. Wang, Analysis of the degradation mechanism of methylene blue by atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma, *Chemical Engineering Journal*, (2010) 250–256
- [18] P. Manoj Kumar Reddy, B. Rama Raju, and J. Karuppiyah, Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor, *Chemical Engineering Journal*, (2013) 41–47
- [19] B. Jiang, J. Zheng, and Q. Liu, Degradation of azo dye using non-thermal plasma advanced oxidation process in a circulatory airtight reactor system, *Chemical Engineering Journal*, (2012) 32–39

- [20] B. M. Cadorn, V. Z. Baldissarelli, and R. Geremias, Pyrite-enhanced methylene blue degradation in non-thermal plasma water treatment reactor, *Journal of Hazardous Materials*, (2012) 55– 62
- [21] X. Luo, S. Zhang, and X. Lin, New insights on degradation of methylene blue using thermocatalytic reactions catalyzed by low-temperature excitation, *Journal of Hazardous Materials*, (2013) 112– 121
- [22] Q. Wang, S. Tian, and J. Long, Use of Fe(II)Fe(III)-LDHs prepared by co-precipitation method in a heterogeneous-Fenton process for degradation of Methylene Blue, *Catalysis Today*, (2014) 41–48
- [23] P. Baroch, V. Anita, N. Saito, and O. Takai, Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water, *J. Electrostat.* 66 (2008) 294-299.
- [24] A. Watthanaphanit, Y.K. Heo, and N. Saito, Influence of the discharge time of solution plasma process on the formation of gold nanoparticles in alginate matrix, *J. Taiwan Inst. Chem. E.* 45 (2014) 3099-3103.
- [25] R.K. Tepe, T. Jacksier, and R.M. Barnes, Atomic emission of anhydrous hydrogen bromide: spectra from 200 to 900 nm by sealed inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy, *Spectrochim. Acta B.* 52 (1997) 2103-2113.
- [26] H. Sarahney, X. Mao, and A.N. Alshawabkeha, Role of iron anode oxidation on transformation of chromium by Electrolysis, *Electrochim Acta.* 86 (2012) 96-101.
- [27] L. Chandana, P. Manoj Kumar Reddy, and Ch. Subrahmanyam, Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium. *Chemical Engineering Journal in press* (2015).
- [28] ก้องภพ ยศแพง และคณะ, การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส และ ตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอน, 2558

- [29] L. C. Friedrich, C. L. Silva Zanta, A. Machulek, V. O. Silva, and F. H. Quina, Interference of inorganic ions on phenol degradation by Fenton reaction, *Sci. Agric.* 69 (2012) 347-351.
- [30] Czechowska-Biskup R., Arosinska D., Rokita B., Ulanski P., and Rosiak J.M. Determination of degree of deacetylation of chitosan comparison of methods. *Progress on chemistry and application of chitin and its derivatives* 2012; 72: 5-20.
- [31] L. Wang and X. Jiang, Unusual catalytic effects of iron salts on phenol degradation by glow discharge plasma in aqueous solution, *J. Hazard. Mater.* 161 (2009) 926-932.
- [32] J. Kang, O.L. Li, and Saito, Synthesis of structure-controlled carbon nano spheres by solution plasma process, *Carbon* 60 (2013) 293-298.
- [33] K.M. Parida, N. Baliarsingh, B. Sairam Patra, and J. Das, Copperphthalocyanine immobilized Zn/Al LDH as photocatalyst under solar radiation for decolorization of methylene blue, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 267 (2007) 202–208





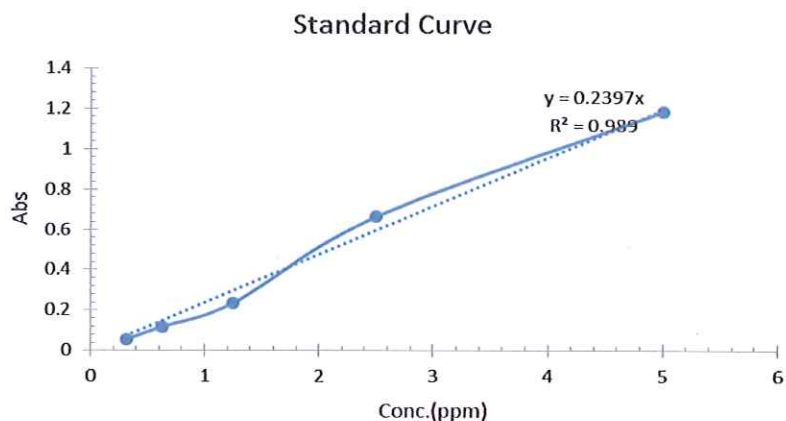
ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

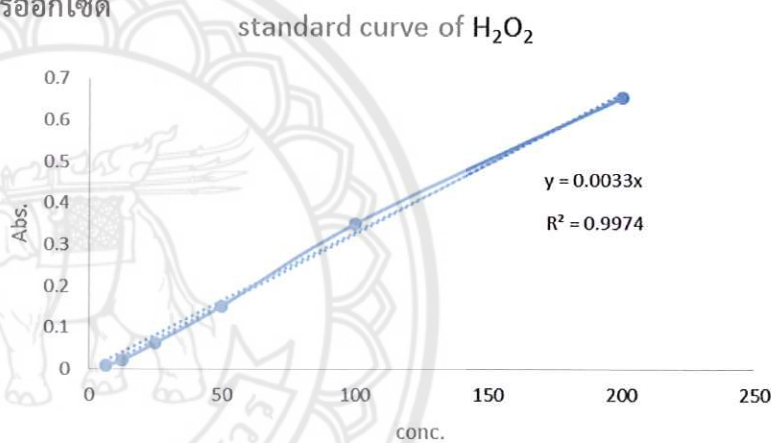
ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

Conc. (ppm)	Abs
0.3125	0.056
0.625	0.118
1.25	0.236
2.5	0.665
5	1.187



ก.2 กราฟมาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Conc. (ppm)	abs
6.25	0.009
12.5	0.022
25	0.063
50	0.152
100	0.35
200	0.655



ก.3 ผลข้อมูลการสลายสีของเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการพลาสมาวิทยุภาคของเหลว

Solution : MB 0.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1002 μ S/cm

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.082	0.5000	24.2	11.52	0.0000
10	0.059	0.2461	52	10.41	50.7718
20	0.04	0.1669	45.6	10.75	66.6249
30	0.02	0.0834	48.7	10.56	83.3125
40	0.014	0.0584	53.8	10.39	88.3187
50	0.013	0.0542	59.4	10.3	89.1531
60	0.012	0.0501	52.1	10.42	89.9875

Solution : MB 0.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1002 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.071	0.5000	25.6	10.7	0.0000
10	0.051	0.2128	41.7	10.63	57.4468
20	0.034	0.1418	53.7	10.57	71.6312
30	0.031	0.1293	57.3	10.6	74.1343
40	0.018	0.0751	56.9	10.51	84.9812
50	0.021	0.0876	60.7	10.4	82.4781
60	0.028	0.1168	58.6	10.46	76.6375

Solution : MB 0.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1002 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.075	0.5000	26	10.67	0.0000
10	0.054	0.2253	54	10.63	54.9437
20	0.042	0.1752	57.4	10.6	64.9562
30	0.031	0.1293	45.3	10.84	74.1343
40	0.03	0.1252	51.2	10.73	74.9687
50	0.023	0.0960	37.8	11.08	80.8093
60	0.023	0.0960	39.5	11	80.8093

Solution : MB 1.0 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1020 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.102	1.0000	25.8	10.6	0.0000
10	0.067	0.2795	49.6	10.73	72.0484
20	0.044	0.1836	55.3	10.54	81.6437
30	0.024	0.1001	66.6	10.35	89.9875
40	0.012	0.0501	57.3	10.48	94.9937
50	0.008	0.0334	58.5	10.46	96.6625
60	0.007	0.0292	58.5	10.34	97.0797

Solution : MB 1.0 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1020 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.122	1.0000	25.8	10.6	0.0000
10	0.08	0.3338	55.2	10.73	66.6249
20	0.053	0.2211	64.3	10.35	77.8890
30	0.042	0.1752	60.3	10.49	82.4781
40	0.028	0.1168	58.6	10.43	88.3187
50	0.026	0.1085	62.6	10.37	89.1531
60	0.024	0.1001	62.9	10.2	89.9875

Solution : MB 1.0 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1020 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.101	1.0000	27	10.91	0.0000
10	0.061	0.2545	34.3	10.86	74.5515
20	0.039	0.1627	35.4	11.02	83.7297
30	0.037	0.1544	38.9	10.79	84.5640
40	0.017	0.0709	39.3	10.91	92.9078
50	0.004	0.0167	38.5	10.8	98.3312
60	0.001	0.0042	40.8	10.79	99.5828

Solution : MB 1.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1003 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.217	1.5000	26	10.87	0.0000
10	0.163	0.6800	50	10.53	54.6656
20	0.094	0.3922	55.3	10.55	73.8562
30	0.084	0.3504	63.1	10.38	76.6375
40	0.035	0.1460	56.3	10.43	90.2656
50	0.031	0.1293	52.9	10.51	91.3781
60	0.025	0.1043	51.3	10.53	93.0469

Solution : MB 1.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1003 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.221	1.5000	25.8	11.01	0.0000
10	0.162	0.6758	54.2	10.71	54.9437
20	0.1	0.4172	55.4	10.44	72.1875
30	0.075	0.3129	61.9	10.41	79.1406
40	0.051	0.2128	56.1	10.44	85.8156
50	0.049	0.2044	60.9	10.34	86.3719
60	0.034	0.1418	55.4	10.32	90.5437

Solution : MB 1.5 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1003 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	Conc. (ppm)	Temp	pH	%degrade
0	0.197	1.5000	25.7	10.96	0.0000
10	0.145	0.6049	32.4	11.07	59.6718
20	0.133	0.5549	38.3	10.91	63.0093
30	0.113	0.4714	38.8	10.8	68.5718
40	0.092	0.3838	37.8	10.89	74.4125
50	0.084	0.3504	41.4	10.7	76.6375
60	0.061	0.2545	36.9	10.77	83.0343

Solution : MB 75 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1005 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 15x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.982	4.0968	75.0000	0.0000
10	0.89	3.7130	55.6946	25.7405
20	0.849	3.5419	53.1289	29.1615
30	0.733	3.0580	45.8698	38.8402
40	0.607	2.5323	37.9850	49.3534
50	0.474	1.9775	29.6621	60.4506
60	0.443	1.8481	27.7222	63.0371

Solution : MB 75 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1005 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 15x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.881	3.6754	75.0000	0.0000
10	0.726	3.0288	45.4318	39.4243
20	0.656	2.7368	41.0513	45.2649
30	0.52	2.1694	32.5407	56.6124
40	0.428	1.7856	26.7835	64.2887
50	0.355	1.4810	22.2153	70.3796
60	0.321	1.3392	20.0876	73.2165

Solution : MB 75 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1005 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 15x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.864	3.6045	75.0000	0.0000
10	0.659	2.7493	41.2390	45.0146
20	0.515	2.1485	32.2278	57.0296
30	0.387	1.6145	24.2178	67.7096
40	0.228	0.9512	14.2678	80.9762
50	0.155	0.6466	9.6996	87.0672
60	0.124	0.5173	7.7597	89.6537

Solution : MB 100 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1016 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 20x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.8	3.3375	100.0000	0.0000
10	0.66	2.7534	55.0688	44.9312
20	0.503	2.0985	41.9691	58.0309
30	0.341	1.4226	28.4522	71.5478
40	0.269	1.1222	22.4447	77.5553
50	0.166	0.6925	13.8506	86.1494
60	0.188	0.7843	15.6863	84.3137

Solution : MB 100 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1016 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 20x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.774	3.2290	100.0000	0.0000
10	0.59	2.4614	49.2282	50.7718
20	0.397	1.6562	33.1247	66.8753
30	0.241	1.0054	20.1085	79.8915
40	0.24	1.0013	20.0250	79.9750
50	0.166	0.6925	13.8506	86.1494
60	0.153	0.6383	12.7660	87.2340

Solution : MB 100 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1016 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 20x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.745	3.1081	100.0000	0.0000
10	0.531	2.2153	44.3054	55.6946
20	0.357	1.4894	29.7872	70.2128
30	0.273	1.1389	22.7785	77.2215
40	0.194	0.8093	16.1869	83.8131
50	0.121	0.5048	10.0960	89.9040
60	0.105	0.4380	8.7610	91.2390

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1012 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.919	3.8340	125.0000	0.0000
10	0.688	2.8703	71.7564	42.5949
20	0.489	2.0401	51.0013	59.1990
30	0.369	1.5394	38.4856	69.2115
40	0.283	1.1806	29.5161	76.3872
50	0.233	0.9720	24.3012	80.5590
60	0.189	0.7885	19.7121	84.2303

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1012 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.802	3.3458	125.0000	0.0000
10	0.61	2.5448	63.6212	49.1030
20	0.453	1.8899	47.2466	62.2028
30	0.348	1.4518	36.2954	70.9637
40	0.303	1.2641	31.6020	74.7184
50	0.246	1.0263	25.6571	79.4743
60	0.232	0.9679	24.1969	80.6425

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1012 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	%degrade
0	0.805	3.3584	125.0000	0.0000
10	0.534	2.2278	55.6946	55.4443
20	0.323	1.3475	33.6879	73.0496
30	0.212	0.8844	22.1110	82.3112
40	0.133	0.5549	13.8715	88.9028
50	0.116	0.4839	12.0985	90.3212
60	0.091	0.3796	9.4910	92.4072

4. ผลข้อมูลการเกิดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 998 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : W

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	H ₂ O ₂
0	0.0000	0.0000
10	0.0300	9.0909
20	0.0390	11.8182
30	0.0940	28.4848
40	0.0960	29.0909
50	0.1210	36.6667
60	0.1480	44.8485

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 998 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Fe

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	H ₂ O ₂
0	0.0000	0.0000
10	0.0020	0.6061
20	0.0300	9.0909
30	0.0330	10.0000
40	0.0480	14.5455
50	0.0550	16.6667
60	0.0580	17.5758

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 998 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Time	Abs	H ₂ O ₂
0	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000
40	0.0100	3.0303
50	0.0210	6.3636
60	0.0230	6.9697

5. ผลข้อมูลการเปรียบเทียบความถี่พลาสมากับการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Electrode : Cu

REP SET : 15 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	Temp	%degrade
0	0.735	3.0663	125.0000	25	0.0000
10	0.597	2.4906	62.2653	62	50.1877
20	0.295	1.2307	30.7676	63	75.3859
30	0.105	0.4380	10.9512	65	91.2390
40	0.06	0.2503	6.2578	68	94.9937
50	0.038	0.1585	3.9633	69	96.8294
60	0.033	0.1377	3.4418	69	97.2466

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1100 μ S/cm

Electrode : Cu

REP SET : 22.5 kHz

Time : 60 min

Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	Temp	%degrade
0	0.735	3.0663	125.0000	25	0.0000
10	0.568	2.3696	59.2407	63	52.6074
20	0.249	1.0388	25.9700	68	79.2240
30	0.121	0.5048	12.6199	69	89.9040
40	0.089	0.3713	9.2824	69	92.5741
50	0.081	0.3379	8.4481	70	93.2416
60	0.068	0.2837	7.0922	70	94.3262

Solution : MB 125 ppm

Pulse width : 3

Conductivity : 1100 μ S/cm

Electrode : Cu

REP SET : 30 kHz

Time : 60 min

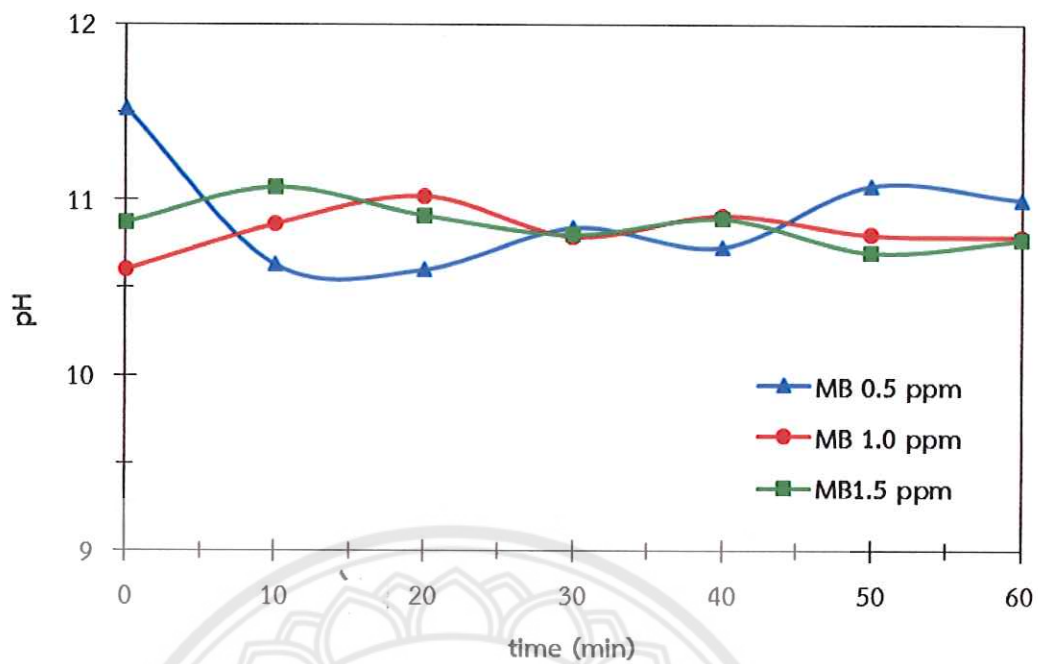
Voltage : 2

Dilute : 25x

Time	Abs	Conc. (ppm)	Real Conc. (ppm)	Temp	%degrade
0	0.658	2.7451	125.0000	25	0.0000
10	0.453	1.8899	47.2466	62	62.2028
20	0.202	0.8427	21.0680	65	83.1456
30	0.107	0.4464	11.1598	68	91.0722
40	0.074	0.3087	7.7180	68	93.8256
50	0.071	0.2962	7.4051	69	94.0759
60	0.069	0.2879	7.1965	70	94.2428

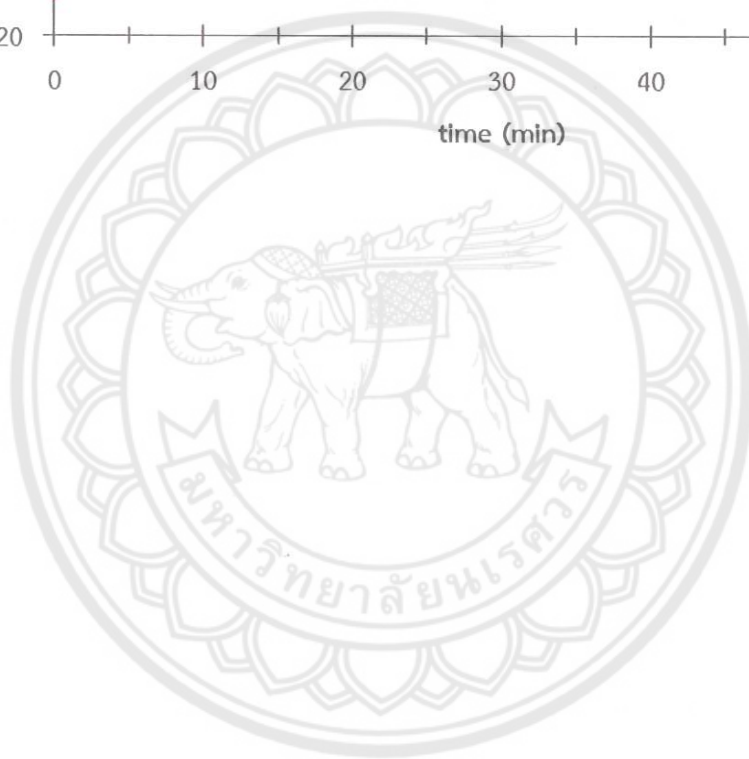
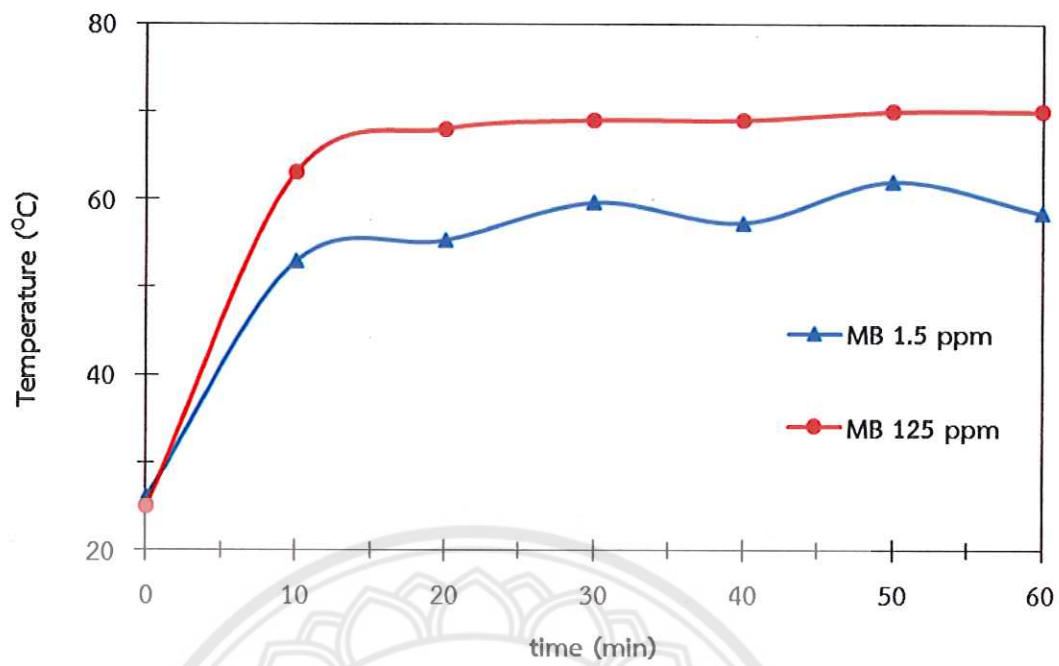
ก.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

Time	MB 0.5 ppm			MB 1.0 ppm			MB 1.5 ppm		
	W	Fe	Cu	W	Fe	Cu	W	Fe	Cu
0	11.52	11.52	11.52	10.6	10.6	10.6	10.87	10.87	10.87
10	10.41	10.63	10.63	10.73	10.73	10.86	10.53	10.71	11.07
20	10.75	10.57	10.6	10.54	10.33	11.02	10.55	10.44	10.91
30	10.56	10.6	10.84	10.35	10.49	10.79	10.38	10.41	10.8
40	10.39	10.51	10.73	10.48	10.43	10.91	10.43	10.44	10.89
50	10.3	10.4	11.08	10.46	10.37	10.8	10.51	10.34	10.7
60	10.42	10.46	11	10.34	10.2	10.79	10.53	10.32	10.77



ก.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Time	MB 0.5 ppm			MB 1.0 ppm			MB 1.5 ppm			MB 125 ppm
	W	Fe	Cu	W	Fe	Cu	W	Fe	Cu	Cu
0	24.2	24.2	24.2	25.8	25.8	25.8	26	26	26	25
10	52	41.7	54	49.6	55.2	34.3	50	54.2	52.9	63
20	45.6	53.7	57.4	55.3	64.3	35.4	55.3	55.4	55.3	68
30	48.7	57.3	45.3	66.6	60.3	38.9	63.1	61.9	59.6	69
40	53.8	56.9	51.2	57.3	58.6	39.3	56.3	56.1	57.3	69
50	59.4	60.7	37.8	58.5	62.6	38.5	52.9	60.9	62	70
60	52.1	58.6	39.5	58.5	62.9	40.8	51.3	55.4	58.4	70





ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ข.1 การหาร้อยละการสลายตัวของสีย้อมเมทิลีนบลู

$$\text{จากสูตร } \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

$$\text{หรือ } \frac{\text{ความเข้มข้นของสารตั้งต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลืออยู่}}{\text{ความเข้มข้นของสารตั้งต้น}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นที่ 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขั้วอิเล็กโทรดชนิดทองแดง

$$\text{จากสูตร } \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสลายตัว} &= \frac{(125 - 9.4910)}{125} \times 100 \\ &= 92.4072 \end{aligned}$$

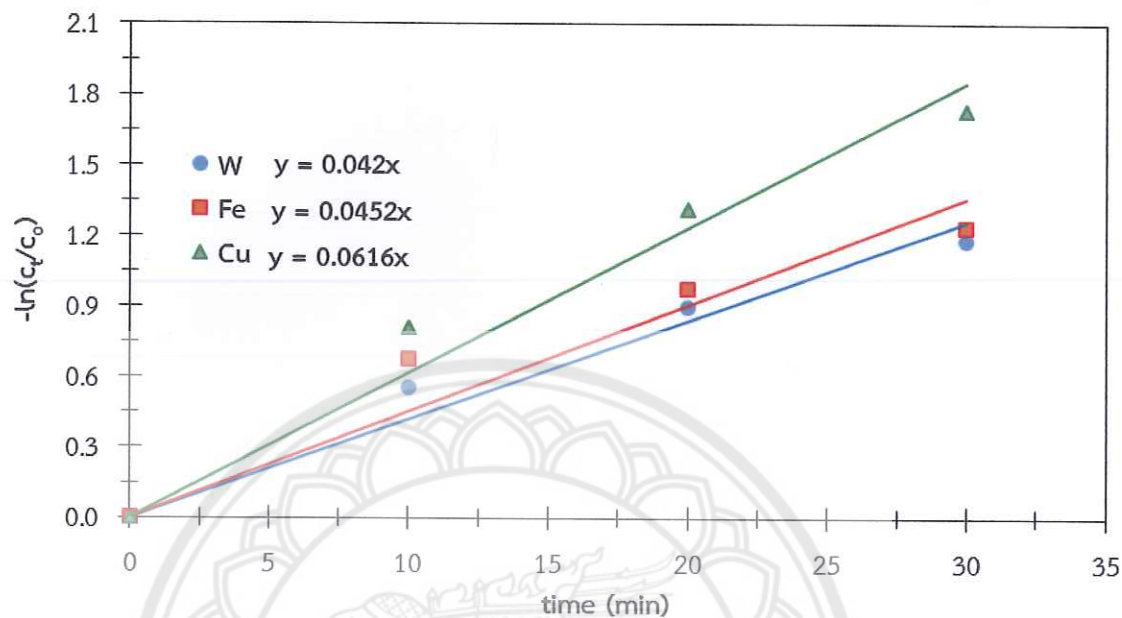
ข.2 การหาค่าคง k จากจลนพลศาสตร์

$$\text{จากสูตร } -\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = kt$$

ตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู 125 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตารางแสดงข้อมูล

time	125 ppm					
	W	1 order	Fe	1 order	Cu	1 order
0	125.0000	0.0000	125.0000	0.0000	125.0000	0.0000
10	71.7564	0.5550	63.6212	0.6754	55.6946	0.8084
20	51.0013	0.8965	47.2466	0.9729	33.6879	1.3112
30	38.4856	1.1780	36.2954	1.2366	22.1110	1.7322
40	29.5161	1.4434	31.6020	1.3751	13.8715	2.1985
50	24.3012	1.6378	25.6571	1.5835	12.0985	2.3352
60	19.7121	1.8471	24.1969	1.6421	9.4910	2.5780

นำค่าจากตารางมาทำการพลอตเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา



จากกราฟจะได้ค่าความชัน ซึ่งค่าความชันคือค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสีย้อม (k) ซึ่งค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสีย้อมด้วยอิเล็กโทรดชนิดทังสเตนมีค่าเท่ากับ 0.042 ต่อนาที ซึ่งค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสีย้อมด้วยอิเล็กโทรดชนิดเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.0452 ต่อนาที ซึ่งค่าคงที่อัตราการสลายตัวของสีย้อมด้วยอิเล็กโทรดชนิดทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.0616 ต่อนาที

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายศศิน แก้วเจริญ

ภูมิลำเนา 118/45 หมู่ 9 ต.บางม่วง อ.เมืองฯ จ.นครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศมัชฉิม

จ.นครสวรรค์

- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : sasin.kchr03@gmail.com



ชื่อ นางสาวกรนิการ์ ชุนพิณิจ

ภูมิลำเนา 9 หมู่ 3 ต.ทุ่งยาง อ.คีรีมาศ จ.สุโขทัย

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนคีรีมาศพิทยาคม จ.สุโขทัย

- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : k_kornnika_@hotmail.com