



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์  
Degradation of Dye by Heterogeneous Photo-Fenton oxidation

ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก เงินกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Degradation of Dye by Heterogeneous Photo-Fenton oxidation

แหล่งเงิน เงินกองทุนวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 440,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 15 พฤษภาคม 2560 ถึง 14 พฤษภาคม 2562

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นักวิจัยพี่เลี้ยง

รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา การสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ แบ่งหัวข้อการศึกษาเป็น 4 หัวข้อย่อยคือ

ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้แก่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรความเข้มข้นเหล็กที่ 10 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง pH 3-8 พบว่าประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และความเข้มข้นเหล็กเพิ่มขึ้น สภาวะที่ดีที่สุดในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7ซึ่งสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 92.55%

ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การวาวของรังสีเอ็กซ์ (XRF) วิเคราะห์สัญญาณและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะทอมไมต์ด้วยเทคนิค BET ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตันจากแบบจำลองสามารถสลายสีย้อมได้ 100% เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 5.8 ทว่าการทดลองซ้ำที่ภาวะดังกล่าว 5 การทดลอง พบว่าสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้เฉลี่ยร้อยละ 99.2% คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.8% และที่ภาวะเหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 72.3% ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัม ต่อลิตร และ pH 5.8 พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 49% เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ลดลงเป็น 45% และ 40% ตามลำดับ โดยรูปแบบของปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Ea) ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันพบว่ามีความเท่ากับ -2.97 kJ/mol

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กไดอะตอมไมต์ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง 3-10 จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 30 นาทีที่มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมใกล้เคียงกันคือ 96% 98% และ 99% ตามลำดับ ผลของปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พิจารณาที่ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ใกล้เคียงกันคือ 96% เมื่อ เพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตรจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกันคือ 60 เป็น 30 และ 20 นาทีตามลำดับ พบว่าใช้เวลาลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาช่วงของ pH เริ่มต้น ตั้งแต่ pH 3-10 พบว่าที่ pH 3 สามารถสลายเมทิลีนบลูได้ 96% โดยใช้เวลา 10 นาที สามารถลดค่า คาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ได้ 47%

ศึกษาการสลาย 4-คลอโรฟีนอลโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งมี  $Fe-TiO_2/Diatomite$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe-TiO_2/Diamtomite$  ด้วยวิธีการโซล-เจล ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe-TiO_2/Diamtomite$  ด้วย XRD พบว่าประกอบด้วยผลึกของควอตซ์และไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส ผล ของการตรวจสอบด้วย FT-IR พบว่ามีพีคที่สัมพันธ์กับ Si-O-Si bond , Ti-O stretching vibration และ Fe-O-Ti bond stretching และวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe-TiO_2/Diatomite$  มีพื้นที่ผิว  $20.06 m^2/g$  และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 13.53 nm. แสดงว่ามีลักษณะของรูพรุนแบบ Mesoporous. ศึกษาปัจจัย ที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล ได้แก่ pH 1, 2, 3, 6 และ 9 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10, 20 และ 30 mg/L และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10, 20 และ 30 mmol/L โดยสภาวะที่ เหมาะสมที่สุดในการสลาย 4-คลอโรฟีนอล คือ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L และความเข้มข้นเริ่มต้นของ  $H_2O_2$  30 mmol/L ซึ่งสามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ 84.46% ในเวลา 240 นาที ศึกษาสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง พบว่า สภาวะที่ทำให้เกิดการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอล สูงที่สุด คือที่ pH5 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 4-คลอโรฟีนอล เท่ากับ 10 mg/L สามารถสลาย สารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลได้ร้อยละ 89 เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 ชั่วโมง

คำสำคัญ: กระบวนการโฟโตเฟนตัน สีย้อมเมทิลีนบลู สีย้อมเมทิลีนบลู 4-คลอโรฟีนอล และเหล็กไดอะตอมไมต์

**Research Title:** Degradation of Dye by Heterogeneous Photo-Fenton oxidation

**Researcher:** Assist.Prof.Dr.Pornsawan Assawasaengrat

Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya

**Faculty:** Engineering

**Department:** Chemical Engineering

## ABSTRACT

The Degradation of Dye by Heterogeneous Photo-Fenton oxidation was studied. This research was divided into 4 parts

The degradation of methylene blue by Photo-Fenton process using Fe/Zeolite A was studied. The concentration of hydrogen peroxide (from 100 to 10,000 mg/L) concentration of iron (from 10 to 1,000 mg/L) and initial pH of dye solution from 3 to 8 were investigated. The results showed that the effective pH of dye degradation was 5.7. The degradation performance increased when concentration of hydrogen peroxide and iron increased. The performance of dye degradation using hydrogen peroxide concentration at 100, 1,000 and 10,000 mg/L was 52%, 86% and 92.55%, respectively. The performance of dye degradation using iron concentration at 10, 100 and 1,000 mg/L was 35%, 86% and 92%, respectively. The optimum condition for degradation of methylene blue were 10,000 mg/L of hydrogen peroxide and 100 mg/L of iron at pH 5.7 which led to 92.55% of degradation.

The degradation of methylene blue by Photo-Fenton process using Fe-Diatomite catalysts was studied. The crystalline of catalyst was characterized by XRD technique. The elemental composition of catalyst was determined by XRF technique. Morphology of catalyst was characterized by SEM and surface area and porosity of catalyst were measured by BET. The purpose of this research work is to design the experiment by using central composite method to find optimized condition to degrade methylene blue by Photo-Fenton process. Based on the predicted model, the optimized condition, the clay degradation can be 100% when using hydrogen peroxide 116 mg/L, Fe-Diatomite 1 g/L, methylene blue 200 mg/L and pH 5.8. The degradation performance was verified experiment 5 times at optimized condition and found that the degradation performance of methylene blue is 99.2%, which deviate from the model 0.8%. At this condition, it can decrease total organic carbon (TOC) of 72.3%. Kinetics of Photo-Fenton reaction was studied at 116 mg/L of hydrogen peroxide, 600 mg/L of methylene blue, 1 g/L of Fe-Diatomite and pH 5.8. The result showed that at T=25°C, the performance of dye degradation is 49%. When the temperature increases to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55°C and 75°C, the degradation performance decreases to 45% and 40%, respectively. The reaction is based on pseudo-first order with the activation energy ( $E_a$ ) of -2.97 kJ/mol.

The degradation of methyl orange by photo-Fenton process using Fe-diatomite as catalyst was studied. Fe-diatomite was prepared by dry-impregnation method. The effects of hydrogen peroxide concentration (100 to 500 mg/l), catalyst dosage (0.4 to 0.6 g/l), and initial pH of dye solution (3 to 10) were investigated in UV reactor. Photo-Fenton tests were carried out using initial methyl orange concentration of 75 mg/l at room temperature. The results showed that the degradation of methyl orange by using hydrogen peroxide at 100, 300 and 500 mg/l were 96%, 98%, and 99% respectively at 30 minutes. The different catalyst dosage of 0.4 0.5 and 0.6 g/l given similar result of 96% methyl orange degradation but using different equilibrium time of 60, 30, and 20 minutes respectively. The effect of initial pH of dye solution carried out at 10, 7, 4, and 3 approximated 96% of methyl orange degradation using decreasing equilibrium time of 50, 40, 30, and 10 minutes respectively. The optimal condition for 95% of methyl orange degradation at 10 minutes with 75 mg/l initial concentration of methyl orange were 100 mg/l of hydrogen peroxide concentration and 0.5 g/l of catalyst dosage at pH 3. The reduction of total organic carbon (TOC) was 47%.

The degradation of 4-chlorophenol using Fenton reaction via Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite was investigated. The Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite catalysts was prepared by sol-gel method and characterized by XRD, which was indicated presence of quartz crystalline and anatase phase of TiO<sub>2</sub>, FT-IR had shown peaks that relate to Si-O-Si bond, Ti-O stretching vibration and Fe-O-Ti bond stretching and BET surface area was indicated 20.06 m<sup>2</sup>/g of Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite catalyst and 13.53 nm. of average pore size, which is in range of mesoporous. The variables were studied such as pH (1,2,3,6 and 9), initial concentration of 4-chlorophenol (10, 20 and 30 mg/L) and initial concentration of hydrogen peroxide (10, 20 and 30 mmol/L). The results shown that the optimal condition for 4-chlorophenol degradation was pH of 2, initial concentration of 4-chlorophenol 10 mg/L, initial concentration of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30 mmol/L. The 4-chlorophenol degradation at optimal condition was 84.46% for 240 minutes. The efficiency of 4-chlorophenol degradation by photo-catalysis using TiO<sub>2</sub>/Diatomite was systematically investigated under various operational parameters i.e. reaction time, pH and initial concentration of 4-chlorophenol in solution. The result showed that the optimum conditions for maximum degradation of 4-chlorophenol at pH 5 and 10 mg/L of initial concentration of 4-chlorophenol with 89% degradation of 4-Chlorophenol for 15 hours reaction time.

Keywords; Photo-Fenton oxidation, methylene blue, methyl orange, 4-chlorophenol and Fe-diatomite

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจาก เงินกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือเพื่อการวิจัยทางวิศวกรรมภาควิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 ปฏิกริยาเฟนตัน.....	4
2.1.2 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	6
2.1.3 ซีโอไลต์เอ.....	7
2.1.4 ไดอะตอมไมต์.....	8
2.1.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	8
2.1.6 สีย้อม.....	9
2.1.7 คลอโรฟีนอล.....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์หลัก บนซีโอไลต์เอ.....	15
3.1 บทนำ.....	15
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	15
3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์หลักบนซีโอไลต์เอ.....	15
3.2.2 การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	16
3.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	17
3.3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์หลักบนซีโอไลต์เอ.....	17
3.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	18
3.3.3 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกริยาหลักซีโอไลต์เอกับหลักไดอะตอมไมต์ต่อ การสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	22
3.4 สรุปผลการทดลอง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และนำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	24
4.1 บทนำ.....	24
4.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	24
4.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	24
4.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	24
4.2.3 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ.....	25
4.2.4 การทดสอบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	26
4.2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์.....	26
4.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	27
4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	27
4.3.2 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ.....	30
4.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน.....	34
4.3.4 การกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวม.....	35
4.3.5 จลนพลศาสตร์.....	36
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	39
บทที่ 5 การสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้เหล็กบนไดอะตอมไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
5.1 บทนำ.....	41
5.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
5.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	41
5.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	41
5.2.3 การสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	42
5.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	42
5.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	42
5.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย สลายเมทิลออเรนจ์.....	43
5.3.3 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบเนื้อผสมในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์.....	46
5.4 สรุปผลการทดลอง.....	46
บทที่ 6 การศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันและปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงในการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาFe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite.....	47
6.1 บทนำ.....	47
6.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO <sub>2</sub> /diatomite.....	47
6.2.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน.....	48
6.2.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง.....	48
6.2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite.....	48
6.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	49
6.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite.....	49
6.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา Fe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite.....	51
6.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา Fe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite.....	54
6.3.4 วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างด้วย AAS.....	55
6.3.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่ง ด้วยแสง.....	56
6.4 สรุปผลการทดลอง.....	59
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
บทที่ 8 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก ก: เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิต จากบทที่ 8.....	70
ภาคผนวก ข: สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	71
ภาคผนวก ค: ข้อมูลประวัติผู้วิจัย.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเมทิลีนบลู.....	11
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของของสีย้อมเมทิลออเรนจ์.....	12
ตารางที่ 2.3 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	13
ตารางที่ 2.4 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	13
ตารางที่ 2.5 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตั้งรองรับ.....	14
ตารางที่ 3.1 ปริมาณเหล็กบนซีโอไลต์เอ.....	17
ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	25
ตารางที่ 4.2 ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	29
ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	29
ตารางที่ 4.4 ระดับของปัจจัยจากการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	30
ตารางที่ 4.5 การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	30
ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	32
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ภาวะที่เหมาะสม.....	33
ตารางที่ 4.8 ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะที่เหมาะสม.....	35
ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	38
ตารางที่ 5.1 ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ (%wt/wt).....	43
ตารางที่ 6.1 BET surface area Pore volume และ Pore size.....	50

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกซีโอไลต์เอ.....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูคไคท์ .....	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์.....	12
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ 4-คลอโรฟีนอล.....	13
รูปที่ 3.1 XRD Pattern ของ ซีโอไลต์เอ.....	17
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [Fe] 100 mg/L pH 5.7 ที่ [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] ต่างๆกัน (100, 1,000 และ 10,000 mg/L).....	18
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 1,000 mg/L pH 5.7ที่ [Fe] ต่างๆกัน (10, 100 และ 1,000 mg/L).....	19
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 100 mg/Lที่ pH 3 5.7 และ 8.....	20
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 1,000 mg/L ที่ pH 3 5.7 และ 8.....	20
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 10,000 mg/Lที่ pH 3, 5.7 และ 8.....	21
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [Fe] 100 /L [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 100, 1,000 และ 10,000 mg/L ที่ pH 3 5.7 และ 8.....	21
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้น เหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.7.....	22
รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์.....	27
รูปที่ 4.2 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของไดอะทอมไมต์.....	28
รูปที่ 4.3 Residual plots จากการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง.....	33
รูปที่ 4.4 Optimization Plot ของการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab.....	34
รูปที่ 4.5 %คาร์บอนอินทรีย์รวมในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมที่เวลา 0 30 และ 60 นาที.....	35
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	36
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 0-120 วินาที.....	37
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln(C/C <sub>0</sub> ) กับ เวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln(k) กับ 1/T.....	39
รูปที่ 5.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการย่อยสลาย เมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ภายใต้สภาวะ: $[MO]_0$ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร; pH 3.5.....	44
รูปที่ 5.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ภายใต้สภาวะ: $[MO]_0$ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร; $[H_2O_2]_0$ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร; pH 3.5.....	45
รูปที่ 5.4 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลออเรนจ์ต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วย กระบวนการโฟโตเฟนตัน ภายใต้สภาวะ: $[MO]_0$ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร; ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร; $[H_2O_2]_0$ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	45
รูปที่ 6.1 รูปแบบ XRD ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไดอะตอมไมท์ และ $TiO_2$ /Diatomite.....	49
รูปที่ 6.2 FT-IR pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe- $TiO_2$ /Diatomite.....	50
รูปที่ 6.3 ผลของ pH ต่อการสลายของ 4-คลอโรฟินอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่ง ปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟินอล 20 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L.....	51
รูปที่ 6.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟินอลต่อการสลายของ 4-คลอโรฟินอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L และ pH 2.....	53
รูปที่ 6.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟินอลต่อการสลายของ 4-คลอโรฟินอล โดยพล็อต ระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ กับ เวลา.....	53
รูปที่ 6.6 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลายของ 4-คลอโรฟินอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L pH 2 และความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟินอล 10 mg/L.....	54
รูปที่ 6.7 การสลายของ 4-คลอโรฟินอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟินอลเริ่มต้น 10 mg/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ 30 mmol/L และ pH 2 ที่เวลาต่างๆ.....	55
รูปที่ 6.8 ผลของ pH ต่อปริมาณเหล็กในสารละลาย.....	55
รูปที่ 6.9 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง.....	56
รูปที่ 6.10 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่ pH 2 4 และ 8.....	57
รูปที่ 6.11 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ของ 4-คลอโรฟินอล 10 20 และ 30 mg/L.....	58
รูปที่ 6.12.การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่สภาวะเหมาะสมที่สุด.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **XI** อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการย้อมสีผ้าในเขตภาคเหนือของประเทศไทยส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน และมักจะไม่ขึ้นทะเบียนเป็นโรงงานอุตสาหกรรม โดยในกระบวนการย้อมสีผ้าจะมีสีย้อมเพียงบางส่วนที่ซึมเข้าเนื้อผ้า สีย้อมส่วนที่เหลือจึงถูกปล่อยทิ้งรวมกับน้ำล้างที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งผู้ประกอบการส่วนใหญ่มักทิ้งน้ำเหล่านี้ลงบ่อซึมหรือบ่อปูนซีเมนต์ แล้วดูไปทิ้งตามป่าหรือปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดใดๆ ซึ่งการกระทำดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสีย้อมอยู่อาจมีสีย้อมบางชนิดเป็นสารที่อันตรายและย่อยสลายยาก อีกทั้งยังขัดขวางการเดินทางของแสงซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ดังนั้นการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็นและสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันทั่วไป เช่น การตกตะกอน (coagulation) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การดูดซับด้วยผงถ่าน (carbon adsorption) การบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) และเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (membrane technology) อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวข้างต้นนี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดสีย้อมให้หมดภายในครั้งเดียวได้ นอกจากกระบวนการต่างๆข้างต้นแล้ว ในปัจจุบันนิยมนำกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Process, AOPS) มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีเจือปน โดยเฉพาะกระบวนการเฟนตัน (Fenton process) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือ มีต้นทุนต่ำ สารที่ใช้ราคาไม่แพง และมีประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์สูง ไม่เกิดตะกอน การบำบัดน้ำเสียเป็นกระบวนการใช้สารสองชนิดคือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical,  $\cdot OH$ ) และเมื่อใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเรียกว่ากระบวนการโฟโตเฟนตัน (Photo-Fenton Process) แสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงโดยจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เช่น โมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย นำไปสู่การสลายสารเหล่านี้ ซึ่งประสิทธิภาพการสลายสีย้อมจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับการกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอเล็ต

ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน จะใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ กล่าวคือตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ คือมีสถานะเป็นของเหลว หลังจากการทำปฏิกิริยา พบว่ามีเหล็ก(เฟอร์รัสไอออน)ตกค้างในน้ำทิ้งที่บำบัดเสร็จ ทำให้ต้องทำการตกตะกอนเหล็กออกจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ทำให้เกิดความยุ่งยากสิ้นเปลืองเวลาและสารเคมีที่จะใช้ในการตกตะกอน และต้องแยกตะกอนออกก่อนปล่อยน้ำทิ้ง จากปัญหาดังกล่าว จึงมีงานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็ง คือตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสบนตัวรองรับชนิดต่างๆเช่น อลูมินา ซิลิกา ไดอะทอมไมต์ ซีโอไลต์ และ ไทเทเนีย เป็นต้น คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับคือ การมีพื้นที่ผิวสูงสำหรับการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา โครงสร้างเป็นรูพรุนมาก ความหนาแน่นต่ำ ความสามารถในการดูดซับสูง ความสามารถในการนำความร้อนต่ำ มีความเหนียว และราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์ โดยมีการปรับเปลี่ยนชนิดของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของสีย้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อม ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์
- 1.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายสีย้อม ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์
- 1.2.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เตรียมตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ ซีโอไลต์A และไดอะตอมไมต์ เพื่อใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัส ศึกษาคุณลักษณะ และคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ XRF, XRD, BET และ AAS
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู และสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณเฟอร์รัส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และ pH เป็นต้น
- 1.3.3 ศึกษาการออกแบบการทดลองเพื่อทำการคัดแยกปัจจัยที่สำคัญต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน จากนั้นนำปัจจัยที่ทำการคัดแยกมาแล้ว มาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ANOVA เพื่อทำการหาสมการถดถอย และหาภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์
- 1.3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์ เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา และพลังงานก่อกัมมันต์

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สร้างชุดอุปกรณ์ผู้ควบคุมแสงอัลตราไวโอเล็ตและควบคุมอุณหภูมิภายในตู้สำหรับปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน
- 1.4.2 เตรียมตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ ซีโอไลต์A และไดอะตอมไมต์
- 1.4.3 ศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์ ได้แก่ XRF, XRD, BET และ AAS เป็นต้น
- 1.4.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริพันธ์ ได้แก่
  - 1.4.4.1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันในช่วงความเข้มข้น 0 – 500 mg/L
  - 1.4.4.2 ปริมาณเฟอร์รัสต่อการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันในช่วงความเข้มข้น 0 – 500 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4.3 ช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ที่เหมาะสมต่อการสลายสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันในช่วงเวลา 30-200 นาที

1.4.4.4 ช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการสลายสี้อม ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน ในช่วง pH 2 – 11

- 1.4.5 ศึกษาการออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค Factorial design โดยใช้โปรแกรม Minitab ผลการทดลองที่ได้นำไปวิเคราะห์ Normal probability plot และ ANOVA เพื่อทำการประเมินปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน จากนั้นนำปัจจัยที่ทำการคัดแยกมาแล้ว มาทำการทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ANOVA เพื่อหาสมการถดถอย และหาภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายสี้อมเมทิลีนบลู ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์
- 1.4.6 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายสี้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา และพลังงานก่อกัมมันต์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เพื่อช่วยบำบัดน้ำเสียก่อนทำการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพราะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะกับแหล่งน้ำที่สามารถนำไปใช้ในการท่องเที่ยว อุตสาหกรรม การเกษตร และเป็นแหล่งที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการวิจัยเพื่อคัดค้นสภาวะที่เหมาะสมโดยอาจประยุกต์ใช้ผลของงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียให้ดีขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ปฏิริยาเพนตัน

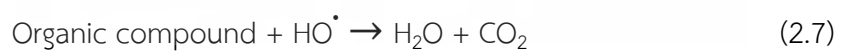
ปฏิริยาเพนตันเป็นหนึ่งในกระบวนการของแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยการเกิดปฏิริยาออกซิเดชันระหว่างไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เพื่อที่จะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) กระบวนการนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปน เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติกหรือสารเคมีที่มาจากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น กระบวนการเพนตันที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจะช่วยลดค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) ค่าปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับทำปฏิริยาเคมีกับสารอินทรีย์ (COD) กลิ่น สี รวมทั้งช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ [1]

##### 2.1.1.1 กลไกการเกิดปฏิริยาเพนตัน

กลไกการเกิดปฏิริยาของสารละลายเพนตันแสดงดังสมการ (2.1) ปฏิริยาออกซิเดชันระหว่างสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) กับเฟอร์รัสไอออน ซึ่งจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)



นอกจากปฏิริยาหลักดังที่แสดงในสมการ (2.1) ในสารละลายยังเกิดปฏิริยาอื่น ๆ ขึ้นด้วยดังนี้



สมการทั้งหมดเป็นปฏิริยาที่จะเกิดสำหรับปฏิริยาเพนตัน [2] โดยสมการทั้งหมดจะไม่ได้เกิดขึ้นทุกสมการ แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเมื่อเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) มีปริมาณมากเกินไป การเกิดปฏิริยาจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.2) แต่ถ้าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณมากเกินไป ในภาวะที่เป็นกรดการเกิดปฏิริยาตามสมการ (2.5) และ (2.6) จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดปฏิริยาตามสมการ (2.1) (2.3) และ (2.4) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (2.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2 กระบวนการโฟโตเพนตัน

กระบวนการโฟโตเพนตันเป็นการนำรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) มาประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาเพนตัน ซึ่งกระบวนการกระบวนการโฟโตไลซิสของรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วยในการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการ (2.8) [3]



โดยปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเพนตันมีดังนี้ [4]

#### 2.1.1.2.1 ความเข้มข้นของเหล็ก

เพนตันรีเอเจนต์ (Fenton Reagent) คือสารละลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก โดยเหล็กที่ใส่ลงไปในการละลายนั้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ในขณะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในการละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่เกิดการแตกเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล หากเพิ่มความเข้มข้นเหล็กจนถึงจุดหนึ่งแล้ว พบว่าการเติมเหล็กเข้าไปจะไม่ส่งผลใดๆต่อประสิทธิภาพของระบบ ณ จุดที่ปริมาณเหล็กเหมาะสมที่สุดนี้เป็นคุณลักษณะของ เพนตันรีเอเจนต์

#### 2.1.1.2.2 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลโดยตรงกับปริมาณของไฮดรอกซิล เรดิคัลและส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในระบบ หากความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีมากเกินไป ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นน้ำและออกซิเจน

#### 2.1.1.2.3 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเพนตันจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาเพนตันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หากอุณหภูมิสูงถึง 40-50 องศาเซลเซียสจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นออกซิเจนและน้ำ

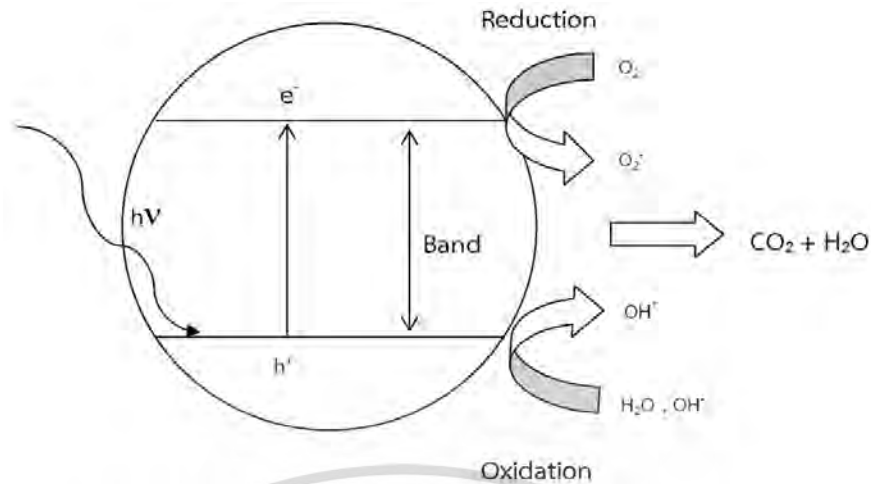
#### 2.1.1.2.4 ผลกระทบจากค่า pH

ค่า pH ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 3-6 โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จะลดลงเมื่อเฟอรัสไอออนเปลี่ยนเป็นเฟอริกไอออน จึงทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำ โดยที่ไม่เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

### 2.1.1.3 ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง (Photocatalytic reaction)

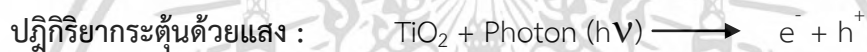
ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเป็นกระบวนการ Advanced Oxidation Processes (AOPs) อย่างหนึ่ง เป็นการให้แสงไปกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาดังพลังงานเท่ากับ หรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence Band) ไปยังแถบการนำ (Conduction Band) ทำให้เกิดโฮล (Hole) ประจุบวกขึ้นที่แถบเวเลนซ์ (Valence Band) เมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ ที่แถบเวเลนซ์โฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) และที่แถบการนำเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งคือออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่ถูกดูดซับได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $\text{O}_2^\bullet$ ) ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ( $\text{O}_2^\bullet$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีเมื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามรูปที่ 2.1 โดยในที่นี้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [5]

การเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเป็นไปตามสมการ



โดย  $\text{h}^+$  มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิเดทีฟ (Oxidative)

$\text{e}^-$  มีคุณสมบัติเป็นตัวรีดักทีฟ (Reductive)



ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง (Photocatalytic) เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับแสงหรือพลังงานโฟตอนมากพอ เรียกว่าพลังงานนี้ว่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy)

## 2.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือสารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่สูญหายไปในช่วงการเกิดปฏิกิริยาและจะได้กลับคืนมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภท [6]

### 2.1.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (Phase) เหมือนกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ สภาพการเคลื่อนที่จะเหมือนกับสารอื่นๆในระบบ โดยอัตราการเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวเอง

### 2.1.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคแตกต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายไม่สม่ำเสมอและสภาพการเคลื่อนที่จะแตกต่างจากสารอื่นๆ ตัวเร่งปฏิกิริยากระทำโดยอาศัยพื้นที่ผิวและอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับพื้นที่ผิวและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มักอยู่ในสถานะของแข็ง

ในปฏิกิริยาเพนตันออกซิเดชันแบบเอกพันธ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญคือ เฟอร์รัสไอออน แต่เนื่องจากปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงหรือในบางกรณีสารที่ต้องการกำจัดสามารถทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

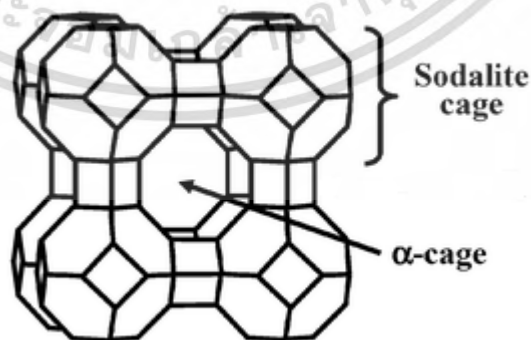
ปฏิกิริยากับเฟอร์สไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพสูงเช่น ฟอสเฟตไอออน ทำให้เฟอร์สไอออนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาน้อยลงรวมทั้งเกิดกากตะกอนของเหล็ก (Iron sludge) ทำให้การกำจัดสารเหล่านี้มีความยุ่งยากและเพิ่มต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้จึงมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เข้ามาแทนที่ ซึ่งความแตกต่างระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สำหรับปฏิกิริยา เพนตันออกซิเดชันสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ที่นิยมใช้ได้แก่ เฟอร์สซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่นำมาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ เหล็กออกไซด์บน ซิลิกาซึ่งสกัดจากเปลือกข้าว (Fe-Rice hull based  $\text{SiO}_2$ ) เหล็กออกไซด์บนซีโอไลต์ (Fe-Zeolite) ของเสียอุตสาหกรรมเหล็ก (Steel industry waste) และเหล็กบนดินเหนียว (Fe-Clay) เป็นต้น

### 2.1.3 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์เอมีสูตรทางเคมีคือ  $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$  โดยมีอัตราส่วนระหว่างช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al) เท่ากับ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเท่ากับ 4.2 อังสตรอม [7] ดังรูปที่ 2.2 สมบัติของซีโอไลต์เอมีดังนี้

1. สารดูดน้ำเนื่องจากซีโอไลต์เอมีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ทำให้มีความเป็นขั้วสูงจึงสามารถดูดซับสารที่มีความเป็นขั้วได้ดี
2. สารแลกเปลี่ยนไอออนเนื่องจากซีโอไลต์เอมีขั้วจึงดูดซับน้ำได้ดีที่น้ำที่อยู่ในซีโอไลต์จึงเปรียบเสมือนไอออนบวกที่มีดูลประจุลบในโครงสร้างซีโอไลต์เอโดยน้ำที่อยู่ในซีโอไลต์นั้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ตลอดเวลา ไฮโดรเนียมไอออนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นที่ต้องการแลกเปลี่ยน ซึ่งปฏิกิริยาลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะกับซีโอไลต์ที่มีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ
3. สมบัติการคัดแยกโมเลกุลเมื่อทำให้ซีโอไลต์แห้งโดยการไล่น้ำออกแล้วซีโอไลต์ดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับสารชนิดต่างๆได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมระหว่างความเป็นขั้วของซีโอไลต์และสารหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกซีโอไลต์เอ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.4 ไดอะตอมไมต์

ไไดอะตอมไมต์หรือดินเบา (Diatomite) เกิดจากการตกทับถมกันของเปลือกหรือโครงสร้างส่วนแข็ง (Frustules) ของสาหร่ายเซลล์เดียวที่เรียกว่า “ไไดอะตอม(diatom)” จำนวนมหาศาลและมีตะกอนพัดพาขนาดละเอียดอีกจำนวนหนึ่งสะสมปะปนอยู่ เปลือกของไไดอะตอมประกอบด้วยซิลิกา ไร้ผลึกในรูปของโอปอล (Opaline silica,  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปมากมาย อาจเป็นท่อกลม จาน สามเหลี่ยมหรืออื่นๆ มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 50-100 ไมครอน [9]

ไไดอะตอมไมต์มีสารจำพวกซิลิกาเป็นองค์ประกอบมีลักษณะอ่อนนุ่ม เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เป็นผงขนาดเล็ก ขาวอมเหลืองนวล มีขนาดของผงอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 ไมครอนไปจนถึงมากกว่า 1 มิลลิเมตร แต่ที่พบโดยปกติจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ไมครอน องค์ประกอบทางเคมีคือ สารจำพวกซิลิกา 80-90 % สารจำพวกอลูมินา (พบในแร่ดินเป็นส่วนใหญ่) 2-4% และ สารจำพวกเหล็กออกไซด์ 0.5-2% [10]

เปลือกของไไดอะตอมมีลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งคือมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก การที่เปลือกไไดอะตอมมีรูปร่างต่างกันทำให้การจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบหรืออัดตัวไม่สนิทเมื่อเกิดการทับถม ทำให้เกิดเป็นคุณสมบัติเฉพาะของไไดอะตอมไมต์คือ มีรูพรุน (porosity) สูง ความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิวจำเพาะสูง และความสามารถในการดูดซับสูง ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของไไดอะตอมไมต์จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ตัวช่วยกรอง (Filter aids) ตัวเติมปรับสภาพ (Functional filler) ทำวัสดุผสมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregates) ฉนวนกันความร้อน (Insulator) และวัสดุดูดซับ (Absorbent)

## 2.1.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นวัสดุกึ่งตัวนำประเภทเซรามิกออกไซด์ชนิดหนึ่งที่สามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ และได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใช้เปลี่ยนพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรหรือนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Nano-titanium dioxide) เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้พลังงานแสงซึ่งเป็นพลังงานสะอาดกระตุ้นผ่านการโฟโตคะตะไลซิส โดยฉายแสงยูวีไปยังสารกึ่งตัวนำในน้ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ[5] ดังรูปที่ 2.3 ได้แก่

1. รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งพบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูง

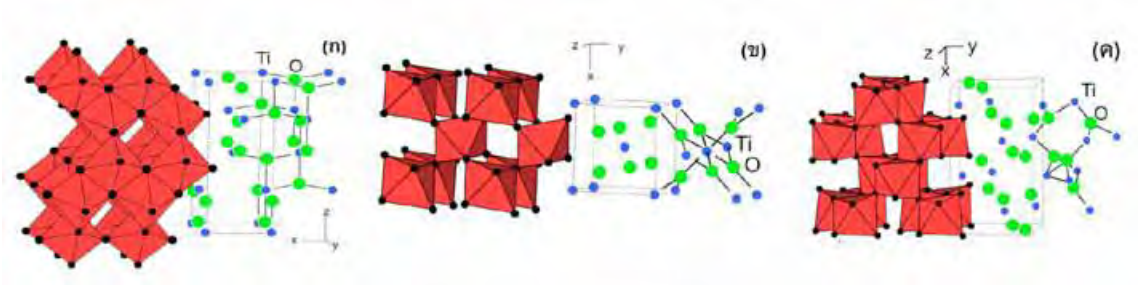
2. อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นรูไทล์

3. บรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เสถียรที่อุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนสูงกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นรูไทล์

โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันส่งผลให้คุณสมบัติแตกต่างกัน โดยที่โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการเร่งด้วยแสงคือ โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส และรูไทล์ ผลึกของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยามากกว่า ส่วนโครงสร้างผลึกแบบบรูคโคไต์นั้นทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ง่าย



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบ (ก) อะนาเทส (Anatase) (ข) รูไทล์ (Rutile) (ค) บรูคโคไต์ (Brookite) [5]

## 2.1.6 สีย้อม

สีย้อม (Dye) เป็นสารที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็ยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดมีคุณสมบัติในการละลายน้ำ ในขณะที่บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำ แต่มีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของ สีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆกันไป [11] การจำแนกสีย้อม สีย้อมที่นำมาใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกประเภทได้เป็น 3 ประเภท [12]

### 2.1.6.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

การแบ่งสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) สีย้อม (Dyes) คือ สีย้อมที่ละลายน้ำได้
- 2) เม็ดสี (Pigment) คือ สีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ

เมื่อทำการย้อมจะต้องทำให้สีสามารถเคลื่อนเข้าสู่เส้นใยแล้วเกิดการยึดติดกับเส้นใยได้ โดยกระบวนการเป็นได้ทั้งแบบเชิงกลหรือเชิงเคมี เมื่อสีย้อมอยู่ในรูปของสารละลายแล้วจะเป็นการยากต่อการจำแนกว่าสีที่ละลายอยู่นั้นเป็นสีย้อมหรือเม็ดสี

### 2.1.6.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี

การจำแนกสีย้อมโดยกรรมวิธีนี้ ถือเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากสีในกลุ่มเดียวกันอาจมีวิธีย้อมที่แตกต่างกันและการทำงานกับชนิดของเส้นใยต่างกัน สามารถจำแนกได้เป็น 11ชนิด คือ

1. Azo Colorants
2. Phenylmethane Dyes
3. Xanthene Dyes
4. Indigoid Dyes
5. Polyyloquinone Dyes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Sulphur Pusion Dyes
7. Amine Oxidation Colorants
8. Phthalocyanine Colorants
9. Onium Dyes
10. Reactive Dyes
11. Pigment

### 2.1.6.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน

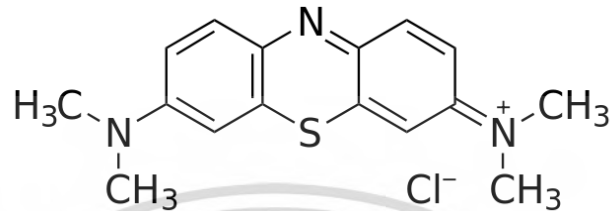
การจำแนกสีย้อมโดยวิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกต่อผู้ใช้งาน ทั้งนี้ยังเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมผลิตสี สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. สีเบสิก (Basic) เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดที่มีประจุบวกของเกลือแอมโมเนียมซัลโฟเนียมหรือออกโซเนียมซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่จะย้อมขนสัตว์
2. สีแอซิด (Acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกำมะถัน ใช้ในการย้อมขนสัตว์ อาจใช้ในการย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่ประเภทเซลลูโลสบริสุทธิ์จำพวก ปอ ป่าน
3. สีมอร์แดนท์ (Mordant) เป็นสีที่มีต้นแบบมาจากสีแอซิดและได้รับการพัฒนาโดยการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิด ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน
4. สีไดเรกต์ (Direct) เป็นสารประกอบเอโซ มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้มีความสามารถในการละลายในน้ำสูง จึงทำให้ไม่คงทนต่อกระบวนการที่ใช้น้ำมาก ใช้ในการย้อมฝ้ายหรือเส้นใยเซลลูโลส
5. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีย้อมประเภทไม่ละลายน้ำ จะเกิดเป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ ใช้ในการย้อมเส้นใยอาซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย
6. สีอะโซอิก (Azoic Dyes) เป็นสารประกอบเอโซ ที่ตัวสีไม่ละลายน้ำ หากย้อมด้วยสารประเภทฟีนอลจะก่อตัวเป็นสีบนเส้นใย แล้วจึงย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเนียม เนื่องจากเกลือไดอะโซเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบเอโซที่ให้สี ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส
7. สีแว็ต (Vet Dyes) เป็นกลุ่มสีที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ อินดิโก (Indigo) และ แอนทราควิโนน (Antraquinone) การย้อมสีประเภทนี้จะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายก่อนก่อนทำให้เป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนเส้นใย ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสเช่นฝ้าย
8. สีกำมะถัน (Sulphur Dyes) เป็นกลุ่มสีมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย ในปัจจุบันได้มีการนำสีไปรดิคส์เพื่อให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น
9. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorant) เป็นสีที่เกิดจากการออกซิไดซ์เกลืออะนีนีลีนด้วยสารเคมีที่เหมาะสม
10. สีโอเนียม (Onium Dyes) เป็นเม็ดสีที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อให้ความสามารถในการละลายน้ำ ซึ่งกรรมวิธีการย้อมจะดำเนินการเช่นเดียวกับสีแว็ต โดยการให้สีดูดซึมผ่านเข้าเส้นใยและเปลี่ยนกลับเป็นสีที่ไม่ค่อยละลายน้ำอีกครั้ง ส่วนใหญ่จะใช้ในงานพิมพ์
11. สีโลหะ (Mineral Colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ หากต้องการย้อมต้องทำให้สารนี้เกิดการตกตะกอนในเส้นใยก่อน
12. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.6.4 เมทิลีนบลู (Methylene Blue : MB)

เมทิลีนบลูคือสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic Compound) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 มีสูตรโมเลกุล  $C_{16}H_{18}ClN_3S$  ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง ไร้กลิ้ง สีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินจัดเป็นสีประเภทสีเบสิคคุณสมบัติของเมทิลีนบลูแสดงในตารางที่ 2.1 [13]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมทิลีนบลู

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเมทิลีนบลู

คุณสมบัติทั่วไป	
สูตรโมเลกุล	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
มวลต่อโมล (กรัมต่อโมล)	319.8
สถานะที่อุณหภูมิห้อง	ของแข็ง
ขนาดโมเลกุล	X (อังสตรอม) = 4 Y (อังสตรอม) = 7.93 Z (อังสตรอม) = 16.34
คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	100-110
ความสามารถในการละลายในน้ำ (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	4

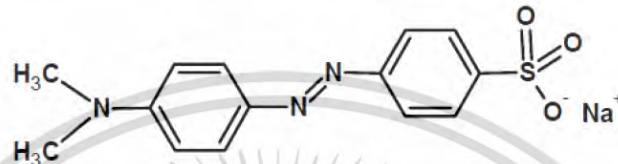
เมทิลีนบลูใช้งานในหลายสาขา เช่น ชีววิทยา การแพทย์ เคมี และ อุตสาหกรรม ในสาขาชีววิทยา เมทิลีนบลูใช้เป็นอินดิเคเตอร์เพื่อศึกษาเซลล์ ทางการแพทย์จะใช้คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อของเมทิลีนบลู สำหรับภาคอุตสาหกรรมเมทิลีนบลูมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่นการย้อมสีกระดาษ ผ้า หรือไหม และใช้เคลือบกระดาษ

โดยทั่วไปเมทิลีนบลูจะใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นผลให้เกิดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์และสีที่สูง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ สำหรับอันตรายต่อมนุษย์ หากสัมผัสโดยตรง เช่นการสูดดม หรือกลิ้ง และอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6.5 เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange :MO)

สีย้อมเมทิลออเรนจ์จัดอยู่ในสีย้อมประเภทสีไตรงัท (Direct Dyes) มีหมู่ Azo มีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.5 ถือว่าเป็นที่นิยมของสีย้อมทั้งทางด้านสิ่งทอและสีส้นในวงการอื่นๆ ด้วยความที่ว่าเป็นกลุ่มที่สามารถให้ค่าความเข้มเชิงโมลสูง สัณเคราะห์ง่าย และราคาสมเหตุผล แต่เมทิลออเรนจ์เป็นสีย้อมที่มีหมู่ Azo (-N=N-) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์แล้วจะเกิดการ Reduction cleavage เกิดเป็นสารประกอบ Aromatic amine ชนิดต่างๆ อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่เป็นต้นเหตุของการกลายพันธุ์ได้ [14] คุณสมบัติของของสีย้อมเมทิลออเรนจ์แสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของของสีย้อมเมทิลออเรนจ์

ชื่อ IUPAC	4-dimethylaminoazobenzene-4-sulfonic acid sodium salt
สูตรโมเลกุล	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
น้ำหนักโมเลกุล	327.33 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	มากกว่า 300 องศาเซลเซียส
การละลายน้ำ	ละลายได้ในน้ำ
สีกลุ่ม	สีไตรงัท (Direct Dyes)
ช่วงเปลี่ยนพีเอช	3.1-4.4
สีเปลี่ยนที่พีเอช	สีแดง (3.0) ถึงสีเหลือง (4.4)
การดูดกลืนความยาวคลื่น	465 นาโนเมตร

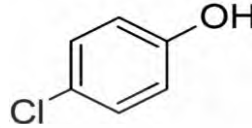
### 2.1.7 คลอโรฟีนอล

4-คลอโรฟีนอล หรือ p-คลอโรฟีนอล ( $C_6H_5ClO$ ) เป็นสารประกอบฟีนอลที่มีอะตอมของคลอรีนมาเกาะที่ตำแหน่งพาราแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยสารประกอบฟีนอลมักใช้มากทั้งในทางเกษตรและอุตสาหกรรม โดยในทางเกษตรใช้ในการเตรียมสารฆ่าแมลง สารปราบศัตรูพืช สารฆ่าเชื้อราและป้องกันการติดเชื้อ ส่วนในอุตสาหกรรมมีการใช้เป็นสารตั้งต้นหรือตัวกลางในการผลิตพลาสติก กระจก ยาสี เรซิน รวมถึงการใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ น้ำยาล้างรูป และอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในสารปนเปื้อนของแหล่งน้ำธรรมชาติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ [15]

โดย 4-คลอโรฟีนอล มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีขาวที่มีกลิ่นของกลุ่มฟีนอลที่รุนแรงมาก สามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ไม่สามารถลุกไหม้ได้ มีมวลโมเลกุล 128.56 กรัม/โมล มีความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพต่ำ มีครึ่งชีวิตยาวนาน มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่ 428 และ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

109.8 องศาฟาเรนไฮต์ ตามลำดับ ที่ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ 4-คลอโรฟีนอลยังจัดเป็นสารพิษและสารก่อมะเร็ง หากได้รับการสูดดมจะเกิดอาการปวดศีรษะ เวียนหัว ซึ่พจรอ่อนแอ หากกลืนจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อปากและกระเพาะอาหาร หากสัมผัสกับดวงตาหรือผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง และเกิดแผลไหม้ได้ อีกทั้ง 4-คลอโรฟีนอลยังก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์และคลอรีนที่เป็นพิษเมื่อถูกเผาไหม้ [16]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ 4-คลอโรฟีนอล

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการฟenton ถูกค้นพบโดย H.J.H. Fenton ในปี 1876 กระบวนการฟentonและกระบวนการโฟโตฟenton ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการฟentonและกระบวนการโฟโตฟenton

สารประกอบอินทรีย์	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	ปริมาณเหล็ก (mg/L)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
Penicillin G	200	680	55	3.5	-	83.3	[17]
Sulfamethoxazole	200	300	10	2.8	25	98	[18]
Phenol	200	1080	5	3	-	98	[19]
Xylene	15	5100	14.5	2.5-3	-	94.5	[20]

พบว่ากระบวนการฟentonและกระบวนการโฟโตฟentonแบบปฏิกิริยาเอกพันธ์ สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ได้ประสิทธิภาพสูง แต่มีปัญหาการปนเปื้อนของเหล็กตกค้างในน้ำทิ้ง จึงมีงานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็ง คือตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รอสบนตัวรองรับชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตฟentonแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

สารประกอบอินทรีย์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	ปริมาณเหล็ก (mg/L)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
Methyl Violet	BiFeO <sub>3</sub>	12.5	680	50	5	25	49.8	[21]
Rhodamine B	BiFeO <sub>3</sub>	4.8	340	50	5	25	70	[21]
Phenol	Fe/zeolite	50	100	20	7	35	100	[22]
Methylene Blue	LiFe(WO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	100	170	100	5	25	84	[13]
Polyacrylamide	Fe(III)-SiO <sub>2</sub>	100	200	100	6.8	25	94	[24]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีซีโอไลต์เป็นตั้งรองรับจะมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสูงเหมาะสำหรับการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงมีงานวิจัยที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตั้งรองรับแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตั้งรองรับ

สารประกอบอินทรีย์	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mM)	ความเข้มข้น $H_2O_2$ (mM)	ปริมาณเหล็ก (%wt)	pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
Yellow 84	Fe/Y	0.052	20	2.76	5	50	99.9	[25]
Brilliant Blue	Fe/ZSM-5	0.4	30	-	2.5	-	90	[26]
MTBE	Fe/ZSM-5	1.13	29.4	2.2	7	-	96	[27]
MTBE	Fe/Beta	1.13	176.5	1.3	7	-	96	[27]

พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ที่มีซีโอไลต์เป็นตั้งรองรับจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบอินทรีย์สูง จึงเป็นที่นิยมใช้เป็นตั้งรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัส

ในช่วงปี 2014-2016 งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตเฟนตัน ยังมีการเผยแพร่อย่างต่อเนื่อง Parkhomchuk และคณะ[28] ศึกษาบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-ZSM-5 ที่เตรียมจากหลายเทคนิคเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาและความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา Madeira และคณะ[29] ศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันอย่างต่อเนื่องของตั้งเร่งปฏิกิริยา Fe/ZSM-5 เพื่อกำจัดสีออลเจน พบว่าผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้นไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ เวลา และขนาดอนุภาคของตั้งเร่งปฏิกิริยา มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี และได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสีออลเจน Singh และคณะ[30] ศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันโดยใช้ Cu/zeolite Y เพื่อกำจัดสีคองโกเรด พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีคองโกเรดคือ ปริมาณคอปเปอร์ pH ความเข้มข้นไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ โดยสภาวะที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 93.58 %

## บทที่ 3

### การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ

#### 3.1 บทนำ

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเพนตันโดยใช้แสงหรือที่เรียกว่ากระบวนการโฟโตเพนตัน (Photo-Fenton Process) มีการทำทดลองเพื่อศึกษาแนวทางและประสิทธิภาพของระบบบำบัด โดยเบื้องต้นสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความหลากหลายของสารประกอบอินทรีย์ และมีความเป็นพิษสูง ซึ่งให้ผลการทดลองเป็นไปในแนวทางที่ดี โดยสามารถลดค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ลงได้มากกว่า 80% และใช้พลังงานในการเดินระบบต่ำ

ในงานวิจัยบทนี้ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนซีโอไลต์เอ ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างซีโอไลต์เอ กับสารละลายเฟอรัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้แก่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100, 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็กที่ 10, 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง pH 3-8 ทำการทดลองภายในตู้แสงยูวี ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

#### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ

1. ชั่งโซเดียมเมทาซิลิเกต 8 กรัมเติมน้ำกลั่น 44 กรัมจากนั้นตั้งบีกเกอร์สารละลายไว้บนเครื่องกวนสาร โดยใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารลงในบีกเกอร์ละลายให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.4 กรัม เติมน้ำให้ได้น้ำหนักรวมเท่ากับ 34 กรัม คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. ชั่งโซเดียมอะลูมิเนต 6 กรัมเติมสารละลายในข้อ 2 ลงไปจากนั้นตั้งบีกเกอร์สารละลายไว้บนเครื่องกวนสารโดยใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารลงในบีกเกอร์ปั่นกวนจนสารละลายใส
4. ค่อยๆหยดสารละลายในข้อ 1 ลงในสารละลายในข้อ 3 โดยใช้หลอดหยด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่สลับกันระหว่างอะลูมินาและซิลิกา ปั่นกวนสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. เตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 โดยต่อสายยางกับตัวคอนเดนเสตให้มีทิศทางไหลของน้ำตามลูกศร และตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนไว้ที่ 250 องศาเซลเซียส
6. เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ถ่ายสารละลายในข้อ 4 ลงในขวดก้นกลมระวังอย่าให้สารละลายติดปากขวดเพราะอาจทำให้ตั้งข้อต่อออกจากปากขวดยาก ใส่แท่งแม่เหล็กลงไปในขวดก้นกลม
7. จุ่มขวดก้นกลมที่จ่อกับคอนเดนเสตลงในบีกเกอร์น้ำร้อน ใช้กระดาษฟลอยด์ปิดปากบีกเกอร์น้ำร้อนไว้เพื่อไม่ให้น้ำในบีกเกอร์ระเหยออก ปั่นกวนสารในขวดก้นกลม 1 ชั่วโมง

8. เมื่อครบ 1 ชั่วโมงแล้ว ดึงขวดกั้นกลมออกจากข้อต่อแล้วจุ่มก้นขวดลงในน้ำอุณหภูมิห้องเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลาย
9. กรองผลึกซีโอไลต์ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองวางในกรวยกรองบุชเนอร์
10. ล้างผลึกที่กรองได้ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปกรองใหม่ ทำซ้ำ 2-3 ครั้ง
11. นำแผ่นกระดาษกรองที่มีผลึกซีโอไลต์เอวางบนกระดาษกรองคูลด้วยกระดาษฟลอยด์เจาะรู นำไปอบในตู้อบสารที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน
12. เก็บผลึกใส่ขวดแก้วเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์โดยใช้เครื่อง XRD ที่ช่วงสแกนเท่ากับ 5-50 องศาและสแกนสเตปเท่ากับ 2 องศาต่ออนาที
13. เตรียมสารละลายเหล็ก โดยชั่งเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตจำนวน 6.223 กรัมละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
14. นำผลึกซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 10 กรัมไปปั่นกวนในสารละลายเหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน
15. กรองผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนซีโอไลต์เอด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วนำไปอบในตู้อบสารที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน

### 3.2.2 การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน

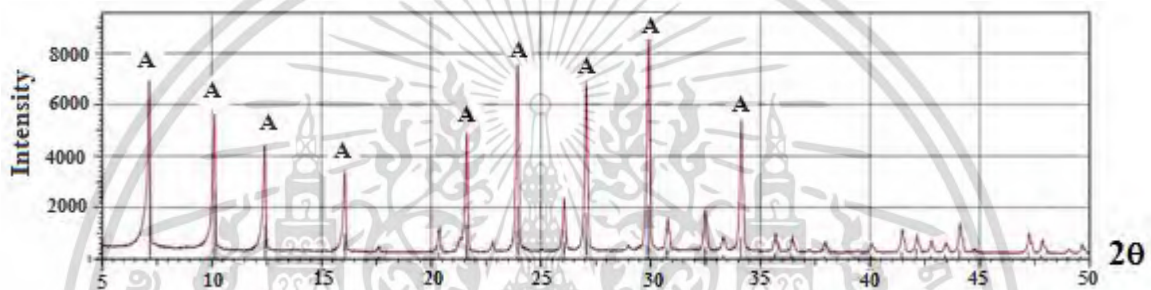
1. ตวงสารละลายเมทิลีนบลูจำนวน 250 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์นำไปตั้งไปบนเครื่องปั่นกวนสารในตู้ยิวี่โดยยังไม่ต้องเปิดไฟ
2. ดูดสารละลายเมทิลีนบลูไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่เวลา 0 นาที
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนซีโอไลต์เอด้วยความเข้มข้นเหล็กในการทดลองเท่ากับ 100 มิลลิกรัมเหล็กต่อลิตร
4. เตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ใส่สารที่เตรียมในข้อ 3 และ 4 ลงในบีกเกอร์เมทิลีนบลูในข้อ 1 ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษกรองเปิดไฟตู้ยิวี่แล้วจับเวลา
6. ใช้เวลาทำปฏิกิริยาทั้งสิ้น 180 นาทีโดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที นำตัวอย่างไปแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบเท่ากับ 5,000 รอบต่ออนาทีเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำสารละลายที่แยกตะกอนแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร แล้วบันทึกค่า
7. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเหล็กเป็น 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. ทำซ้ำข้อ 1-6 อีก 2 ครั้งโดยครั้งที่สองไม่ต้องปรับค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งจะวัดค่า pH ได้เท่ากับประมาณ 5.7 และครั้งที่ 3 ปรับค่า pH ของสารละลายเมทิลีนบลูให้เท่ากับ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ

สังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยใช้ โซเดียมอะลูมิเนต โซเดียมเมทาซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ตกผลึกที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว เมื่อนำตัวอย่างไปตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer พบว่าเกิดพีคหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 7.14 10.12 12.40 16.06 21.62 23.94 27.06 29.90 และ 34.14 องศา ซึ่งตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีโครงสร้างผลึกตรงกับซีโอไลต์เอ [7] ดังรูป 3.1 จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นเป็นผลึกซีโอไลต์เอ



รูปที่ 3.1 XRD Pattern ของ ซีโอไลต์เอ

แลกเปลี่ยนไอออนเหล็กโดยการปั่นกวนซีโอไลต์เอ 10 กรัมในสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.0224 โมลาร์ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 ชั่วโมง ไอออนของเหล็กจะถูกแลกเปลี่ยนประจุกกับไอออนของโซเดียมที่อยู่บนโครงสร้างผลึกซีโอไลต์เอ วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายก่อนและหลังทำการแลกเปลี่ยนประจุกกับซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณเหล็กบนซีโอไลต์เอ

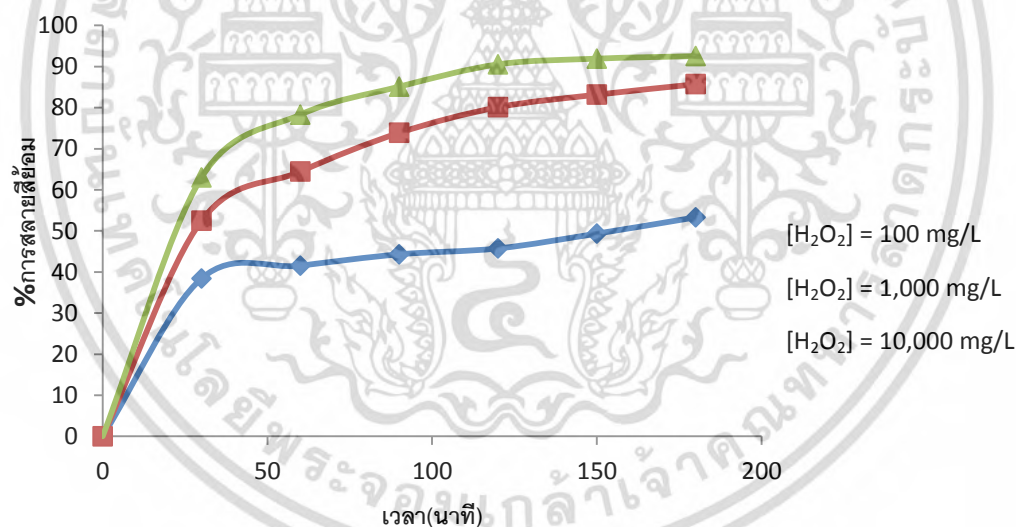
ตัวอย่าง	ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัม)
สารละลายก่อนทำการแลกเปลี่ยนประจุกกับซีโอไลต์เอ	1,446
สารละลายหลังทำการแลกเปลี่ยนประจุกกับซีโอไลต์เอ	27
ปริมาณเหล็กที่อยู่บนโครงสร้างซีโอไลต์เอ	1,419

จากตารางที่ 3.1 พบว่าซีโอไลต์เอมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกกับไอออนของเหล็กได้ดี โดยไอออนเหล็กสามารถเข้าไปในโครงสร้างซีโอไลต์ได้ถึง 97.86% ดังนั้นในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนซีโอไลต์เอ 1 กรัมมีปริมาณเหล็กเท่ากับ 141.9 มิลลิกรัม

### 3.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

#### 3.3.2.1 ความเข้มข้น $H_2O_2$

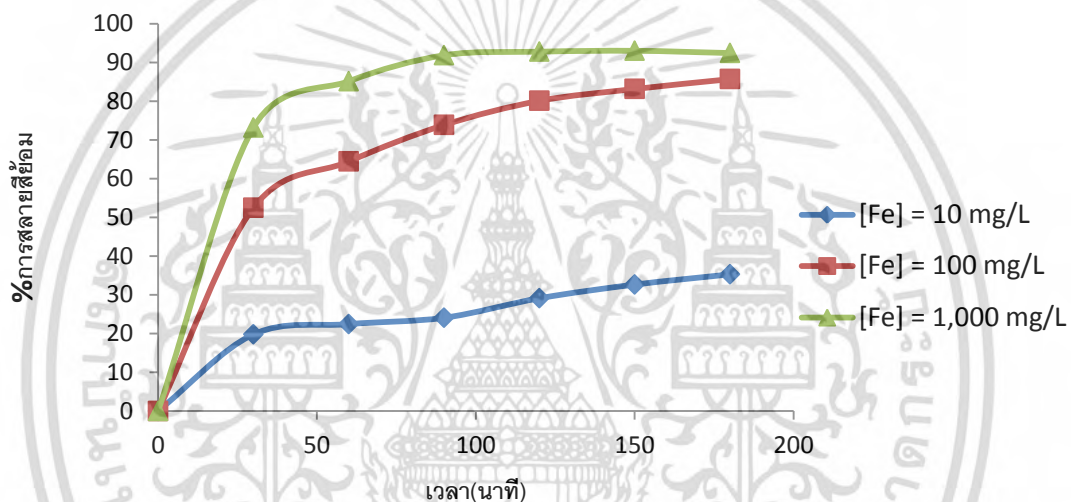
ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนซีโอไลต์เอทีสภาวะความเข้มข้นเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7 (สภาวะปกติ) อุณหภูมิห้อง โดยความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกปรับเปลี่ยนให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 100, 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมกับเวลาแสดงดังรูปที่ 3.2 จากกราฟพบว่าในช่วง 30 นาทีแรกมีอัตราการสลายสีย้อมมากที่สุดและในช่วงหลังนาทีที่ 120 เป็นต้นไปกราฟมีแนวโน้มคงที่เนื่องจากความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมได้ 53% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมได้ 86% และ 92.55% ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์โดยไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) ที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อมให้กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำ [31]



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [Fe] 100 mg/L pH 5.7 ที่  $[H_2O_2]$  ต่างๆกัน (100, 1,000 และ 10,000 mg/L)

### 3.3.2.2 ความเข้มข้นสารละลายเหล็ก

ปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของเหล็กเป็น 10, 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยตัวแปรควบคุมได้แก่ ความเข้มข้นเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7 (สภาวะปกติ) อุณหภูมิห้อง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมกับเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 จากกราฟพบว่าที่ความเข้มข้นเหล็กเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมได้ 35% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเหล็กเป็น 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมได้ 86% และ 92% ตามลำดับเนื่องจากเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นเหล็กเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

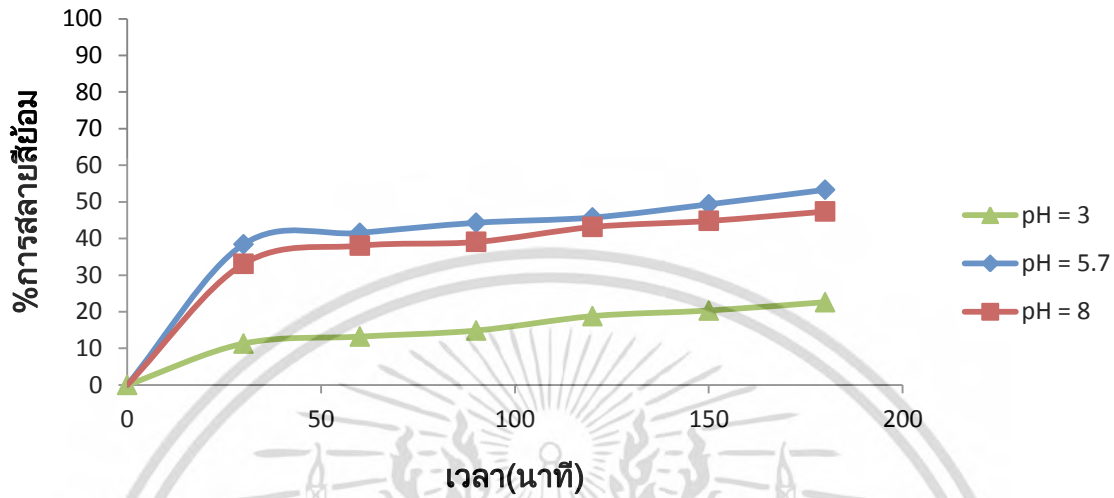


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 1,000 mg/L pH 5.7 ที่ [Fe] ต่างๆกัน (10, 100 และ 1,000 mg/L)

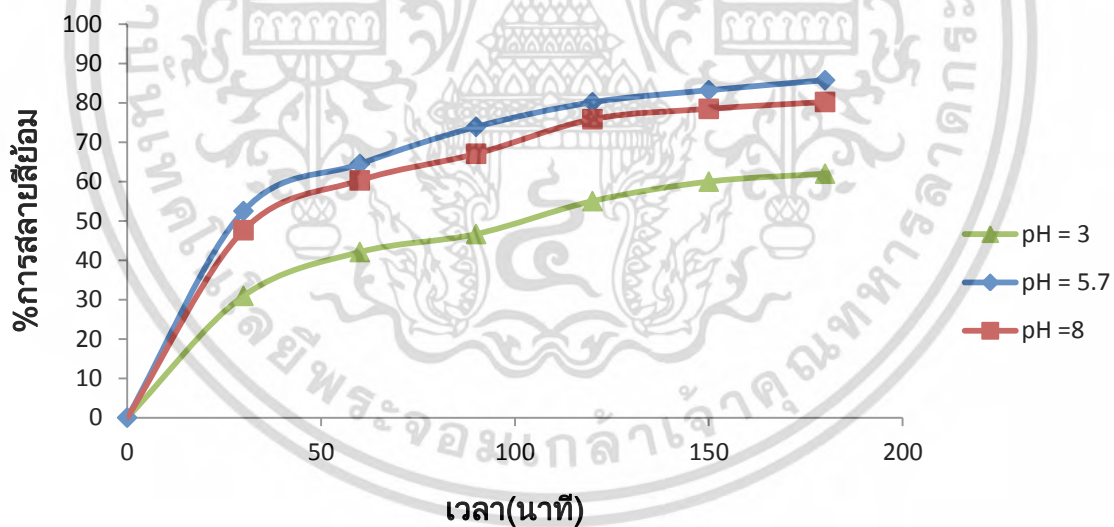
### 3.3.2.3 pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู

pH เริ่มต้นของระบบจะถูกปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยตัวแปรควบคุมคือความเข้มข้นเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิห้อง ปรับเปลี่ยน pH ทั้งสิ้น 3 ค่าได้แก่ pH 3 5.7 และ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมกับเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 จากกราฟพบว่าสภาวะที่ประสิทธิภาพในการสลายย้อมดีที่สุดคือที่ pH 5.7 (สภาวะปกติ) สามารถสลายสีย้อมได้ 53% ในขณะที่ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมในสภาวะกรด (pH 3) และสภาวะเบส (pH 8) เท่ากับ 23% และ 47% ตามลำดับและเมื่อทดลองปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1,000 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยทดลองที่ pH 3 5.7 และ 8 ค่าดั้งเดิมพบว่าสภาวะที่ประสิทธิภาพในการสลายย้อมดีที่สุดคือที่ pH 5.7

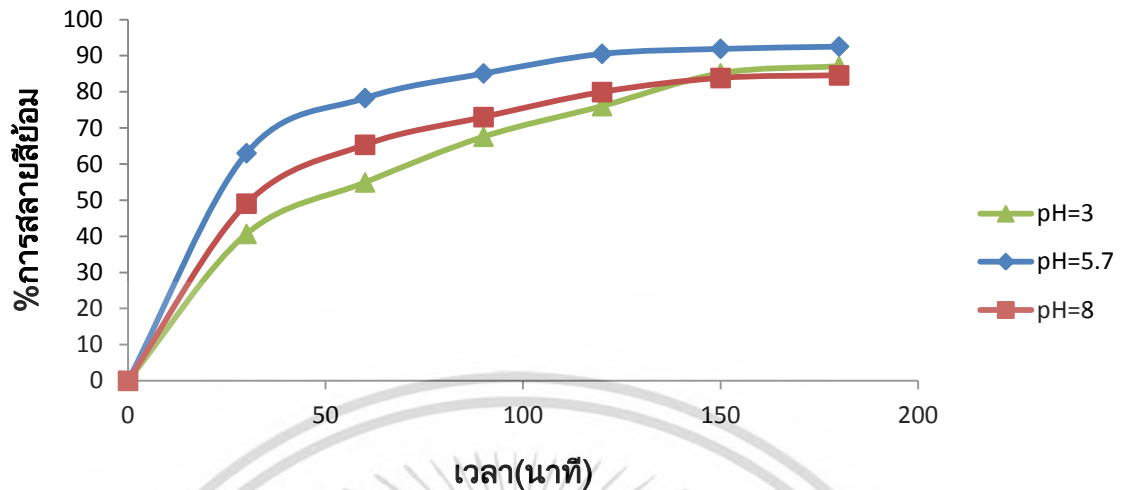
(สภาวะปกติ) โดยสามารถสลายสีย้อมได้ 86% และ 92.55% ตามลำดับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมกับเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 100 mg/L ที่ pH 3 5.7 และ 8

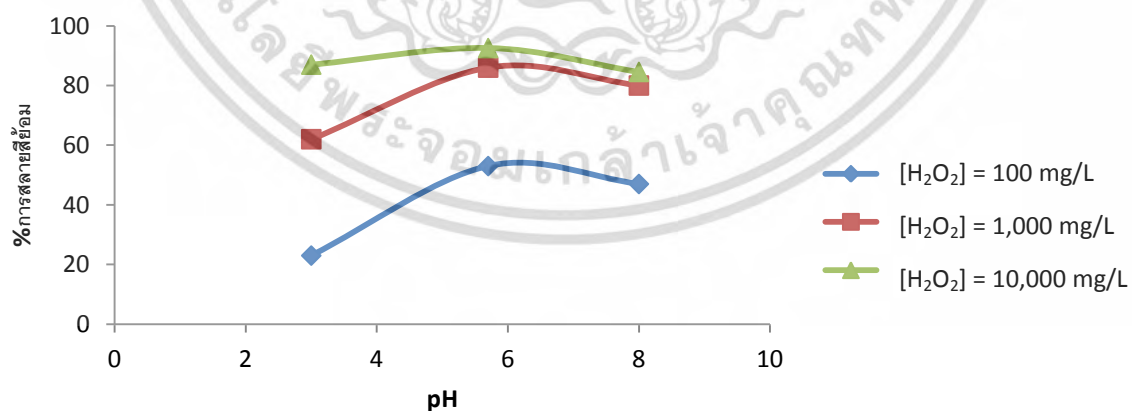


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 1,000 mg/L ที่ pH 3 5.7 และ 8



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [Fe] 100 mg/L [MB] 10 mg/L [ $H_2O_2$ ] 10,000 mg/L ที่ pH 3, 5.7 และ 8

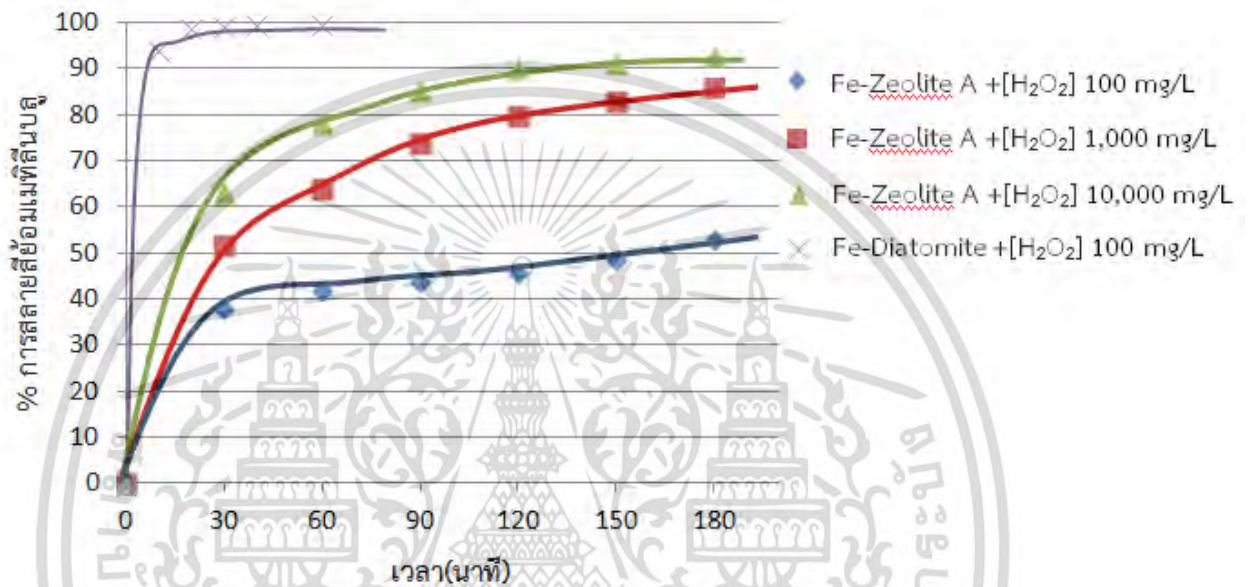
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกต่างกันดังรูปที่ 3.7 พบว่าที่ pH 5.7 (สภาวะปกติ) ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 100, 1,000, 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมได้ 53% 86% และ 92.55% ตามลำดับ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู คือสภาวะที่ pH 5.7 (สภาวะปกติ) ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะกรด (pH 3) ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ [32] ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายสีย้อมลดลง เช่นเดียวกับกับที่สภาวะเบส (pH 8) เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรในสภาวะเบสซึ่งส่งผลให้การแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง [33]



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับเปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมที่ [MB] 10 mg/L [Fe] 100 /L [ $H_2O_2$ ] 100, 1,000 และ 10,000 mg/L ที่ pH 3 5.7 และ 8

### 3.3.3 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอกับเหล็กไดอะตอมไมต์ต่อการสลายสีข้อมเมทิลีนบลู

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีข้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นสารละลายสีข้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7 ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอ และเหล็กไดอะตอมไมต์ แสดงผลดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีข้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.7

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เหล็กไดอะตอมไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถสลายสีข้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 95% ภายในเวลา 10 นาที ในขณะที่เมื่อใช้เหล็กซีโอไลต์เอเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะเดียวกันนั้นสามารถสลายสีข้อมเมทิลีนบลูได้ 53% ภายในเวลา 180 นาที ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีพื้นที่ผิวมาก และมีรูพรุนขนาดเล็ก (4.2 อังสตรอม) และมีความเป็นขั้วสูง [34] จึงทำให้โมเลกุลของไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH<sup>•</sup>) ที่เข้าไปในโครงสร้างเกิดแรงอันตรกิริยากับซีโอไลต์เอ ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ต้องใช้ในทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสีข้อมลดลง ความสามารถในการสลายสีข้อมจึงลดลงด้วยเช่นกัน [35] ทำให้ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นปริมาณมากในการทำปฏิกิริยา และเนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดกว้างยาวxสูงเท่ากับ 4x7.93x16.34 อังสตรอม [36] ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของซีโอไลต์เอ ทำให้เมทิลีนบลูไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 129 อังสตรอม ทำให้เมทิลีนบลูสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ จากผลการทดลองข้างต้น ประสิทธิภาพในการสลายสีข้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอ

### 3.4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ ณ อุณหภูมิห้องโดยศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นเหล็กและ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม พบว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อมเมทิลีนบลูให้ไม่มีสีและไม่เป็นพิษ ในขณะที่เดียวกันการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดได้เร็วขึ้น และ pH ที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูคือ pH 5.7 (สภาวะปกติ) ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะกรดปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายสีย้อมลดลง เช่นเดียวกันกับที่ในสภาวะเบสเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรในสภาวะเบสซึ่งส่งผลให้การแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH เท่ากับ 5.7 สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเท่ากับ 92.55%

จากการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์และเหล็กซีโอไลต์เอ ทำปฏิกิริยาที่ภาวะเดียวกัน ที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7 ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 95% ภายในเวลา 10 นาที ในขณะที่เมื่อใช้เหล็กซีโอไลต์เอเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 53% ภายในเวลา 180 นาที ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เอ มีรูพรุนขนาดเล็ก (4.2 อังสตรอม) และมีความเป็นขั้วสูง จึงทำให้โมเลกุลของไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH<sup>-</sup>) ที่เข้าไปในโครงสร้างเกิดแรงอันตรกิริยากับซีโอไลต์เอ ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสีย้อมลดลง ความสามารถในการสลายสีย้อมจึงลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นปริมาณมากในการทำปฏิกิริยา และเนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดกว้าง×ยาว×สูงเท่ากับ 4 × 7.93 × 16.34 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของซีโอไลต์เอ ทำให้เมทิลีนบลูไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 129 อังสตรอม ทำให้เมทิลีนบลูสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ จากผลการทดลองข้างต้นประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์มีค่าสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอ

ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

## บทที่ 4

### การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย กระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

#### 4.1 บทนำ

จากการศึกษาบทที่ 3 พบว่าถ้าต้องการ เปอร์เซ็นต์การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูสูง ต้องใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้เวลานาน 200 นาที แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เหมาะสมกับกระบวนการโฟโตเฟนตัน ดังนั้นทำการเปลี่ยนตัวรองรับจากซีโอไลต์เอ เป็นไดอะตอมไมต์ ไดอะตอมไมต์เป็นวัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง พบมากในประเทศไทย และมีราคาถูก จึงนิยมใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยบทนี้ออกแบบการทดลองและหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ โดยใช้วิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต ที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 300-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 0.2-0.8 กรัมต่อลิตรและ pH 3-7 และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

#### 4.2. วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 4.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

1. ชั่งวัสดุรองรับไดอะตอมไมต์ 20 กรัม
2. ชั่ง  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  5.4 กรัมแล้วละลายในน้ำกลั่น 28 มิลลิลิตร
3. ค่อยๆหยดสารละลาย  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ลงบนไดอะตอมไมต์ให้ทั่ว
4. อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

##### 4.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction spectrometry : XRD)
2. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุแต่ละชนิด (X-Ray Fluorescence spectrometry : XRF)
3. วิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

4. วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาหลัก ไตอะตอมไมต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET)
5. วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AAS-680 ของบริษัท Shimadzu
6. ตรวจวัดหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม(TOC) ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer ของบริษัทที่หือ Shimadzu

#### 4.2.3 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

##### 4.2.3.1 การออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (CCD) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในกาสลาย สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยขอบเขตปัจจัยที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับ		
			ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	X1	มิลลิกรัมต่อลิตร	50	75	100
เหล็กไตอะตอมไมต์	X2	กรัมต่อลิตร	0.4	0.6	0.8
เมทิลีนบลู	X3	มิลลิกรัมต่อลิตร	300	400	500
pH	X4	-	3	5	7

##### 4.2.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลอง

วิเคราะห์การถดถอยซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชัน Second-order Response ดังสมการที่ 4.1

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\beta_0$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัด

$\beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น

$\beta_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วม

$x_i$  และ  $x_j$  คือ ตัวแปรอิสระใน Coded Units

$\varepsilon$  คือ ค่าความคาดเคลื่อน

#### 4.2.4 การทดสอบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

ชุดอุปกรณ์การทดลองทำจากตู้ไม้ 6 เหลี่ยม แต่ละด้านกว้าง 25 เซนติเมตร สูง 75 เซนติเมตร ภายในติดหลอดไฟ Black light ยี่ห้อ Philip ขนาด 18 วัตต์ จำนวน 6 หลอด ที่บริเวณมุมตู้ทุกมุม ด้านบนติดตั้งพัดลมระบายอากาศ พร้อมติดตั้งสวิทช์ควบคุมการเปิด-ปิดไฟภายในตู้

- 1 เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูตามความเข้มข้นที่ต้องการปริมาตร 250 มิลลิลิตร เทใส่ ปีกเกอร์ ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียม ไฮดรอกไซด์
- 2 นำสารละลายในข้อ 1 ใส่ตู้ยวี่พร้อมปั่นกวนโดยที่ยังไม่ต้องเปิดไฟ
- 3 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ตามปริมาณที่ต้องการ จากนั้นเทใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู
- 4 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายข้อ 3 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ เปิดไฟแล้วเริ่มจับเวลา
- 5 ให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 30 นาทีแล้วจึงปิดไฟ นำสารละลายไปเหวี่ยงแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก
- 6 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer
- 7 คำนวณประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู  
คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\%Efficiency = \left( \frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

#### 4.2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์

หาค่าคงที่อัตรา (k) และพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy :  $E_a$ ) ของปฏิกิริยา

1. ทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร และ pH 5.8 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายเป็น 25 (อุณหภูมิห้อง) 50 และ 75 องศาเซลเซียส
2. เก็บสารละลายที่เวลา 0 1 2 3 5 10 และ 15 นาทีแล้วนำไปกรองด้วยไมโครฟิลเตอร์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง
3. ช่วงแรกของปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) พล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(C/C_0)$  กับ เวลา ความชันที่ได้คือค่าคงที่อัตรา (k) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3

$$-\frac{dC}{dt} = kC$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. พล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(k)$  กับ  $1/T$  ความชันที่ได้คือ  $-E_a/R$  และจุดตัดแกน  $y$  คือค่าคงที่ของอาเรเนเนียส (A) เป็นไปตามสมการที่ 4.4

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

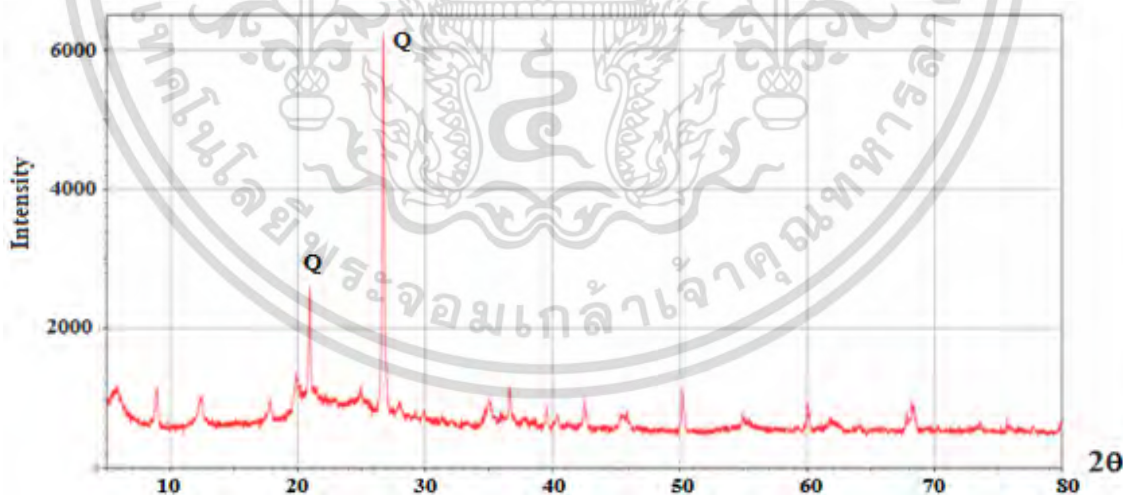
$$\ln(k) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(A) \quad (4.4)$$

### 4.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์

##### 4.3.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction technique: XRD)

จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (Dry Impregnation) โดยหดยดสารละลาย 0.69 โมลาร์ของ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ปริมาตร 28 มิลลิลิตรลงบนไดอะทอมไมต์ปริมาณ 20 กรัมแล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้มอ่อน เมื่อตรวจโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่ามีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $20.9^\circ$  และ  $26.8^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงถึงเหล็กไดอะทอมไมต์มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาในรูปแบบผลึกแบบควออร์ตซ์ [37]

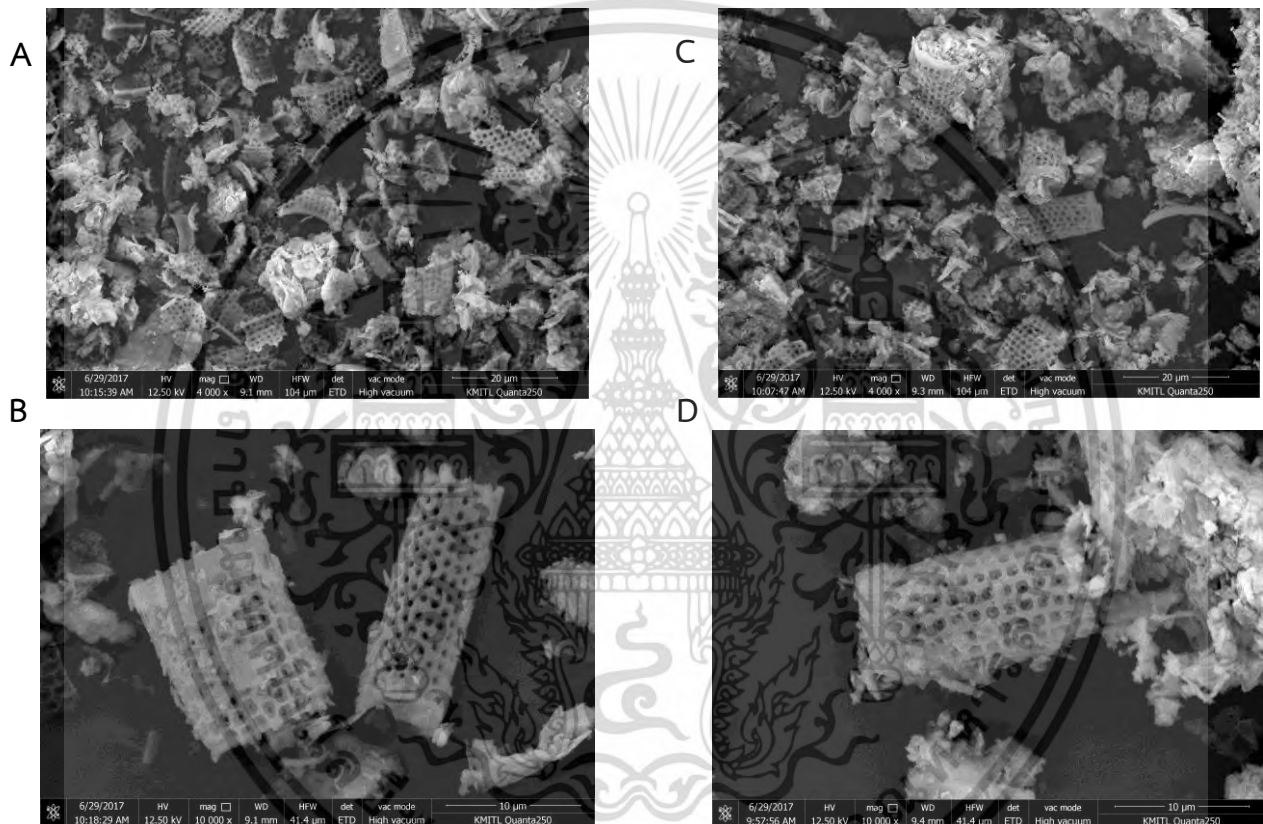


รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของไดอะตอมไมต์ก่อนและหลังเติมเหล็กพบว่าการเติมเหล็กลงบนไดอะตอมไมต์ไม่ทำให้โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไป โดยที่กำลังขยาย 10,000 เท่าพบว่าไดอะตอมไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีลักษณะคล้ายตาข่ายทรงกระบอกหลากหลายขนาด และมีรูพรุนขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของ (A) ไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (B) ไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (C) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า และ(D) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.3.1.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF)

วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.2 พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์คือออกซิเจนและซิลิกอนซึ่งมีปริมาณถึง 50.4 %wt/wt และ 31.1 %wt/wt ตามลำดับ ปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีปริมาณเท่ากับ 5.8 %wt/wt หรือคิดเป็น 57.8 มิลลิกรัมเหล็กต่อ 1 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

ตารางที่ 4.2 ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

ธาตุ	O	Si	Al	Fe	S	K	Mg	Ca	Ti
%wt/wt	50.4	31.1	6.49	5.78	3.76	1.24	0.32	0.20	0.17

#### 4.3.1.4 การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET)

วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (BET) แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 20.38 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.071 มิลลิลิตรต่อกรัมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 12.9 nm ซึ่งจัดเป็นวัสดุแบบมีโซพอร์ (Mesoporous) คือวัสดุที่มีขนาดของรูพรุน 2-50 นาโนเมตร [38] นอกจากนี้ขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ยังมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลเมทิลีนบลู

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรของรูพรุน (ml/g)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (nm)
20.38	0.071	12.9

### 4.3.2 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

#### 4.3.2.1 การออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเพนตันโดย Abdelhadi Abamrane และคณะพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเพนตันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเหล็ก และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ดังนั้นจึงใช้การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยตารางที่ 4.4 แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต และตารางที่ 4.5 แสดงลำดับการทดลอง และประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ได้จากการทดลองโดยทำการทดลองทั้งหมด 31 การทดลอง

ตารางที่ 4.4 ระดับของปัจจัยจากการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับ				
			แฟคทอเรียล (Factorial point)			แกน (Axial point)	
			ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	ต่ำ (-2)	สูง (2)
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	X1	มิลลิกรัมต่อลิตร	50	75	100	25	125
เหล็กไดอะตอมไมต์	X2	กรัมต่อลิตร	0.4	0.6	0.8	0.2	1
เมทิลีนบลู	X3	มิลลิกรัมต่อลิตร	300	400	500	200	600
pH	X4	-	3	5	7	1	9

ตารางที่ 4.5 การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

Std. Order	Run Order	ปัจจัย				%Eff
		X1	X2	X3	X4	
11	1	-1	1	-1	1	73.47
25	2	0	0	0	0	71.95
20	3	0	2	0	0	75.17
14	4	1	-1	1	1	69.08
10	5	1	-1	-1	1	81.79
8	6	1	1	1	-1	70.70
13	7	-1	-1	1	1	48.26
4	8	1	1	-1	-1	85.24
3	9	-1	1	-1	-1	69.53
7	10	-1	1	1	-1	46.23
24	11	0	0	0	2	64.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

Std. Order	Run Order	ปัจจัย				%Eff
		X1	X2	X3	X4	
19	12	0	-2	0	0	65.28
9	13	-1	-1	-1	1	65.32
27	14	0	0	0	0	69.68
31	15	0	0	0	0	70.17
29	16	0	0	0	0	70.65
15	17	-1	1	1	1	49.92
26	18	0	0	0	0	68.49
21	19	0	0	-2	0	77.23
2	20	1	-1	-1	-1	78.17
6	21	1	-1	1	-1	66.88
18	22	2	0	0	0	81.56
30	23	0	0	0	0	68.92
5	24	-1	-1	1	-1	46.63
1	25	-1	-1	-1	-1	62.84
17	26	-2	0	0	0	30.10
28	27	0	0	0	0	68.46
16	28	1	1	1	1	74.10
12	29	1	1	-1	1	87.67
22	30	0	0	2	0	46.96
23	31	0	0	0	-2	56.34

#### 4.3.2.2 แบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

ตารางที่ 4.6 แสดงผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SEcoef) สำหรับแบบจำลองการถดถอยใน Coded units ระหว่างค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อมกับตัวแปรแต่ละตัว

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

Term	CoEf	SE CoEf	T-Value	P-Value
X1	10.597	0.760	13.94	0.000
X2	2.402	0.760	3.16	0.006
X3	-8.031	0.760	-10.57	0.000
X4	1.651	0.760	2.17	0.045
X1*X1	-2.632	0.696	-3.78	0.002
X2*X2	0.967	0.696	1.39	0.184
X3*X3	-1.065	0.696	-1.53	0.146
X4*X4	-1.490	0.696	-2.14	0.048
X1*X2	0.355	0.931	0.38	0.708
X1*X3	1.75	0.931	1.88	0.078
X1*X4	-0.005	0.931	-0.01	0.996
X2*X3	-1.106	0.931	-1.19	0.252
X2*X4	0.222	0.931	0.24	0.815
X3*X4	-0.098	0.931	-0.10	0.918

ในการออกแบบการทดลองตั้งสมมติฐานหลักว่าตัวแปรทั้งสี่ตัวแปรไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (ไม่มีนัยสำคัญ:  $H_0$ ) การวิเคราะห์ตัวแปรว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่จะพิจารณาจากค่า P-Value โดยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า  $\alpha$  (Significant level) มีค่าเท่ากับ 0.05 ดังนั้นหากค่า P-Value มากกว่า 0.05 หมายความว่าไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Failed to reject  $H_0$ ) ดังนั้นเมื่อตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญ (P-Value > 0.05) ออกจะสามารถสร้างแบบจำลองลดรูปได้ดังสมการที่ 4.1

$$\%Eff = 69.67 + 10.597X_1 + 2.402X_2 - 8.031X_3 + 1.651X_4 - 2.623(X_1)^2 - 1.481(X_4)^2 \quad (4.1)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรในสมการพบว่าสัมประสิทธิ์หน้า  $X_1$  เท่ากับ +10.597 หมายความว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสีย้อมในระบบมีเพิ่มมากขึ้น สัมประสิทธิ์หน้า  $X_2$  เท่ากับ +2.402 หมายความว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะตอมไมต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการที่ 4.2 ขณะที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรหน้า  $X_3$  มีค่าเท่ากับ -8.031 หมายความว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณแสงยูวีที่ส่องผ่านไปกระตุ้นให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวลดลง ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลจึงเกิดขึ้นช้าลง [39] สัมประสิทธิ์หน้า  $X_1^2$  มีค่าเท่ากับ -2.632 หมายความว่าเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจะส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นรวมตัวกันเองกลายเป็นน้ำดังสมการที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจึงลดลง [40] และสัมประสิทธิ์หน้า  $X_4^2$  มีค่าเท่ากับ -1.481 หมายความว่าที่ pH สูงๆ ไฮโดรเจนเปอร์

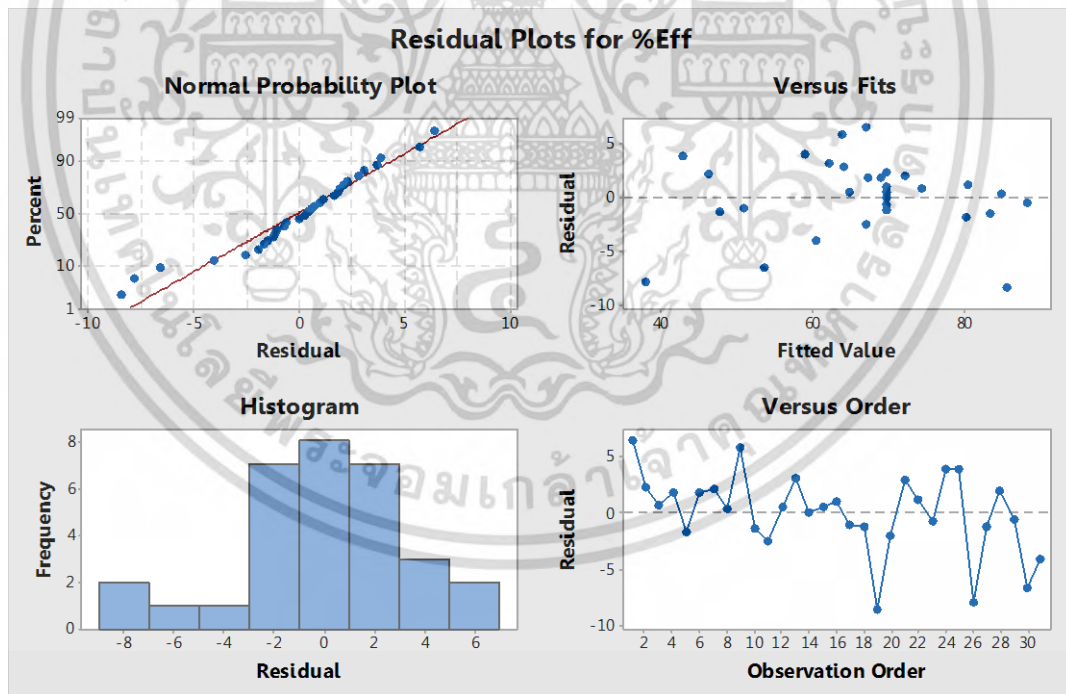
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์จะมีความเสถียรขึ้นส่งผลให้แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้น้อยลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงด้วยเช่นกัน [41] ความเหมาะสมของแบบจำลองลดรูปสำหรับค่า %Efficiency พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $R^2$ ) ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 92.9%



#### 4.3.2.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

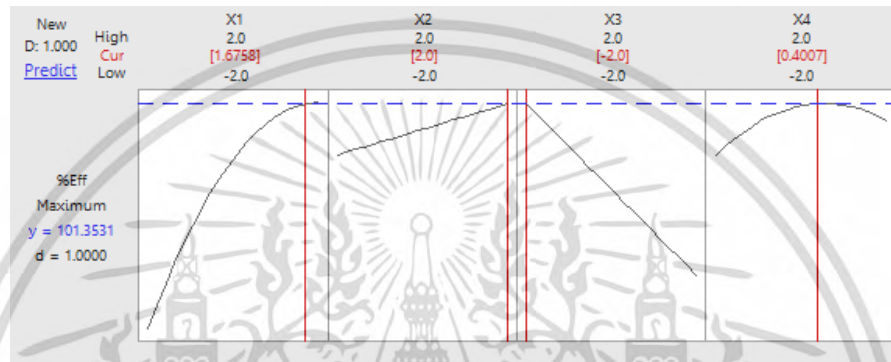
วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจากกราฟ Residual plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface) แสดงดังรูปที่ 4.3 จากกราฟ Normal probability plot พบว่า residuals มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ จากกราฟ Histogram พบว่ามีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำหรือค่า residual มีการกระจายตัวแบบปกติ จากกราฟ Residual และกราฟ Fitted value มีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวมีลักษณะเป็นแนวโน้มซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual และกราฟ Observation Order พบว่าเป็นการกระจายแบบไม่มีรูปแบบแสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.3 Residual plots จากการวิเคราะห์ที่พื้นที่ตอบสนอง

#### 4.3.2.4 ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ( $X_1 = 1.6758$ ) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1 กรัม/ลิตร ( $X_2 = 2$ ) ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ( $X_3 = -2$ ) และ pH 5.8 ( $X_4 = 0.4007$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายสีได้ 100%



รูปที่ 4.4 Optimization Plot ของการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab

ทดลองซ้ำที่ภาวะที่เหมาะสมข้างต้นเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง แสดงผลดังตารางที่ 4.7 พบว่าภาวะที่เหมาะสมสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้เฉลี่ย 99.2% เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.8% ซึ่งถือว่ามี ความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ภาวะที่เหมาะสม

Run No.	1	2	3	4	5
%Eff.	99.2	99.1	99.2	99.2	99.3

#### 4.3.3 34 โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

วัดปริมาณเหล็กในสารละลายหลังจากทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะซอมไมด์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.8 ทั้ง 5 ครั้งด้วยเครื่อง AAS ได้ผลดังตารางที่ 4.8

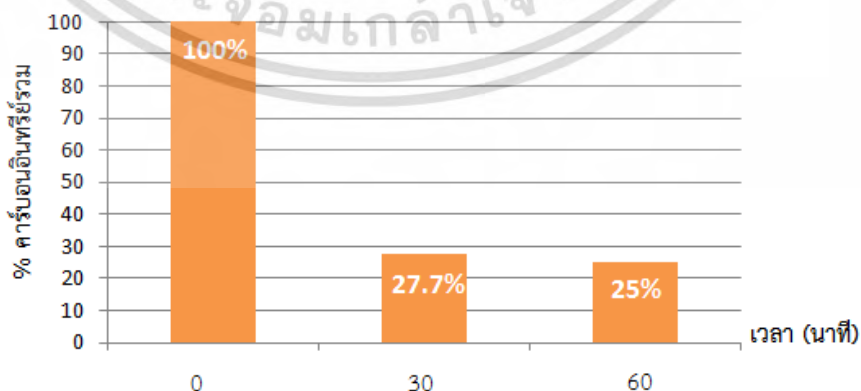
ตารางที่ 4.8 ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่เหมาะสม

Run No.	1	2	3	4	5
ปริมาณเหล็ก (ppm)	10.9	11.2	11.4	12.3	10.9

พบว่าหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันเหล็กบางส่วนละลายหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาปนอยู่ในสารละลายความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 19.6% ของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์เหล็กที่หลุดจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันแบบเอกพันธ์ ซึ่งไอออนของเหล็กในสารละลายทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เร็วกว่าไอออนของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งไดอะทอมไมต์ [42]

#### 4.3.4 การกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon : TOC)

วิเคราะห์หาค่าคาร์บอนอินทรีย์รวมด้วยเครื่อง TOC ของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.8 เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 และ 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าสารละลายสี้อมก่อนทำปฏิกิริยามีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 100% หลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ 30 นาทีแรกมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 27.7% และที่ 60 นาทีมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 25.0% ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมที่เวลา 30 และ 60 นาทีเท่ากับ 72.3% และ 75.0% ตามลำดับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมที่ 30 นาที และ 60 นาที พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันดำเนินไปจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาคงที่แล้วที่ 30 นาที เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาต่อไปจนถึง 60 นาทีจึงไม่มีผลต่อการสลายคาร์บอนอินทรีย์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีคุณสมบัติคือสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) [43]

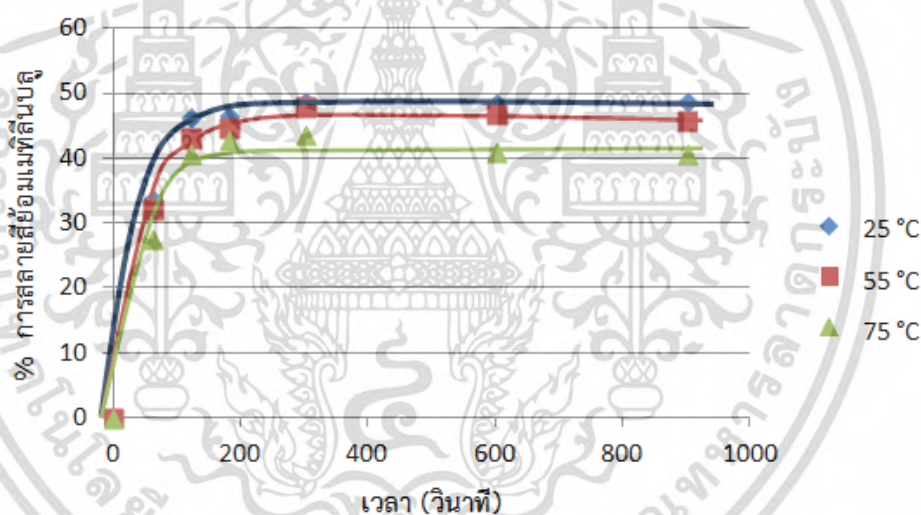


รูปที่ 4.5 %คาร์บอนอินทรีย์รวมในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมที่เวลา 0 30 และ 60 นาที

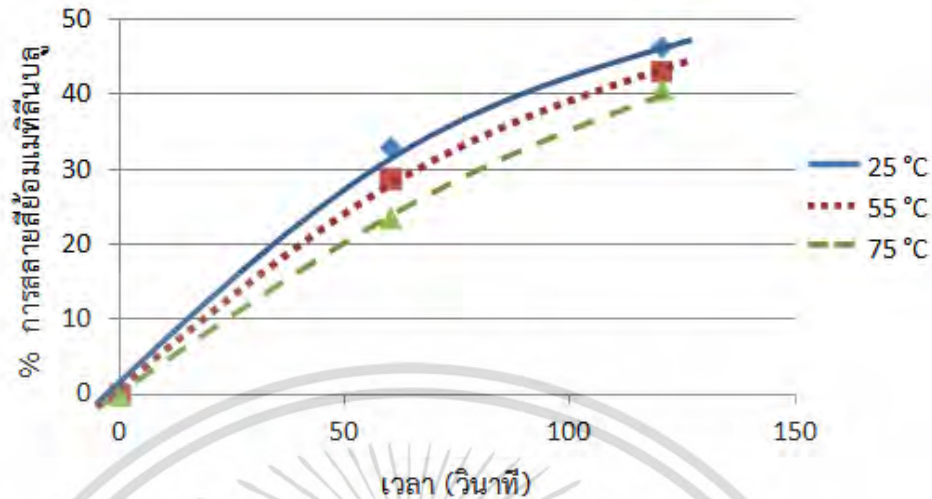
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 จลนพลศาสตร์

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัม/ลิตร pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายเป็น 25 55 และ 75 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลง โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 49% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 45% และ 40% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ จึงทำให้ปริมาณไฮดรอกซิล แรดิคัลที่ได้จากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง ทั้งนี้ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเพนตันมักจะใช้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียสเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดและไม่ก่อให้เกิดการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์[47]



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการสลายตัวของเมทิลอะซิเตตที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายตัวของเมทิลอะซิเตต 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 0-120 วินาที

จากงานวิจัยของ Dao Sy Duc พบว่าในช่วงแรกของปฏิกิริยาเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอย่างรวดเร็วและมีความเข้มข้นคงที่และปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าคงที่ ทำให้ลดรูปสมการที่ 4.4 ลงเป็นสมการที่ 4.5 และจากกราฟที่ 4.6 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการสลายตัวของเมทิลอะซิเตตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นตรงในช่วงแรกของปฏิกิริยา (0-120 วินาที) เมื่อขยายกราฟเป็นรูปที่ 4.7 พบว่าช่วงแรกของปฏิกิริยา ( $t < 180$  วินาที) กราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้นในช่วงแรกของปฏิกิริยาจึงให้ปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order)  $m = 1$  ดังสมการที่ 4.6 [31] จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.7 พล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(C/C_0)$  กับเวลาเพื่อหาค่าคงที่อัตรา (k)

$$\frac{dC}{dt} = -k_0 C_{OH}^n \cdot C_{MB}^m \quad (4.4)$$

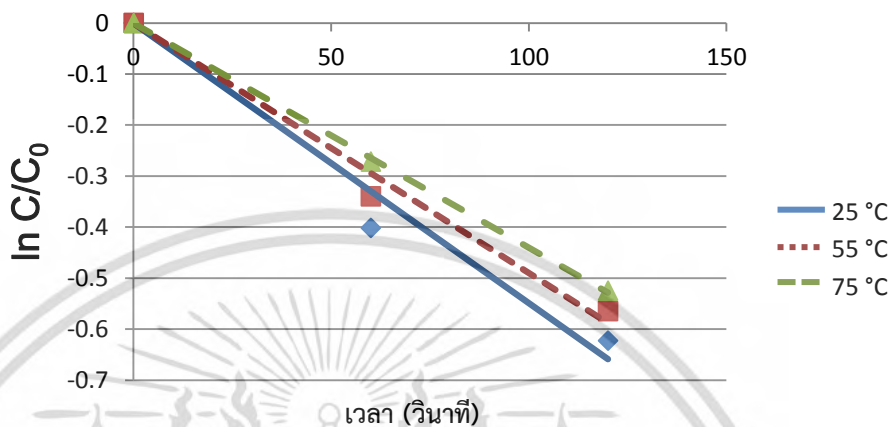
$$\frac{dC}{dt} = -k C_{MB}^m \quad (4.5)$$

$$\frac{dC}{dt} = -k C_{MB} \quad (4.6)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่อัตราลดลงเนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ลดลงอย่างที่กล่าวไปข้างต้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าช้าลงโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(C/C_0)$  กับ เวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

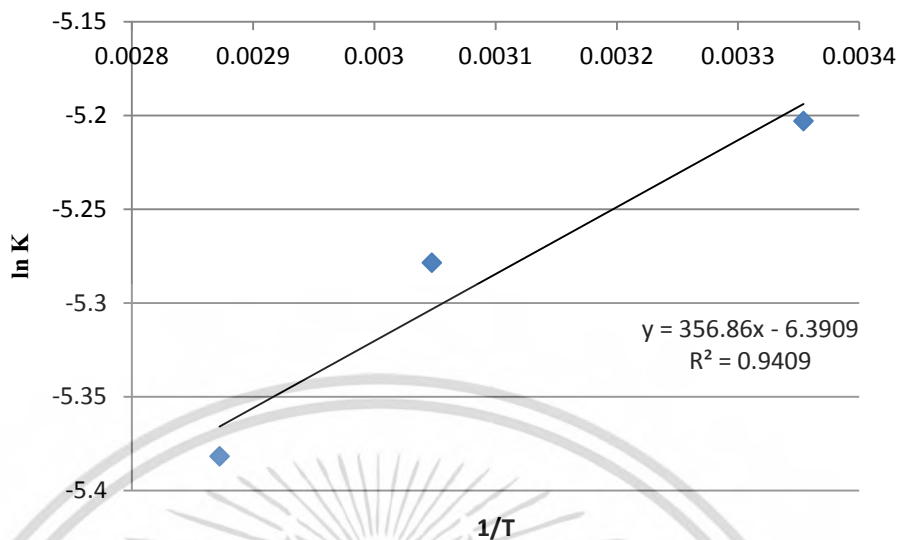
T (°C)	k (s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
25	0.0055	0.95
55	0.0051	0.98
75	0.0046	0.98

ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ ( $E_a$ ) สามารถทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(k)$  กับ  $1/T$  เป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.8 และ 4.9 แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4.8)$$

$$\ln(k) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(A) \quad (4.9)$$

ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 356.86 สามารถคำนวณเป็นค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้เท่ากับ -2.97 kJ/mol ทั้งนี้ที่พลังงานก่อกัมมันต์มีค่าเป็นลบมีความหมายทางคณิตศาสตร์คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง ค่าคงที่อัตรา (k) ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวไปเป็นออกซิเจนและน้ำมากขึ้น ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสีย้อมจึงลดลง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(k)$  กับ  $1/T$

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพันธู์เหล็กไดอะทอมไมต์ที่เตรียมได้จากวิธีเอ็บซุ่ม วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีโครงสร้างผลึกควอร์ตซ์เป็นองค์ประกอบ วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry พบว่ามีเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 57.8 มิลลิกรัมเหล็กต่อ 1 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเติมเหล็กลงบนไดอะทอมไมต์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วย BET พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์เท่ากับ 20.38 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.071 มิลลิลิตรต่อกรัม และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 12.9 นาโนเมตร ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมโดยปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนต้น ได้แก่ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์และ pH จากการออกแบบการทดลอง พบว่าแบบจำลองถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ  $\%Eff = 69.67 + 10.597X_1 + 2.402X_2 - 8.031X_3 + 1.651X_4 - 2.623(X_1)^2 - 1.481(X_4)^2$  และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองเท่ากับ 92.9% โดยภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนต้นจากแบบจำลองสามารถสลายสีย้อมได้ 100% เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.8 ทำการทดลองซ้ำที่ภาวะดังกล่าวข้างต้น 5 การทดลอง พบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายสีย้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 99.2% คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.8% เมื่อเทียบกับแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเหมาะสมกับการสลายสีย้อม เมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนต้น วิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะที่เหมาะสม พบว่าเหล็กหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งคิดเป็น 19.6% ของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์ค่าคาร์บอนอินทรีย์รวมของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 72.3%

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตรและ pH 5.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เร่งให้แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำ โดยปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันพบว่ามีค่าเท่ากับ  $-2.97 \text{ kJ/mol}$  โดยความหมายทางคณิตศาสตร์คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสีย้อมลดลง



## บทที่ 5

### การสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยใช้เหล็กบนไดอะตอมไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 5.1 บทนำ

จากการบทที่ 4 การสลายสีย้อมเมทิลอินบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์พบว่า ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลอินบลูสูงถึง 100% ในบทนี้จึงทำการเปลี่ยนชนิดของสีย้อมเป็นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ เนื่องจากเป็นสีที่นิยมทางด้านสิ่งทอ และเป็นสารอันตราย เป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่เป็นต้นเหตุของการกลายพันธุ์ได้

งานวิจัยนี้ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ (Fe-diatomite) โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยวิธีการจุ่มชุบแบบแห้ง (dry-impregnation) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง 3-10 ทำการทดลองภายในตู้แสงยูวี (UV reactor) ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย เมทิลออเรนจ์ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 5.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 5.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

1. ชั่งวัสดุรองรับไดอะตอมไมต์ 20 กรัม
2. ชั่ง  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  5.4 กรัมแล้วละลายในน้ำกลั่น 28 มิลลิตร
3. ค่อยๆหยดสารละลาย  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ลงบนไดอะตอมไมต์ให้ทั่ว
4. อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

##### 5.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction spectrometry : XRD)
2. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุแต่ละชนิด (X-Ray Fluorescence spectrometry : XRF)

3. วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AAS-680 ของบริษัท Shimadzu
4. นำสารละลายตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันและกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกไปที่เวลา 30 และ 60 นาทีไปตรวจวัดหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม(TOC) ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer ของบริษัทยี่ห้อ Shimadzu

### 5.2.3 การสลายสีของเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1. ตวงสารละลายเมทิลออเรนจ์จำนวน 600 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์นำไปตั้งไปบนเครื่องปั่นกวนสารในตู้ยิวโดยไม่ต้องเปิดไฟ
2. ดูดสารละลายเมทิลออเรนจ์ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่เวลา 0 นาที
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนไดอะตอมไมต์ โดยความเข้มข้นเหล็กในการทดลองเท่ากับ 0.5 กรัมเหล็กต่อลิตร
4. เตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. ใส่สารที่เตรียมในข้อ 3 และ 4 ลงในบีกเกอร์เมทิลออเรนจ์ในข้อ 1 ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์เปิดไฟตู้ยิวแล้วจับเวลา
6. ใช้เวลาทำปฏิกิริยาทั้งสิ้น 180 นาทีโดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที นำตัวอย่างไปแยกตะกอนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบเท่ากับ 5,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำสารละลายที่แยกตะกอนแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 464 นาโนเมตร แล้วบันทึกค่า
7. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเหล็กเป็น 0.4 และ 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. ทำซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยน pH 3, 4, 7, 10

## 5.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

### 5.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

#### 5.3.1.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF)

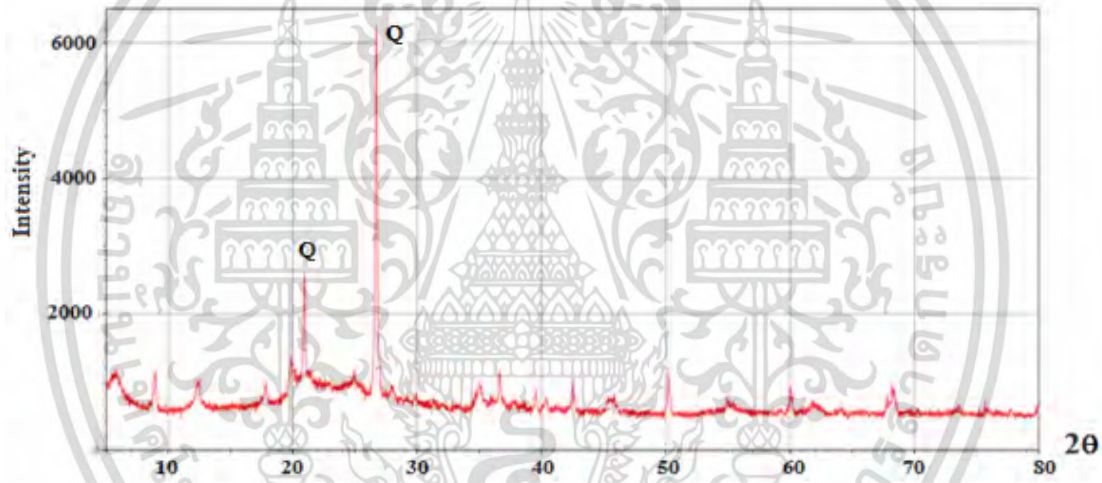
วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอกซ์ (XRF) แสดงดังตารางที่ 5.1 พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์คือ ธาตุซิลิกอนซึ่งมีปริมาณถึง 31.3 %wt/wt ตามด้วยธาตุอลูมิเนียมซึ่งมีปริมาณถึง 6.76 %wt/wt และปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีปริมาณเท่ากับ 5.23 %wt/wt

ตารางที่ 5.1 ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ (%wt/wt)

Sample	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Diatomite	0.49	8.52	35.7	1.52	0.23	0.20	2.96
Fe-diatomite	0.38	6.76	31.3	1.32	0.16	0.18	5.23

### 5.3.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction technique: XRD)

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่ามีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $20.9^\circ$  และ  $26.8^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.1 แสดงถึงเหล็กไดอะตอมไมต์มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาในรูปแบบผลึกแบบควอร์ตซ์ [37]



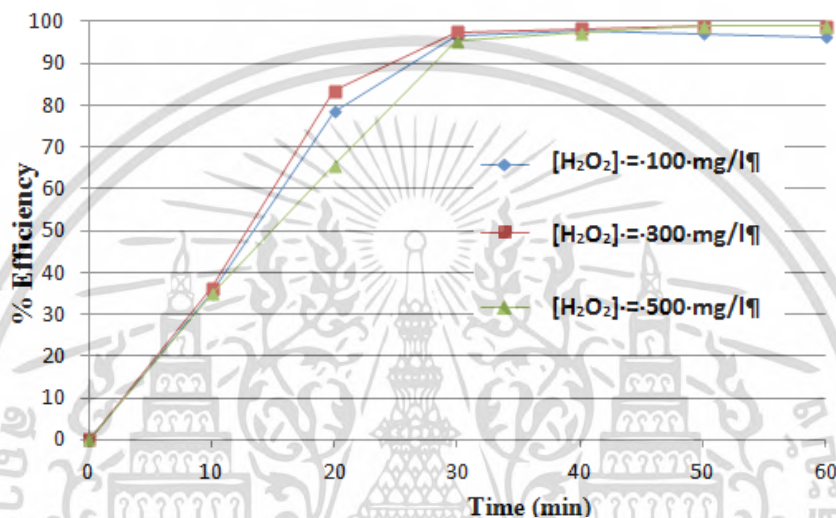
รูปที่ 5.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

### 5.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย สลายเมทิลออเรนจ์

#### 5.3.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการย่อยสลายของเมทิลออเรนจ์ จากรูปที่ 5.2 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 100 เป็น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์เพิ่มขึ้นจาก 96% เป็น 99% ภายในเวลา 30 นาที แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปจนถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร การย่อยสลายของเมทิลออเรนจ์จะลดลงเล็กน้อย ณ เวลา 10 ถึง 20 นาที เนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงๆนั้น จะเกิดปฏิกิริยาที่กำจัดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล [46] ดังสมการที่ (5.1) นอกจากนี้ การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลยังลดประสิทธิภาพในการย่อยสลายของเมทิลออเรนจ์ดังสมการที่ (5.2) จากผลการทดลองจึงเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 5.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วย กระบวนการโฟโตเพนตัน ภายใต้สภาวะ:  $[\text{MO}]_0$  75 มิลลิกรัมต่อลิตร; ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร; pH 3.5

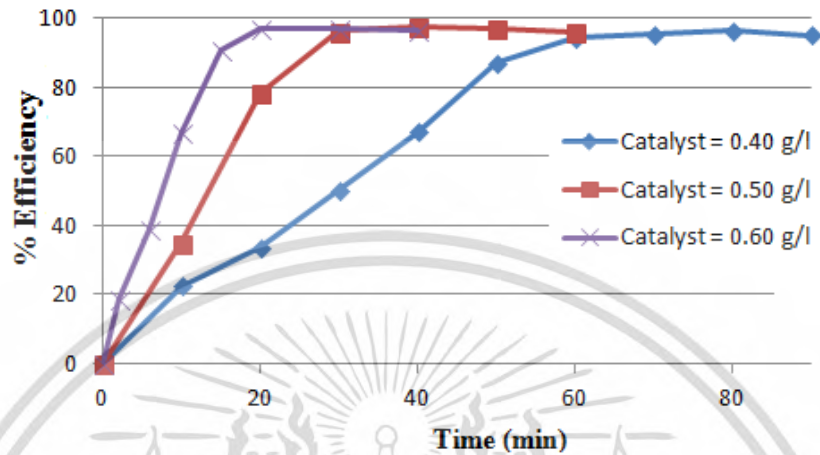
### 5.3.2.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปรับเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะอะตอมไมต์คือ 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตร ในการย่อยสลาย เมทิลออเรนจ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลโดยตรงกับการสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดัง สมการที่ (5.3) และ (5.4) โดยที่  $\equiv$  หมายถึงเหล็กที่ถูกตรึงไว้กับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา[47]



จากรูปที่ 5.3 เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.6 กรัมต่อลิตร เวลาในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์จะลดลงจาก 60 30 และ 20 นาที ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์คือ 95% 96% และ 96% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยา

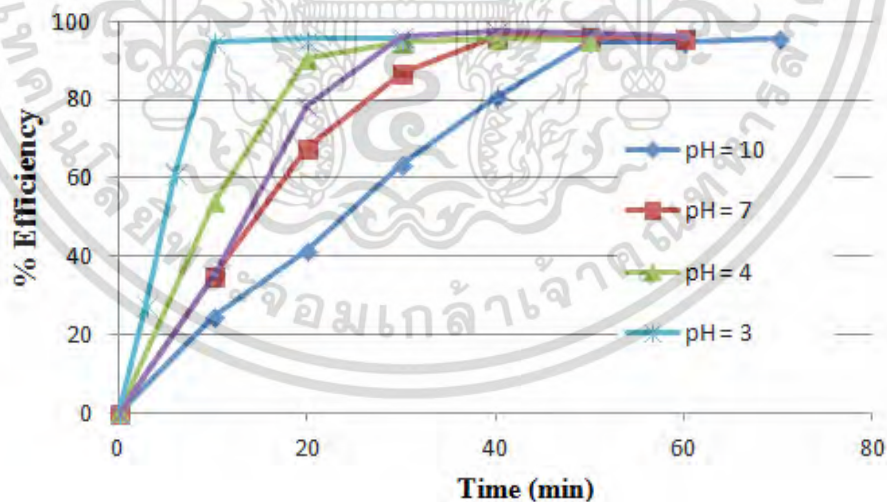
ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตรจึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์



รูปที่ 5.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ภายใต้สภาวะ:  $[MO]_0$  75 มิลลิกรัมต่อลิตร;  $[H_2O_2]_0$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร; pH 3.5

### 5.3.2.3 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลออเรนจ์

ในการทดลองครั้งนี้จะศึกษาช่วงของ pH เริ่มต้น ตั้งแต่ช่วง 3 ถึง 10 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 พบว่าที่ pH 3 สามารถสลายเมทิลออเรนจ์ได้ 96% โดยใช้เวลา 10 นาที ที่ pH 3 ใช้เวลาน้อยกว่าที่ pH อื่นๆ



รูปที่ 5.4 ผลของ pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลออเรนจ์ต่อการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ภายใต้สภาวะ:  $[MO]_0$  75 มิลลิกรัมต่อลิตร; ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร;  $[H_2O_2]_0$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เนื่องจากการก่อตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์รัส และเฟอริกไฮดรอกไซด์ ขึ้นอยู่กับค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย ซึ่งเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) เป็นองค์ประกอบหลักของปฏิกิริยาเฟนตัน ดังสมการ (5.3) เมื่อปริมาณของเฟอร์รัสไอออนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการย่อยสลายของเมทิลลอเรนจิ่งจึงเพิ่มขึ้น[48] จากผลการทดลองสันนิษฐานว่าที่ค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นต่ำ สามารถทำให้เกิดเฟอร์รัสไอออนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับค่า pH ของสารละลายสูง

### 5.3.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบเนื้อผสมในการย่อยสลายเมทิลลอเรนจิ่ง

สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายเมทิลลอเรนจิ่งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตรคือความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร และค่า pH เริ่มต้นของสารละลายเมทิลลอเรนจิ่งเท่ากับ 3 ซึ่งประสิทธิภาพในการย่อยสลายเมทิลลอเรนจิ่งเท่ากับ 96% ภายในเวลา 10 นาที หลังปฏิกิริยาทำการวัดปริมาณเหล็ก (Fe) ในสารละลายและค่าคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) จากผลการทดลองพบว่าปริมาณเหล็กอยู่ในสารละลาย 8.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 17% ของปริมาณเหล็กในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำลงไปปฏิกิริยา และค่า TOC ก่อนทำการทดลองเท่ากับ 35.38 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเป็น 16.76 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งสามารถลดค่า TOC ลงไป 47% หลังจากปฏิกิริยาดำเนินไป 30 นาที

## 5.4 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลลอเรนจิ่ง ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง 3-10 ทำการทดลองภายในตู้แสงยูวี (UV reactor) ณ อุณหภูมิห้อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย เมทิลลอเรนจิ่ง 75 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 30 นาทีมีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมใกล้เคียงกันคือ 96% 98% และ 99% ตามลำดับ ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พิจารณาที่ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ใกล้เคียงกันคือ 96% เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตรจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกันคือ 60 เป็น 30 และ 20 นาทีตามลำดับ พบว่าใช้เวลาดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาช่วงของ pH เริ่มต้น ตั้งแต่ pH 3-10 พบว่าที่ pH 3 สามารถสลายเมทิลลอเรนจิ่งได้ 96% โดยใช้เวลา 10 นาที ที่ pH 3 ใช้เวลาน้อยกว่าที่ pH อื่นๆ ในงานวิจัยนี้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลลอเรนจิ่งที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม pH 3 ให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อม 95% ที่เวลา 10 นาที สามารถลดค่าคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ได้ 47% หลังปฏิกิริยาดำเนินการวัดปริมาณเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ในสารละลาย พบว่ามีปริมาณเหล็ก 5.28 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น 33% ของเหล็กในไดอะทอมไมต์ที่ใช้ในปฏิกิริยา

## บทที่ 6

### การศึกษาปฏิกิริยาเพนต์และปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงในการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

#### 6.1 บทนำ

จากการศึกษาข้างต้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากน้ำเสียส่วนใหญ่ที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ยิ่งอุตสาหกรรมสีย้อม สารเคมีกำจัดวัชพืช การผลิตพลาสติก และการผลิตกระดาษ มักมีการปนเปื้อนของสารประกอบ 4-คลอโรฟินอล ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เชื่อมต่ออยู่กับวงอะโรมาติก และมีคลอรีนแทนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยระบุว่าสารประกอบ 4-คลอโรฟินอล เป็นอันตรายเมื่อกลืนกิน หรือสัมผัสผิวหนัง หรือหายใจเข้าไป อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียงในระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตทางน้ำ ดังนั้นในบทนี้ต้องการศึกษาการสลาย 4-คลอโรฟินอล และพัฒนาและปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์โดยการสังเคราะห์ TiO<sub>2</sub> บนไดอะทอมไมต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

งานวิจัยบทนี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite เพื่อสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเพนต์และปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง ซึ่งได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ได้แก่ วิเคราะห์คุณลักษณะทางอัสตฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย XRD ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย FT-IR และวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวและขนาดของรูพรุน นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟินอล ได้แก่ pH ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟินอลและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีกทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย 4-คลอโรฟินอล และตรวจสอบปริมาณเหล็กในสารละลายตัวอย่างด้วย AAS

#### 6.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 6.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/diatomite

ทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยเตรียมสารละลายที่ 1 ด้วยสารละลายเตตระบิวทิลไททานเนต 10 ml ผสมกับเอทานอล 20 ml แล้วทำการเตรียมสารละลายที่ 2 โดยผสมเอทานอล 3 ml กรดอะซิติก 3 ml น้ำกลั่น 3 ml และเหล็ก(III)ไนเตรท 5wt.%ของเหล็ก ต่อมานำสารละลายที่ 1 คนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วค่อยๆเติมสายละลายที่ 2 ลงในสารละลายที่ 1 หลังจากนั้นนำ Diatomite 5 กรัม เติมลงในสารละลายที่ผสมได้ คนจนกว่าสารละลายที่ผสมได้กลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วค่อยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำการปรับ pH ของสารผสม จนเกิดเจลและทำให้แห้งที่ 60 องศาเซลเซียส นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ตามที่ต้องการ

## 6.2.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

การสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน ทำโดยการเติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ในสารละลาย 4-คลอโรฟีนอล ทำการปรับ pH ด้วย HCl และ NaOH หลังจากนั้นทำการเก็บสารตัวอย่างที่เวลาต่างๆ วัดความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย HPLC โดยใช้ Detector เป็น UV-VIS ที่ 254 นาโนเมตร แล้วบันทึกผลเพื่อหาอัตราการลดลงของความเข้มข้น 4-คลอโรฟีนอล จากการเทียบกราฟมาตรฐาน

ร้อยละการสลาย 4-คลอโรฟีนอล (Degradation of 4-chlorophenol) สามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ (6.1)

$$\%Degradation = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\% \quad (6.1)$$

เมื่อ C<sub>0</sub> คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมลาร์)

C คือ ความเข้มข้น ณ เวลาทดสอบ (โมลาร์)

## 6.2.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง (Photocatalytic reaction) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

ในกระบวนการปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง ทำปฏิกิริยาโดยเตรียมสารละลาย 4-คลอโรฟีนอลที่มีความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นปรับ pH ของสารละลายเป็นค่าที่ต้องการโดยใช้กรดไนตริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>/Diatomite มาจำนวน 1 g/L ซึ่งเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าการสลายตัวของ 4-คลอโรฟีนอลได้มากที่สุด จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมไว้ไปทำปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงในตู้ที่ติดตั้งหลอด UV ทำปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชั่งไว้ลงไปในสารละลายที่กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กและเริ่มจับเวลาโดยใน 10 นาทีแรกทำปฏิกิริยาในที่มืดเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับ จากนั้นจึงเปิดแสงและเก็บตัวอย่างที่ 2 4 6 และ 8 ชั่วโมงหลังเปิดแสง และนำตัวอย่างไปวัดค่าความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอล ด้วยเทคนิค High-performance liquid chromatography (HPLC)

ในการกำหนดสถานะในการทำปฏิกิริยาเพื่อศึกษาผลของสภาวะต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง ทำการศึกษา 3 ตัวแปรได้แก่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 4-คลอโรฟีนอลที่ 10 30 และ 50 mg/L ค่า pH เริ่มต้นที่ 2 6 และ 10 และเวลาในการทำปฏิกิริยา

## 6.2.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

ในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. X-ray diffraction (XRD) patterns วิเคราะห์คุณลักษณะทางอสมฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. BET method วิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน
3. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) วิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite
4. Atomic absorption spectrophotometer (AAS) ตรวจวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลาย

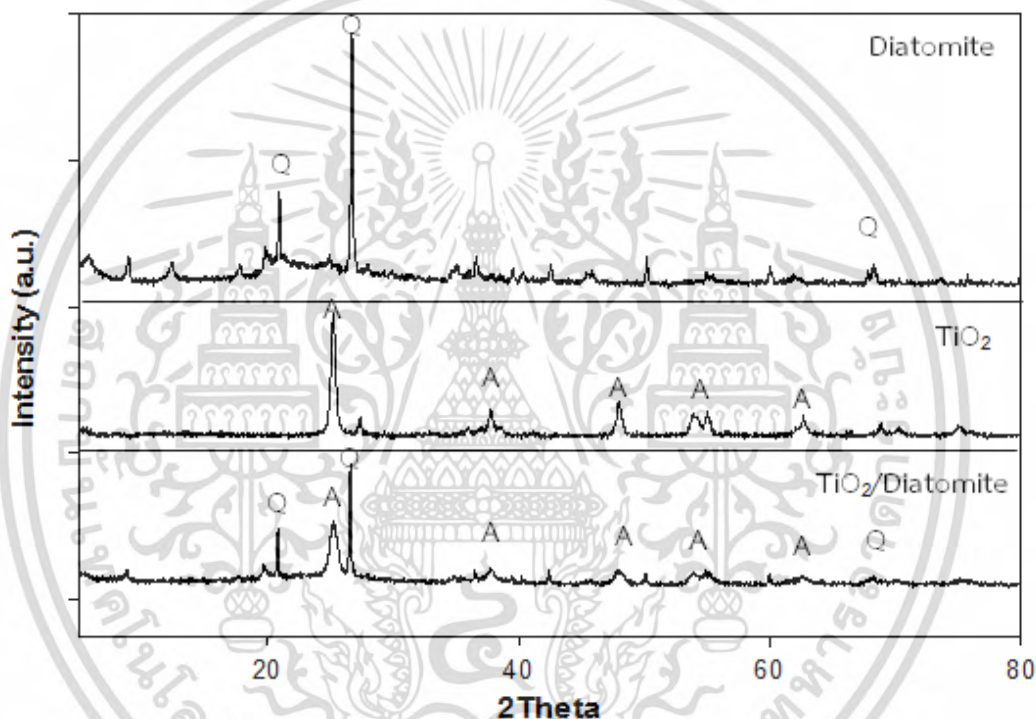
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

### 6.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 6.3.1.1 การศึกษาคุณลักษณะทางอสังฐานวิทยาด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD)

เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) เป็นการวิเคราะห์รายละเอียดโครงสร้างผลึกของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รูปแบบ XRD ของ  $\text{TiO}_2$ /Diatomite พบว่ามีพีคขึ้นที่ตำแหน่ง  $25.3^\circ$   $37.8^\circ$   $48.0^\circ$   $53.9^\circ$   $20.9^\circ$  และ  $26.8^\circ$  เมื่อ Q แทนตำแหน่งผลึกควออร์ตซ์ของซิลิกา และ A แทนตำแหน่งผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอะนาเทสแสดงดังรูปที่ 6.1

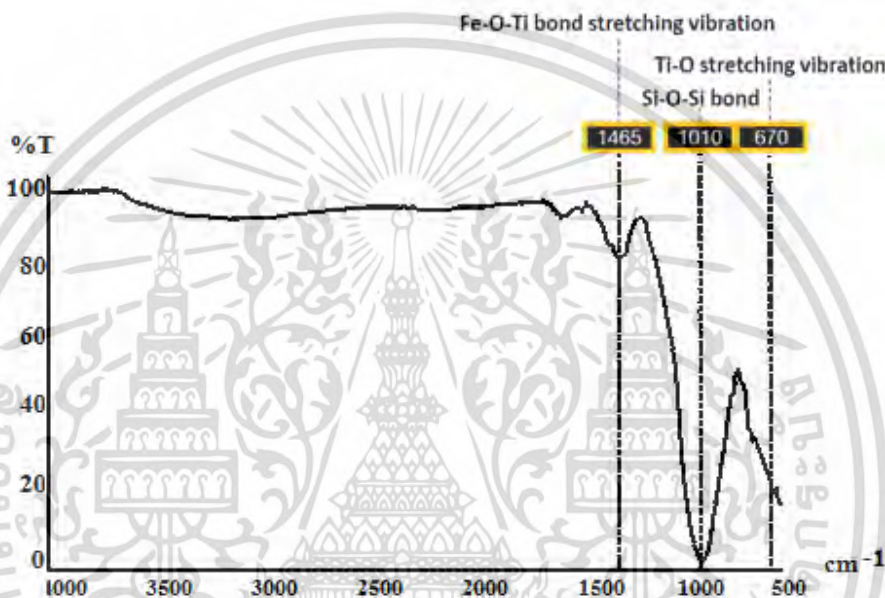


รูปที่ 6.1 รูปแบบ XRD ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไดอะตอมไมท์ และ  $\text{TiO}_2$ /Diatomite

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของ  $\text{TiO}_2$ /Diatomite ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล เมื่อพิจารณาเทียบกับค่ามาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอะนาเทสและไดอะตอมไมท์ พบว่าพีคที่เกิดขึ้นที่  $2\theta$  เท่ากับ  $25.3^\circ$   $37.8^\circ$   $48.0^\circ$  และ  $53.9^\circ$  [49] แสดงถึงรูปแบบผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสซึ่งเป็นรูปแบบผลึกที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง และให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่ารูปแบบอื่นๆ และพีคที่  $2\theta$  เท่ากับ  $20.9^\circ$  และ  $26.8^\circ$  แสดงถึงรูปแบบซิลิกาในรูปแบบผลึกแบบควออร์ตซ์ [37] แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2$ /Diatomite ที่สังเคราะห์ได้มีองค์ประกอบเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอะนาเทสและมีผลึกของซิลิกาในรูปแบบควออร์ตซ์

### 6.3.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectrometry(FT-IR)

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วง 650 cm<sup>-1</sup> ถึง 4000 cm<sup>-1</sup> ได้ผลดังรูปที่ 6.2 พบว่ามีพีคที่โดดเด่นประมาณ 1010 cm<sup>-1</sup> สัมพันธ์กับ Si-O-Si bond ซึ่งแสดงถึง SiO<sub>2</sub> ที่เป็นองค์ประกอบของ Diatomite [50] และพบว่าปรากฏพีคในช่วงกว้าง 400-700 cm<sup>-1</sup> สัมพันธ์กับ Ti-O stretching vibration ซึ่งบ่งบอกว่ามีโครงสร้างของ TiO<sub>2</sub> [51] นอกจากนี้ยังเกิดพีคที่ 1465 cm<sup>-1</sup> สัมพันธ์กับ Fe-O-Ti bond stretching vibration ซึ่งบ่งบอกถึงการมีเหล็กตรึงอยู่บน TiO<sub>2</sub> [52]



รูปที่ 6.2 FT-IR pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

### 6.3.1.3 วิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET

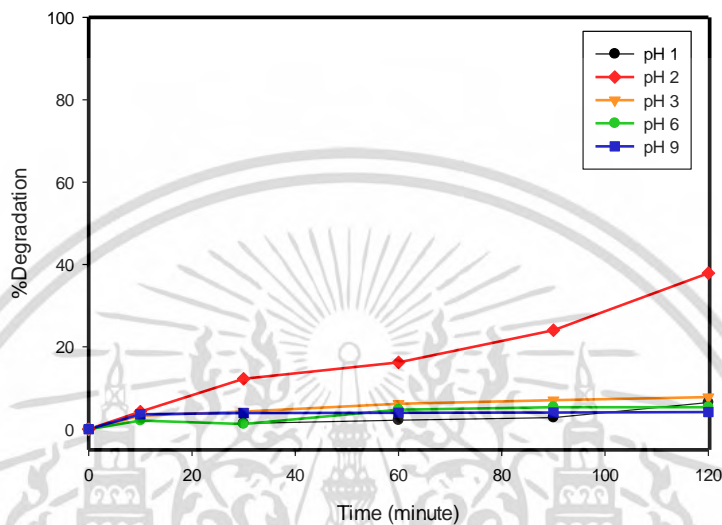
การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ด้วย BET แสดงดังตารางที่ 6.1 จากตารางที่ 6.1 ค่า Pore size ของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถระบุได้ว่าขนาดของรูพรุนแบบ mesoporous [53]

ตารางที่ 6.1 BET surface area Pore volume และ Pore size

Catalyst	BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Pore size (nm)
5wt.%Fe-TiO <sub>2</sub> /Diatomite	20.06	0.068	13.53

## 6.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

### 6.3.2.1 ผลของ pH ของสารละลาย 4-คลอโรฟีนอล

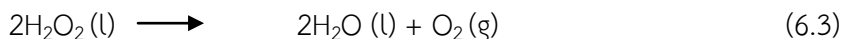


รูปที่ 6.3 ผลของ pH ต่อการสลายของ 4-คลอโรฟีนอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่ง ปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 20 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L

จากรูปที่ 6.3 แสดงผลของ pH 1, 2, 3, 6 และ 9 ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 20 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L พบว่าที่ pH 1, 3, 6 และ 9 เกิดการสลายของ 4-คลอโรฟีนอลล้น้อยมาก เมื่อเทียบกับที่ pH 2 ซึ่งมีการสลายของ 4-คลอโรฟีนอลถึง 37.40% ใน 120 นาที โดย pH ต่ำกว่า 2 นั้นจะทำให้การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวของ  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  จะส่งผลให้เฟอร์รัสไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันลดลง นอกจากนี้ความเข้มข้นของ  $\text{H}^+$  ที่สูงเกินไป  $\text{H}^+$  จะรวมตัวกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วเกิดออกซิเนียมไอออน  $[\text{H}_3\text{O}_2]^+$  [54] ดังสมการเคมีที่ (6.2) จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยาเฟนตันลดลง ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลลที่เกิดขึ้นน้อยลงด้วย



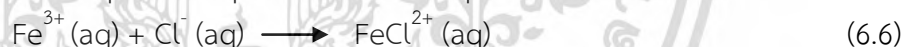
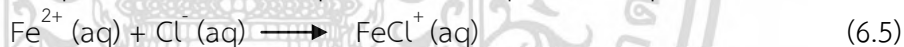
ส่วนใน pH 3, 6 และ 9 นั้น  $\text{Fe}^{3+}$  จะตกตะกอนเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  และยิ่งทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำ ดังสมการเคมีที่ (6.3) ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลลน้อยลง อันเนื่องมาจากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ลดลง [55]



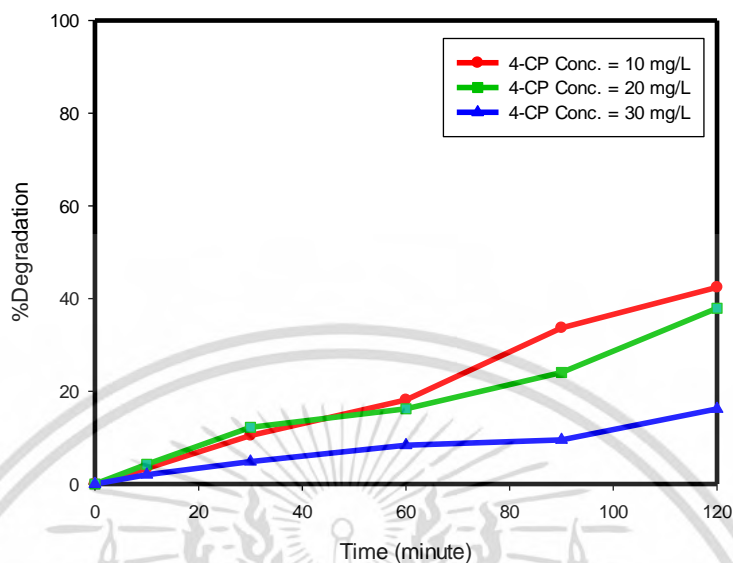
เนื่องจากปฏิกิริยาเพนตันนั้นถูกจำกัดด้วย pH ของสารละลาย ดังนั้น pH 2 จึงเหมาะสมต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเพนตันโดยใช้ 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

### 6.3.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล

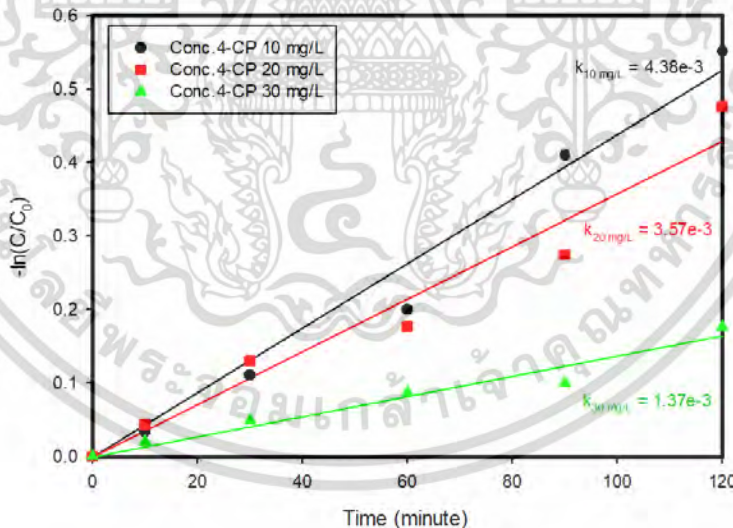
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลมีผลต่อการสลายของ 4-คลอโรฟีนอล ทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 mg/L โดยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L และ pH 2 ผลการศึกษา พบว่า ผลของการสลาย 4-คลอโรฟีนอล ที่ความเข้มข้น 10 mg/L มีการสลาย 4-คลอโรฟีนอลสูงสุด 42.41% ใน 120 นาที ดังแสดงรูปที่ 6.4 นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลทางอัตราการลดลงของความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลต่อเวลา โดยทำการสร้างกราฟระหว่าง  $-\ln(C/C_0)$  กับเวลา (นาที) ดังรูปที่ 6.5 พบว่าอัตราการลดลงของ 4-คลอโรฟีนอลต่อเวลา ซึ่งมีลักษณะเป็น Pseudo-first-order [56] ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ( $k_{10 \text{ mg/L}} = 4.38 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ) มีอัตราการสลาย 4-คลอโรฟีนอลสูงสุด ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L ของ 4-คลอโรฟีนอลจะถูกสลายได้ดีกว่าความเข้มข้นเริ่มต้น 20 และ 30 mg/L เนื่องจากไอออนคลอไรด์ที่เกิดจากการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเพนตันสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังสมการเคมีที่ (6.4) อีกทั้งไอออนคลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนเฟอร์รัสและไอออนเฟอร์ริก แล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กเกิดขึ้นดังสมการเคมีที่ (6.5) และ (6.6) [57]



ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอลสูง จะส่งผลให้เกิดไอออนคลอไรด์ในสารละลายมาก ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลและเหล็กลดลง จึงทำให้การสลาย 4-คลอโรฟีนอลลดลงด้วย



รูปที่ 6.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟีนอลต่อการสลายของ 4-คลอโรฟีนอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L และ pH 2



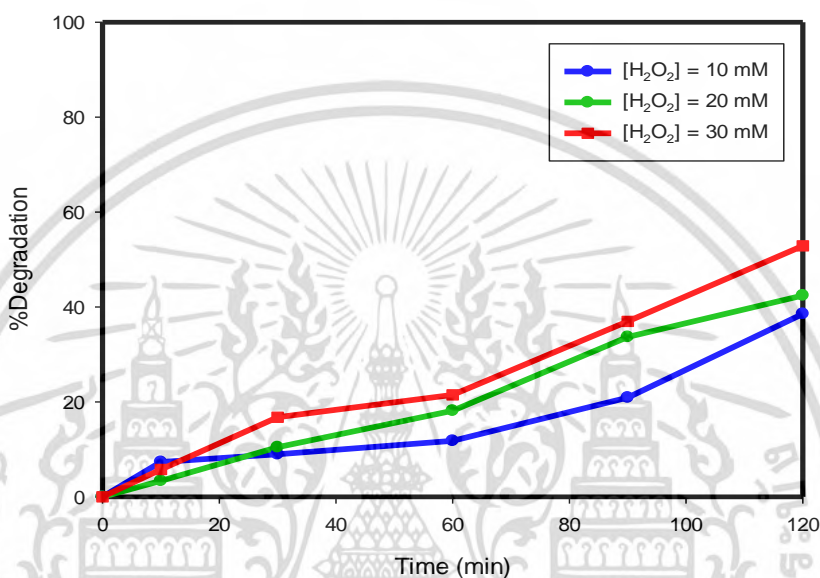
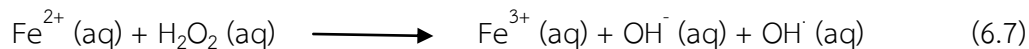
รูปที่ 6.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟีนอลต่อการสลายของ 4-คลอโรฟีนอล โดยพล็อตระหว่าง  $-\ln(C/C_0)$  กับ เวลา (นาที)

### 6.3.2.3 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล โดยศึกษาจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 20 และ 30 mmol/L ณ สภาวะ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L และ pH 2 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.6 พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

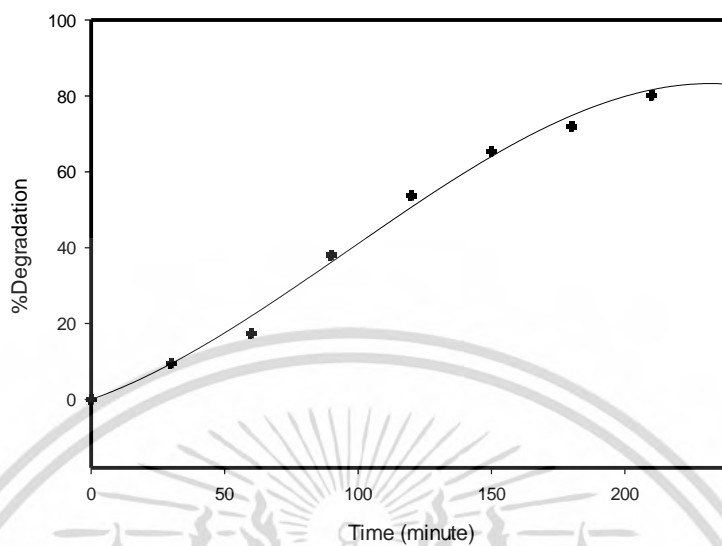
เปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L มีการสลาย 4-คลอโรฟีนอลสูงสุด 52.91% ใน 120 นาที เนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนเฟอร์รัสได้มากขึ้น ดังสมการเคมีที่ (6.7) และเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลมาสลาย 4-คลอโรฟีนอลมากขึ้น



รูปที่ 6.6 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลายของ 4-คลอโรฟีนอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L pH 2 และความเข้มข้นเริ่มต้น 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L

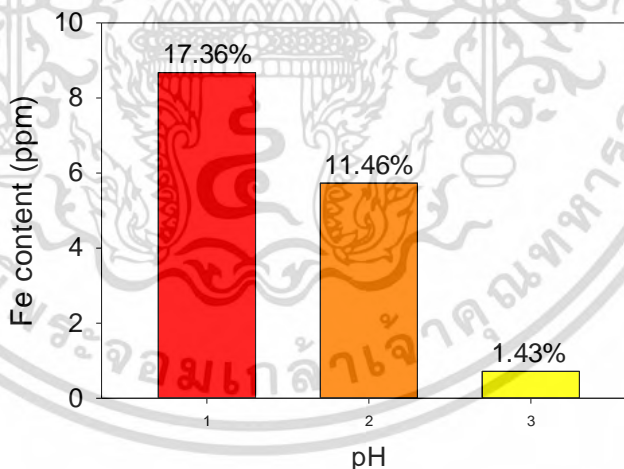
### 6.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite

การศึกษาก่อนหน้าพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอลเริ่มต้น 10 mg/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L และ pH 2 ทำการสลาย 4-คลอโรฟีนอลที่สภาวะเหมาะสมดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 6.7 พบว่า สามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ถึง 84.46% โดย พบว่าในช่วง 60 นาทีแรก เกิดการสลาย 4-คลอโรฟีนอลน้อย เนื่องจากเป็นช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (6.7) เพื่อให้ได้ไฮดรอกซิลเรดิคอล ในช่วง 60 ถึง 210 นาที เป็นช่วงที่เกิดการสลายของ 4-คลอโรฟีนอลขึ้น จึงเกิดการสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้มาก และหลังจาก 210 นาที การสลาย 4-คลอโรฟีนอลจะเริ่มคงที่ เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์มีจำกัด



รูปที่ 6.7 การสลายของ 4-คลอโรฟีนอล ณ สภาวะ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L ความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอลเริ่มต้น 10 mg/L ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L และ pH 2 ที่เวลาต่างๆ

#### 6.3.4 วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารตัวอย่างด้วย AAS



รูปที่ 6.8 ผลของ pH ต่อปริมาณเหล็กในสารละลาย

ศึกษาสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาเฟนตันที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite 1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 20 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 mmol/L ที่ pH 1, 2 และ 3 กรองสารละลายด้วยเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาด้วยเทคนิค AAS พบว่า pH มีผลต่อปริมาณเหล็กในสารละลายดังรูปที่ 6.8 ที่ pH 1 มีเหล็กละลาย 17.36% ที่ pH 1 เหล็กละลายออกมามากที่สุด แต่มีการสลาย 4-คลอโรฟีนอลต่ำ อาจเนื่องมาจากเหล็กที่ละลายออกมาจะอยู่ในรูป  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  [54] ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน ในขณะที่ pH 2 มีเหล็กละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.46% แต่เหล็กที่ละลายอยู่ในรูปของไอออนเฟอร์รัสและไอออนเฟอร์ริก [58] ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ และที่ pH 3 มีเหล็กละลายเพียง 1.43% เนื่องจากที่สภาวะนี้เหล็กสามารถตกตะกอนเป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  [55] ซึ่งอาจจะถูกกรองออกก่อนนำไปตรวจ จึงทำให้ปริมาณเหล็กในสารละลายน้อยที่สุด ดังนั้น pH 2 ที่มีการละลาย 4-คลอโรฟีนอลสูงสุดจึงเกิดจากปฏิกิริยาเฟนตันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์และออกซิเดชันผสมกัน

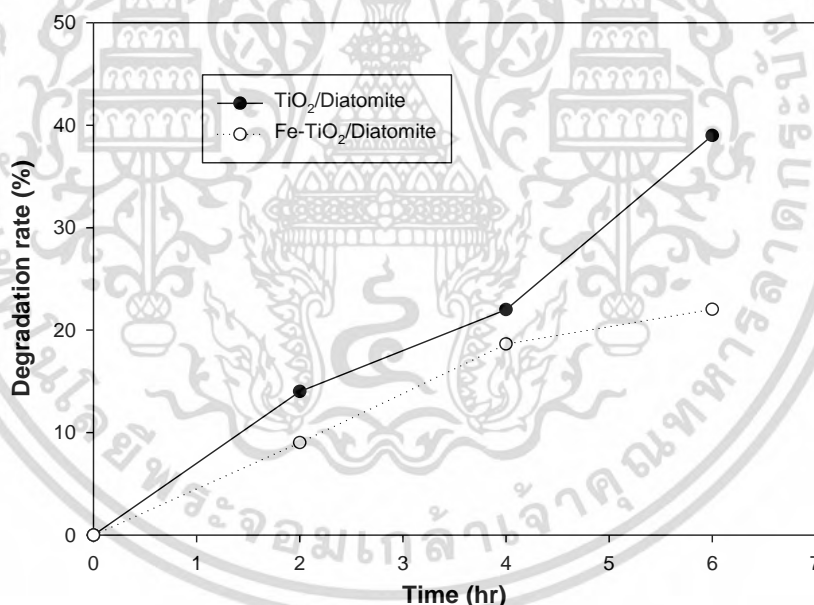
### 6.3.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัว ได้แก่ pH เริ่มต้นของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล และเวลา สามารถสรุปได้ผลการทดลองได้ดังนี้

#### 6.3.5.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดได้แก่  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  ด้วยวิธีโซล-เจล และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่เคลือบเหล็กเข้าไปด้วยวิธีจุ่มชุบแบบแห้ง (dry impregnation) เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเพื่อหาประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 4-คลอ

ดังรูปที่ 6.9



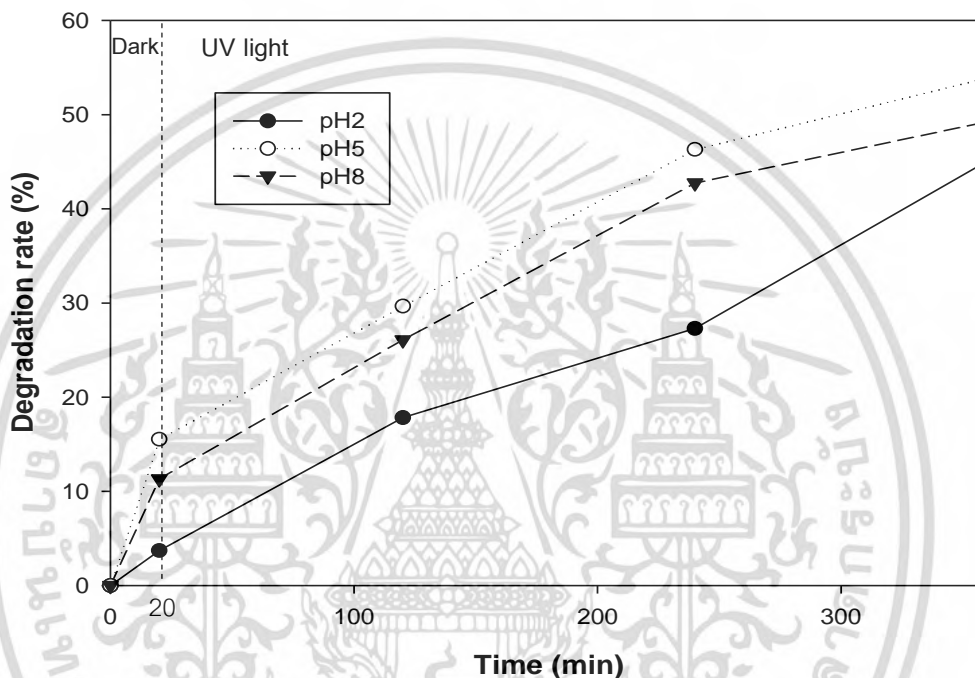
รูปที่ 6.9 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา—●—  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  ---○---  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L และค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  และ  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  พบว่า เมื่อทำปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเป็นเวลา 6 ชั่วโมงตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  มีอัตราการสลาย 4-คลอโรฟีนอลอยู่ที่ 22% ส่วน  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  อยู่ที่ 39% ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่เคลือบเหล็กเข้าไป ดังนั้น จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  ในการศึกษาการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

### 6.3.5.2 ค่า pH ต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

การศึกษาค่า pH ต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงทำการศึกษาโดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลเป็น 10 mg/L ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L และ pH เท่ากับ 2 5 และ 8 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่

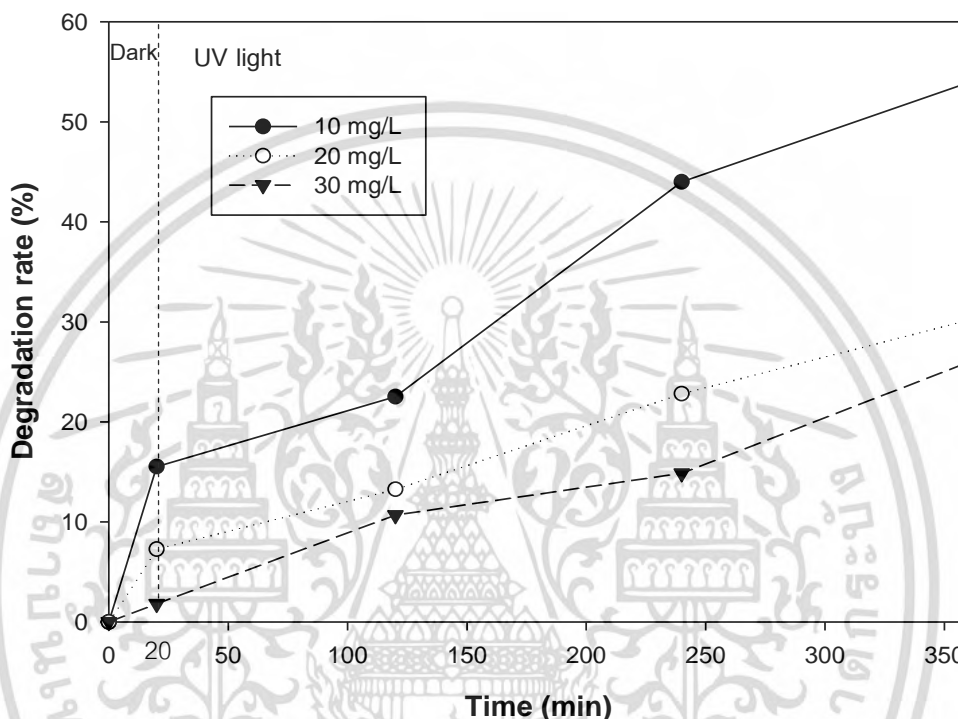


รูปที่ 6.10 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่ pH 2 4 และ 8

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงเกิดได้ไม่ดีที่ pH ต่ำแต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ pH สูงขึ้นก่อนที่ประสิทธิภาพการสลายจะลดลงอีกเมื่อเพิ่มค่า pH เนื่องจาก pH มีผลต่อประจุที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่จะไปสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอล โดยที่ pH ต่ำทำให้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีประจุบวกซึ่งไม่สามารถให้กลุ่มของไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งจำเป็นต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ที่จะไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการสลายตัวของ 4-คลอโรฟีนอล ส่งผลให้อัตราการสลายลดลง และในทางกลับกัน ค่า pH ที่สูงส่งผลให้มีไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลจึงช่วยเพิ่มอัตราการสลายตัวของ 4-คลอโรฟีนอล [59] ดังนั้นจากผลการทดลอง พบว่า ค่าการสลาย 4-คลอโรฟีนอลสูงสุดอยู่ที่ pH เท่ากับ 5

### 6.3.5.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

การศึกษาค่าผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงทำการศึกษาโดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1 g/L pH ที่ดีที่สุดจากข้อก่อนหน้าเท่ากับ 5 และศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลที่ 10 20 และ 30 mg/L ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.11

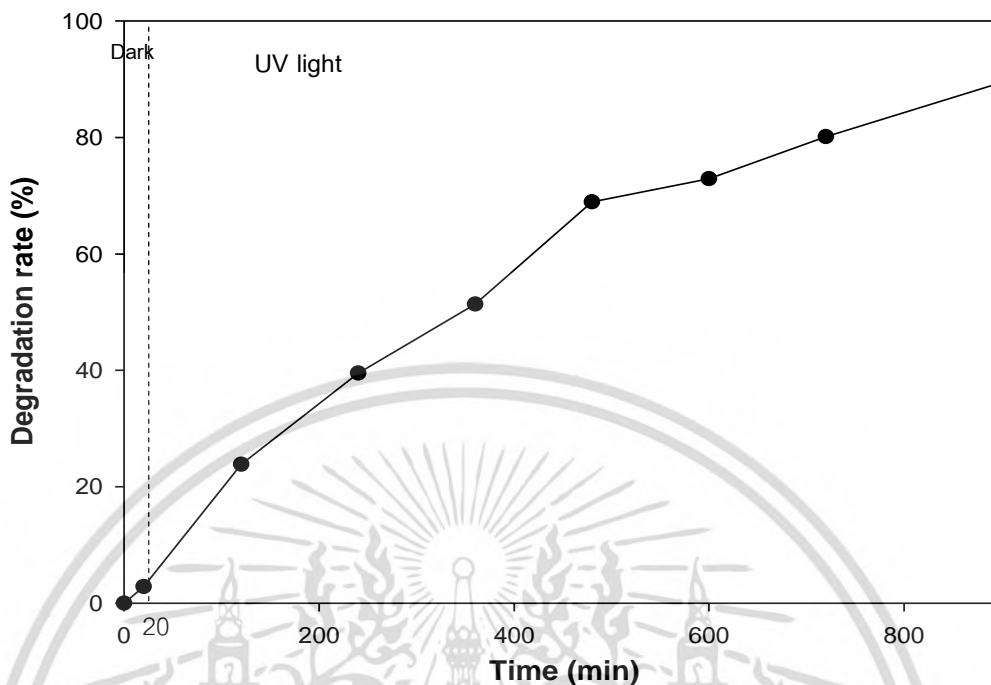


รูปที่ 6.11 การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10 20 และ 30 mg/L

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้นอัตราการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลจะลดลง ทั้งนี้อาจสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นทำให้เกิดสารมัธยันต์เพิ่มขึ้นซึ่งอาจเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อยลง และการเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของสารในสารละลายซึ่งปริมาณของไฮดรอกซิลเรดิคัลที่จะเกิดปฏิกิริยาในการสลายสารนั้นยังคงเท่าเดิมทำให้ประสิทธิภาพในการสลายลดลง

### 6.3.5.4 การทำปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ศึกษาอัตราการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยการทำปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาจากการศึกษาจากหัวข้อก่อนหน้านี้ได้แก่ ที่ pH เท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 10 mg/L และใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  1 g/L ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12. การสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองพบว่าการสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  สามารถสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟีนอลได้ที่ประมาณ 90% เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 ชั่วโมง

#### 6.4 สรุปผลการวิจัย

การสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟอตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย XRD BET และ FT-IR พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมี ซิลิกาที่มาจาก Diatomite เป็นส่วนใหญ่ โดยซิลิกานั้นมีลักษณะผลึกเป็นแบบควอตซ์ และยังมี  $\text{TiO}_2$  แบบอะนาเทสอยู่เล็กน้อย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้นั้นมีขนาดของรูพรุนอยู่ในระดับ mesoporous การศึกษาผลของ pH ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลนั้นพบว่าการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเฟอตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  นั้นสามารถเกิดการสลายได้ดีที่ pH 2 ซึ่งสามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ถึง 37.40% ใน 120 นาที ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล พบว่าที่ความเข้มข้น 10 mg/L สามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ถึง 42.41% ใน 120 นาที โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา  $4.34 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L สามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้สูงถึง 52.91% ในเวลา 120 นาที จากการศึกษาข้างต้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล คือ pH 2 ความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L โดยมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L พบว่าสามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้สูงถึง 84.46% ใน 240 นาที นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจปริมาณเหล็กในสารละลายด้วย AAS พบว่าที่ pH 2

มีปริมาณเหล็กหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา 11.46% ซึ่งบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ และเอกพันธ์ผสมกันในระหว่างการสลาย 4-คลอโรฟีนอล

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงสรุปได้ว่า ผลการศึกษา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่เคลือบเหล็กเข้าไป ด้วยวิธีจุ่มชุบแบบแห้ง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  ให้อัตราการสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ดีกว่า อยู่ที่ 39 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  อยู่ที่ 22 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ผลจากการศึกษาค่า pH ต่อการ เกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงพบว่าอัตราการสลายจะเกิดได้น้อยที่ค่า pH ต่ำ และจะมีอัตราการสลายสูงขึ้นเมื่อ pH มากขึ้นจนถึงจุดที่ให้อัตราการสลายมากที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 และจะเริ่มลดลงเมื่อเพิ่ม pH ขึ้นอีก ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือที่เท่ากับ 5 ให้อัตราการสลาย 89 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 10 ชั่วโมง และผลของ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอลต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงพบว่าอัตราการสลายจะลดลงเมื่อความ เข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 10 mg/L ให้อัตราการสลาย 54 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ศึกษาได้มาทำปฏิกิริยาพบว่าสามารถสลายสารประกอบ 4-คลอ โรฟีนอลได้ 89 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลา 15 ชั่วโมง



## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษา การสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ แบ่งหัวข้อการศึกษาเป็น 4 หัวข้อย่อยคือ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ พบว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดได้เร็วขึ้น และ pH ที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูคือ pH 5.7 ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะกรดปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายสีย้อมลดลงในสภาวะเบสเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรในสภาวะเบสซึ่งส่งผลให้การแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH เท่ากับ 5.7สามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเท่ากับ 92.55%

การศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีโครงสร้างผลึกควออร์ตซ์เป็นองค์ประกอบ วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry พบว่ามีเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 57.8 มิลลิกรัมเหล็กต่อ 1 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนด้วย BET พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์เท่ากับ 20.38 ตารางเมตรต่อกรัม ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเช่นทรีลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมโดยปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์และ pH จากการออกแบบการทดลองพบว่าแบบจำลองถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเท่ากับ  $\%Eff = 69.67 + 10.597X1 + 2.402X2 - 8.031X3 + 1.651X4 - 2.623(X1)^2 - 1.481(X4)^2$  และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองเท่ากับ 92.9% โดยภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันจากแบบจำลองสามารถสลายสีย้อมได้ 100% เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.8 วิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะที่เหมาะสม พบว่าเหล็กหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งคิดเป็น 19.6% ของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์ค่าคาร์บอนอินทรีย์รวมของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 72.3% ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตรและ pH 5.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เร่งให้แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำ โดยปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาโฟโตเพนตันพบว่ามีความเท่ากับ  $-2.97 \text{ kJ/mol}$  โดยความหมายทางคณิตศาสตร์คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสีย้อมลดลง

ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตร และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง 3-10 จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 30 นาทีที่มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมใกล้เคียงกันคือ 96% 98% และ 99% ตามลำดับ ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พิจารณาที่ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ใกล้เคียงกันคือ 96% เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.4 0.5 และ 0.6 กรัมต่อลิตรจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน คือ 60 เป็น 30 และ 20 นาทีตามลำดับ พบว่าใช้เวลาลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาช่วงของ pH เริ่มต้น ตั้งแต่ pH 3-10 พบว่าที่ pH 3 สามารถสลายเมทิลออเรนจ์ได้ 96% โดยใช้เวลา 10 นาที ที่ pH 3 ใช้เวลาน้อยกว่าที่ pH อื่นๆ ในงานวิจัยนี้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 75 มิลลิกรัมต่อลิตร คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม pH 3 ให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อม 95% ที่เวลา 10 นาที สามารถลดค่าคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC) ได้ 47% หลังปฏิกิริยาวัดปริมาณเหล็กที่หลุดออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ในสารละลาย พบว่ามีปริมาณเหล็ก 5.28 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น 33% ของเหล็กในไดอะตอมไมต์ที่ใช้ในปฏิกิริยา

ศึกษาการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเพนตันและปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย XRD BET และ FT-IR พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมี ซิลิกาที่มาจาก Diatomite เป็นส่วนใหญ่ โดยซิลิกานั้นมีลักษณะผลึกเป็นแบบควอตซ์ และยังมี TiO<sub>2</sub> แบบอะนาเทสอยู่เล็กน้อย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้นั้นมีขนาดของรูพรุนอยู่ในระดับ mesoporous ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเพนตัน ศึกษาผลของ pH ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอลนั้นพบว่าการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.% Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite นั้นสามารถเกิดการสลายได้ดีที่ pH 2 ซึ่งสามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ถึง 37.40% ใน 120 นาที ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟีนอล พบว่าที่ความเข้มข้น 10 mg/L สามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้ถึง 42.41% ใน 120 นาที โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา  $4.34 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L สามารถสลาย 4-คลอโรฟีนอลได้สูงถึง 52.91% ในเวลา 120 นาที จากการศึกษาข้างต้นพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลาย 4-คลอโรฟีนอล คือ pH 2 ความเข้มข้นของ 4-คลอโรฟีนอล 10 mg/L และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 mmol/L โดยมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g/L พบว่าสามารถสลาย 4-คลอโรฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอลได้สูงถึง 84.46% ใน 240 นาที นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจปริมาณเหล็กในสารละลายด้วย AAS พบว่าที่ pH 2 มีปริมาณเหล็กหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา 11.46% ซึ่งบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ และเอกพันธ์ผสมกันในระหว่างการสลาย 4-คลอโรฟินอล การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงสรุปได้ว่า ผลการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่เคลือบเหล็กเข้าไปด้วยวิธีจุ่มชุบแบบแห้ง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{TiO}_2/\text{Diatomite}$  ให้อัตราการสลาย 4-คลอโรฟินอลได้ดีกว่า อยู่ที่ 39 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  อยู่ที่ 22 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 ชั่วโมง ผลจากการศึกษาค่า pH ต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงพบว่าอัตราการสลายจะเกิดขึ้นน้อยที่ค่า pH ต่ำ และจะมีอัตราการสลายสูงขึ้นเมื่อ pH มากขึ้นจนถึงจุดที่ให้อัตราการสลายมากที่สุดที่ pH เท่ากับ 5 และจะเริ่มลดลงเมื่อเพิ่ม pH ขึ้นอีก ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา คือที่เท่ากับ 5 ให้อัตราการสลาย 89 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 10 ชั่วโมง และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ 4-คลอโรฟินอลต่อการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง พบว่าอัตราการสลายจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 10 mg/L ให้อัตราการสลาย 54 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 6 ชั่วโมง เมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ศึกษาได้มาทำปฏิกิริยา พบว่าสามารถสลายสารประกอบ 4-คลอโรฟินอลได้ 89 เปอร์เซ็นต์โดยใช้เวลา 15 ชั่วโมง

จากงานวิจัยที่ศึกษาทั้งหมด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงถึง 100% และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่พัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ มีคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง และสามารถสลาย 4-คลอโรฟินอลได้สูงถึง 84.46%

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe-TiO}_2/\text{Diatomite}$  ที่พัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ มีคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง มีพื้นที่ผิวสูง และมีความสามารถในการสลาย 4-คลอโรฟินอลด้วยปฏิกิริยาเฟอตันและปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง ควรมีการศึกษาถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยา เพื่อดูว่า 4-คลอโรฟินอล เปลี่ยนไปเป็นสารใดต่อไป และสุดท้ายได้ผลิตภัณฑ์ใด

## บทที่ 8

### สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

#### สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้ทั้งหมด

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ 5 เรื่อง

ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. Pongsert Sriprom, Voracha Champa, Prakob Kitchaija and **Pornsawan Assawasaengrat**. “Optimizing Decolorization Efficiency of Methylene Blue by Photo-Fenton Process over Fe-Diatomite using Central Composite Design” Computer Aided Chemical Engineering, Vol.43, 2018, P409-414.  
Computer Aided Chemical Engineering อยู่ใน Quartile3 ฐานข้อมูล SJR
2. Atipong Paikamnam, **Pornsawan Assawasaengrat**, Prakob Kitchaija and Pongsert Sriprom. “Fenton Reaction of 4-Chlorophenol Degradation Using Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite” Engineering Transactions, Vol.21, No2(45), July-Dec 2018.  
Engineering Transactions อยู่นิฐานข้อมูล TCI

การประชุมวิชาการในระดับนานาชาติและในระดับชาติ

1. Wongsakorn Songmuangkean, Prakob Kitchaiya, Pongsert Sriprom and **Pornsawan Assawasaengrat** “Decolorization of methyl orange using photo-fenton over iron-diatomite catalyst” The 7<sup>th</sup> International TICHe Conference (ITICHe 2017) Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand, October 18-20, 2017
2. **Pornsawan Assawasaengrat**, Varocha Champa, Prakob Kitchaiya “Kinetics of Methylene Blue Decolorizing for Photo-Fenton Process Using Fe-Diatomite Catalyst” Annual Conference on Engineering and Applied Science (ACEAT), Osaka, Japan, November 27-29, 2018
3. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์, ชุตติกาญจน์ สายโรจน์, ประกอบ กิจไชยา และ พงษ์เสริฐ ศรีพรหม “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>/Diatomite สำหรับการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง” The 28<sup>th</sup> National TICHe Conference (TICHe2018) Hotel Pattaya, Thailand, November 8-9, 2018

หมายเหตุ :

เงื่อนไขทุนพัฒนานักวิจัยใหม่ จะต้องมีผลงานที่ได้ตีพิมพ์ ในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติอย่างน้อย 2 บทความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1].จิรวรรณ พิจารณ์. วาสนา พนฺชน. มิกิ กัณณะ. สรวุฒิ สมนาม. สัมพันธ์ วงศ์นาวา. “การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม 2558, หน้า 174-185
- [2]. Cheves Walling, “Fenton's reagent revisited” *Acc. Chem. Res.*, 1975, 8 (4), pp 125–131
- [3]. ณัชชารีย์ ธนกรจิตพิพัฒน์ และกรรณิการ์ ดิขวงศ์. 2555. หน้า 839-846 “การบำบัดน้ำเสียโรงอาหารโดยกระบวนการเฟนตัน” การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9. นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- [4]. สุขนัม แก้วมาตย์. บุญสร้าง ดิเรกสถาพร. 2555 “การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์” การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [5]. ดร. นัดดา เวชชากุล. (2012). การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ *Technology Promotion: Energy & Environment*, Vol.38 No.221 53-55.
- [6]. ณัฐฉิณี ศุภเมธานนท์. “การใช้เศษเครื่องปั้นดินเผาชนิดไม่เคลือบจากตำบลท่านเกวียนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสีย” คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2556
- [7]. M.M.J. Treacy and J.B. Higgins “Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites” Fourth Revised Edition, 213
- [8]. Toru Wakihara, Yukichi Sasaki, Hitoshi Kato, Yuichi Ikuhara and Tatsuya Okubo ‘Investigation of the surface structure of zeolite A’ *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2005,7 , 3416-3418
- [9]. [http://th.swewe.net/word\\_show.htm/](http://th.swewe.net/word_show.htm/)
- [10]. เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ. “การสำรวจและวิจัยคุณภาพของดินเบาลำปางเพื่องานด้านสิ่งแวดล้อม” รายงานวิชาการกองเศรษฐศาสตร์นิเวศวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, ฉบับที่ กศ 7, 2544, หน้า 1-2
- [11]. กฤษณาพร สีโต “โฟโตเฟนตันและ TiO<sub>2</sub> – โฟโตคะตะไลติกเดกรเดชันของสีรีแอคทีฟเรด 141” คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546
- [12]. Abrahart, E.N. “Dyes and their Intermediates” Pergamon Press Ltd., 1968 ,pp. 77-78.
- [13]. ชำนาญ ราษฎร์. “การศึกษาสมบัติทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอินทรีย์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2544
- [14]. Copyright. “เมทิลออเรนจ์” [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/2556>.
- [15]. พลากร บุญใส, ปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2,4 – ไดโครโรฟีนอลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และซีโอไลต์ ชนิด Fe/SUZ-4, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 9. (2014).
- [16]. Cameochemicals.noaa.gov. (1999). P-Chlorophenol. Retrieved December 1, 2017, From CAMEO Chemicals Web Site: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/2906>

- [17]. Parag R Gogate , Aniruddha B Pandit, “A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions” *Advances in Environmental Research*, Volume 8, Issues 3–4, March 2004, Pages 501–551
- [18]. Oscar González, Carme Sans, Santiago Esplugas “Sulfamethoxazole abatement by photo-Fenton: Toxicity, inhibition and biodegradability assessment of intermediates” *Journal of Hazardous Materials*, Volume 146, Issue 3, 31 July 2007, Pages 459–464
- [19]. Y.H. Huang, Y.J. Huang, H.C. Tsai, H.T. Chen, “Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the photo-Fenton process” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 41, Issue 6, November 2010, Pages 699–704
- [20]. Syllos S. da Silva, Osvaldo Chiavone-Filho , Eduardo L. de Barros Neto, Claudio A.O. Nascimento, “Integration of processes induced air flotation and photo-Fenton for treatment of residual waters contaminated with xylene” *Journal of Hazardous Materials*, Volumes 199–200, 15 January 2012, Pages 151–157
- [21]. Junjian An, , Lihua Zhu, Yingying Zhang, Heqing Tang, “Efficient visible light photo-Fenton-like degradation of organic pollutants using in situ surface-modified BiFeO<sub>3</sub> as a catalyst” *Journal of Environmental Sciences*, Volume 25, Issue 6, 1 June 2013, Pages 1213–1225
- [22]. Rafael Gonzalez-Olmos, Maria J. Martina, Anett Georgi, Frank-Dieter Kopinke, Isabel Oller, Sixto Malato, “Fe-zeolites as heterogeneous catalysts in solar Fenton-like reactions at neutral pH” *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 125, 21 August 2012, Pages 51–58
- [23]. Fei Ji, Chaolin Li, , Jiahuan Zhang, Lei Deng, “Heterogeneous photo-Fenton decolorization of methylene blue over LiFe(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> catalyst” *Journal of Hazardous Materials*, Volume 186, Issues 2–3, 28 February 2011, Pages 1979–1984
- [24]. Ting Liu, Hong You, , Qiwei Chen, “Heterogeneous photo-Fenton degradation of polyacrylamide in aqueous solution over Fe(III)-SiO<sub>2</sub> catalyst” *Journal of Hazardous Materials*, Volume 162, Issues 2–3, 15 March 2009, Pages 860–865
- [25]. Cezar Catrinescu, Antonius Kettrup, “Effect of dealumination of iron(III) exchanged Y zeolites on oxidation of Reactive Yellow 84 azo dye in the presence of hydrogen peroxide” *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 51, Issue 3, 10 August 2004, Pages 149–157
- [26]. Aiyin Chen, Xiaodong Ma, Hongwen Sun, “Decolorization of KN-R catalyzed by Fe-containing Y and ZSM-5 zeolites” *Journal of Hazardous Materials*, Volume 156, Issues 1–3, 15 August 2008, Pages 568–575
- [27]. R. Gonzalez-Olmos, U. Roland, H. Toufar, F.-D. Kopinke, A. Georgi, “Fe-zeolites as catalysts for chemical oxidation of MTBE in water with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>” *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 89, Issues 3–4, 15 July 2009, Pages 356–364

- [28]. K.A. Sashkina, E.V. Parkhomchuk, N.A. Rudina V.N. Parmon, “ The role of zeolite Fe-ZSM-5 porous structure for heterogeneous Fenton catalyst activity and stability ” *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 189, 2014, Pages 181–188.
- [29]. Samuel Queirós, V. Morais, Carmen S.D. Rodrigues, F.J. Maldonado-Hódar, Luis M. Madeira, “Heterogeneous Fenton’s oxidation using Fe/ZSM-5 as catalyst in a continuous stirred tank reactor” *Separation and Purification Technology* Volume 141, 2015, Pages 235-245.
- [30]. Lovjeet Singh, Pawan Rekha, Shri Chand, “Cu-impregnated zeolite Y as highly active and stable heterogeneous Fenton-like catalyst for degradation of Congo red dye” *Separation and Purification Technology* Volume 170, 2016, Pages 321-336
- [31]. Jie He, Xiaofang Yang, Bin Men and Dongsheng Wang “Interfacial mechanisms of heterogeneous Fenton reactions catalyzed by iron-based materials: A review” *Journal of Environmental Sciences*, 2016, Vol. 39, pp. 97-109
- [32]. Chyow-San Chiou, Yi-Hung Chen, Chang-Tang Chang, Ching-Yuan Chang, Je-Lueng Shie and Yuan-Shan Li “Photochemical mineralization of di-n-butyl phthalate with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>” *Journal of Hazardous Materials B*, 2006, Vol. 315, pp. 344-349
- [33]. Giuseppina Iervolino, Vincenzo Vaiano, Diana Sannino, Luigi Rizzob, Giuseppe Sarno, Paolo Ciambella and Lyubov A. Isupovac “Influence of Operating Conditions in the Photo-Fenton Removal of Tartrazine on Structured Catalysts” *Chemical Engineering Transactions*, 2015, Vol. 43
- [34]. ธีรนุช ควรเชิดชู. เอกชัย จารุपालี. สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอโดยใช้ดินดำสุราษฎร์เป็นแหล่งของซิลิกาและอลูมินาและใช้การเติบโตของผลึกแบบทุติยภูมิ” วารสารรวมคำแห่ง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม 2556, หน้า 1-17
- [35]. อติศักดิ์ ไสยสุข “วัสดุเมมเบรนแบบลำดับชั้น: ความสำคัญและประโยชน์” ข่าวสารคณะวิทยาศาสตร์ มช. ปีที่ 20, กรกฎาคม 2557, หน้า 5-7
- [36]. Jeremias de Souza Macedo., Nivan Bezerra da Costa Júnior., Luis Eduardo Almeida., Eunice Fragoso da Silva Vieira., Antonio Reinaldo Cestari., Iara de Fátima Gimenez., Neftali Lenin Villarreal Carreño., and Ledjane Silva Barreto. “Kinetic and calorimetric study of the adsorption of dyes on mesoporous activated carbon prepared from coconut coir dust” *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol.298. 2006. pp. 515-522
- [37]. Yan Chen, Qiong Wu, Qitong Jin, Kuiren Liu, A facile sol-gel method for the fabrication of nitrogen doped TiO<sub>2</sub>/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/diatomite composite with enhanced photoactivity, *Advanced Powder Technology* 28 (2017) 2225–2231.
- [38]. IUPAC “Manual on Catalyst Characterization” *Pure &Apply. Chem.* Vol. 63. 1991. pp. 1227-1246

- [39]. Daneshvar N., Oladeraragoze A. and Djafarzadeh N. “Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters” *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. B129. pp. 116-122
- [40]. Ebrahiem E. Ebrahiem, Mohammednoor N. Al-Maghrabi and Ahmed R. Mobarki “Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology” *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol.10. pp. S1674–S1679
- [41]. Giuseppina Iervolino, Vincenzo Vaiano, Diana Sannino, Luigi Rizzob, Giuseppe Sarno, Paolo Ciambellia and Lyubov A. Isupovac “Influence of Operating Conditions in the Photo-Fenton Removal of Tartrazine on Structured Catalysts” *Chemical Engineering Transactions*, 2015, Vol. 43
- [42]. Miren Blanco, Amaia Martinez, Arrate Marcaide, Estibaliz Aranzabe and Ana Aranzabe “Heterogeneous Fenton Catalyst for the Efficient Removal of Azo Dyes in Water” *American Journal of Analytical Chemistry*. 2014. Vol. 5. pp. 490-499
- [43]. ชลดา ธีรการุณวงศ์ “ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไททาเนียมไดออกไซด์” วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, มกราคม 2554, หน้า 62-73
- [44]. Malik, P.K.; Saha, S.K. “Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst”. *Sep and Puri Tech*. Vol. 31, 2003, pp. 241-250
- [45]. Hang Xu., Mei Li., Hui Wang., Juan Miao., and Lei Zou. “ Fenton Reagent Oxidation and Decolorizing Reaction Kinetics of Reactive Red SBE” *Energy Procedia*. Vol. 16. 2012. pp. 58-64
- [46]. Xu, Z., Liang, J., Zhou, L. Photo-Fenton-like degradation of azo dye methyl orange using synthetic ammonium and hydronium jarosite, *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, 546, 112-118
- [47]. Liu, Y., Zhang, G., Chong, S., Zhang, N., Chang, H., Huang, T., Fang, S. NiFe(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>x</sub> as a heterogeneous Fenton catalyst for removal of methyl orange, *Journal of Environment Management*. 2017, 192, 150-155
- [48]. Youusef, N.A., Shaban, S.A., Ibrahim, F.A., Mahmoud, A S. Degradation of methyl orange using Fenton catalytic reaction, *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016, 25, 317-321.
- [49]. M., T., M. Zainuri, D., Synthesis of SiO<sub>2</sub> nanopowders containing quartz and cristobalite phases from silica sands, *Materials science-Pland*, 33(1), 2015, pp. 47-55.
- [50]. S. A., J., R. Bongiovanni, D. L., M., Surface modification of iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pigment particles with amino-functional polysiloxane for improved dispersion stability and hydrophobicity, *Pigment and Resin Technology*, 43(4), 2014, pp. 219-227
- [51]. สิริพร ทองอ่อน. (2016). การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวานาเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสีโดยวิธีโซล-เจล เพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2016

- [52]. F. Nemati, M. M. Heravi, A. Elhampour, Magnetically nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O core-shell composite : An efficient novel catalyst for the regio-selective synthesis of 1,2,3-triazoles : A click reaction, RSC Adv., 2015, DOI: 10.1039/C5RA06810J
- [53]. ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, วัสดุอนุพันธ์คืออะไร, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2554.
- [54]. S. Xavier, R. Gandhimathi, P. V. Nidheesh, S. T. Remesh, Comparison of homogeneous and heterogeneous Fenton processes for the removal of reactive dye Magenta MB from aqueous solution, Desalination and Water treatment, 2013, pp. 1-10.
- [55]. M. Bayat, M. Sohrabi, S. J. Royae, Degradation of phenol by heterogeneous Fenton reaction using Fe/clinoptilolite, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 18, 2012, pp. 957–962.
- [56]. L. Xu, J. Wang, Magnetic Nanoscaled Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> Composite as an Efficient Fenton-Like Heterogeneous Catalyst for Degradation of 4- Chlorophenol, Environ. Sci. Technol. 46, 2012, pp. 10145–10153.
- [57]. A. Mirzaei, Z. Chen, F. Haghghat, L. Yerushalmi, Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogonous Fenton-type processes e A review, Chemosphere, 174, 2017, pp. 665-688.
- [58]. ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์, จรรย์ บุญกาญจน์, การบำบัดน้ำเสียที่มีสารไฮโดรคาร์บอนด้วยปฏิกิริยา fenton ร่วมด้วยการตกตะกอนของเกลือซัลเฟต, งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2002).
- [59]. H.K.N. Mahrouqia, M.A. Nawia, W.I. Nawawi, Photodegradation of 4-Chlorophenol using Carbon Coated TiO<sub>2</sub> under Solar Irradiation, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, Issue 6, June 2014

## ภาคผนวก ก

### เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิต จากบทที่ 8

เรียงตามลำดับดังนี้

1. Pongsert Sriprom, Voracha Champa, Prakob Kitchaija and **Pornsawan Assawasaengrat**. “Optimizing Decolorization Efficiency of Methylene Blue by Photo-Fenton Process over Fe-Diatomite using Central Composite Design” Computer Aided Chemical Engineering, Vol.43, 2018, P409-414.
2. Atipong Paikamnam, **Pornsawan Assawasaengrat**, Prakob Kitchaija and Pongsert Sriprom. “Fenton Reaction of 4-Chlorophenol Degradation Using Fe-TiO<sub>2</sub>/Diatomite” Engineering Transactions, Vol.21, No2(45), July-Dec 2018.
3. Wongsakorn Songmuangkean, Prakob Kitchaiya, Pongsert Sriprom and **Pornsawan Assawasaengrat** “Decolorization of methyl orange using photo-fenton over iron-diatomite catalyst” The 7<sup>th</sup> International TICHe Conference (ITICHe 2017) Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand, October 18-20, 2017
4. **Pornsawan Assawasaengrat**, Varocha Champa, Prakob Kitchaiya “Kinetics of Methylene Blue Decolorizing for Photo-Fenton Process Using Fe-Diatomite Catalyst” Annual Conference on Engineering and Applied Science (ACEAT) , Osaka, Japan, November 27-29, 2018
5. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์, ชุตติกาญจน์ สายโรจน์, ประกอบ กิจไชยา และ พงษ์เสริฐ ศรีพรหม “การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO<sub>2</sub>/Diatomite สำหรับการสลาย 4-คลอโรฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง” The 28<sup>th</sup> National TICHe Conference (TICHe2018) Hotel Pattaya, Thailand, November 8-9, 2018

## ภาคผนวก ข

## สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

## สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	81,760	81,760	0
ค่าใช้สอย	160,000	137,856	+22,144
ค่าวัสดุ	198,240	220,384	-22,144
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	440,000	440,000	0

หมายเหตุ

เนื่องจาก หมวดค่าใช้สอย มีเงินคงเหลือ 22,144 บาท แต่หมวดวัสดุใช้จ่ายเกิน 22,144 บาท จึงขอเบิกเงินค่าวัสดุจำนวน 22,144 บาท ในหมวดค่าใช้สอย

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

เพศ  ชาย  หญิง วันเดือนปีเกิด 9 กพ. 2517 อายุ 45 ปี

หน้าที่การงานปัจจุบัน (อาจารย์/เจ้าหน้าที่ /นักวิจัย /นักศึกษาระดับ...../อื่นๆ)

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

เริ่มทำงาน ณ สจล. ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม .พ.ศ. 2545

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	เคมีวิศวกรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2539
วศ.ด.	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2545

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ...Catalysis, Environmental Catalysis, Catalytic Reaction, Porous Materials and Applications

## ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2548-2558	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2551	ทุนวิจัยจากเงินงบประมาณ	งบประมาณแผ่นดิน
2555	ทุนวิจัยจากเงินงบประมาณ	งบประมาณแผ่นดิน

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. ประมินทร์ ขวัญนอน, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, ดวงกมล ณ ระนอง “การเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 25 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2551
2. วรช แพทย์รังษี, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การดูดซับกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์จากแกลบ” การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 20-21 ตุลาคม 2551
3. สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, นิพนธ์ สิงห์ศักดิ์, สุกัญญา การวิไลโรจนกุล, สุนทร จันทรราชภูริ, นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (อะลูมิเนียม, นิกเกิล, เซอร์โคเนียม) ฟอสเฟต” การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 20-21 ตุลาคม 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศศิธร อินทรชิต, สุธาสินี เนรมิตตกพวงศ์, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์บีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย” การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 8, 25-27 มีนาคม 2552

5. สุธาสินี เนรมิตตกพวงศ์, ศศิธร อินทรชิต, ปฏิพัทธ์ เคนนาดี, จักรี โสธีภา, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, อาทิตย์ เนรมิตตกพวงศ์ “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บีต้าและซีโอไลต์วายที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 26 -27 ตุลาคม 2552

6. พงษ์เสริฐู ศรีพรหม, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, อาทิตย์ เนรมิตตกพวงศ์, สุธาสินี เนรมิตตกพวงศ์ “การกำจัดแอนิลินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 26 -27 ตุลาคม 2552

7. พิณเทพ เศรษฐโกคิน, พุทธชาติ จันทร์เมือง, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, สุธาสินี เนรมิตตกพวงศ์ “การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 เดือน มีนาคม 2553

8. ณพงค์ เทียรฆโรรณกุล, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “ การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2553

9. ชวัญปวีณ์ สิทธิเชตรกรณ์, ช่อทิพย์ ทองอ่อน, นราทิพย์ เจตติลกวรากร, นัชพันธ์ อารงกขกร, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การศึกษา การดูดซับและการคายซับแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 22-23 พฤศจิกายน 2553

10. Weerawat Clowutimon, Sutasinee Neramittagapong, Piyasan Praserthdam, Pornsawan Assawasaengrat “Synthesis of Beta Zeolite from bagasse fly ash ” The 17<sup>th</sup> Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

11. Pongsert Sriprom, Sutasinee Neramittagapong, Arthit Neramittagapong, Pornsawan Assawasaengrat “Removal of Aniline from Synthetic Wastewater using Catalytic Wet Oxidation” The 17<sup>th</sup> Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

12. Weerawat Clowutimon, Pornsawan Assawasaengrat, Deacha Chatsiriwech “Adsorption of Congo red on modify rice husk silica” The 17<sup>th</sup> Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

13. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2553

14. Weerawat Clowutimon, Prakob Kitchaiya, Pornsawan Assawasaengrat “ADSORPTION OF FREE FATTY ACID FROM CRUDE PALM OIL ON MAGNESIUM SILICATE DERIVED FROM RICE HUSK” Engineering Journal, Vol 15, No 3, July 2011

15. Pornrin Jintanavasan and Pornsawan Assawasaengrat, “Synthesis of Magnesium Silicate as adsorbent in biodiesel”, ICEAST 2012, The International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, November 2012, Bangkok, Thailand
16. Weerawat Clowutimon, Pornrin Jintanavasan and Pornsawan Assawasaengrat, “Adsorption of free fatty acid in biodiesel by magnesium silicate” The 3<sup>rd</sup> International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, October 17-18, 2013
17. ขวัญปวีณ์ สิทธิเชตรกรณ์, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการดูดซับวิตามินอีในน้ำมันปาล์มโอเลอินส์ โดยใช้ตัวดูดซับ MCM-41” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ ๓๐ ฉบับที่ ๓ เดือนกันยายน ๒๕๕๖
18. Pornsawan Assawasaengrat and Khwanpawi Sitthikhethkorn “Modification of Pore Size of MCM-41 Adsorbent for Adsorption of Vitamin E in Palm Olein” The 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering and Applied Sciences July 22-24, 2014 Hokkaido, Japan
19. กัณฑพงศ์ เลิศวิธิ, เหมือนเดือน พิศาลพงศ และพรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การดูดซับคองโกเรตจากสารละลายในน้ำด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแบคทีเรียลเซลลูโลส” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย วันที่ 18-19 ธันวาคม 2557 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่
20. Watcharakorn Pranee, Pornsawan Assawasaengrat, Arthit Neramittagapong, and Sutasinee Neramittagapong “Effect of Iron-Doped Diatomite on the Enhancement of Dimethyl Ether Productivity through Methanol Dehydration” TIChE International Conference วันที่ 18-19 ธันวาคม 2557 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่
21. Pornsawan Assawasaengrat, Pornrin Jintanavasan and Prakob Kitchaiya “Adsorption of FFA, Soap and Glycerine in Biodiesel Using Magnesium Silicate” CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 43, 2015
22. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ “การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและพลังงานไมโครเวฟ” วิศวกรรมสาร มข. Vol.42 No.2 April-June 2015 ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 เดือนเมษายน-มิถุนายน 2558
23. Pornsawan Assawasaengrat, Pornrin Jintanavasan “Adsorption of soap in biodiesel using Magnesium Silicate” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences, March 29-31, 2016 Kyoto
24. Pornsawan Assawasaengrat, Sutasinee Neramittagapong, Watcharakorn Pranee & Piyasan Praserthdam , “Methanol conversion to dimethyl ether over beta zeolites derived from bagasse fly ash” ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 2016, VOL. 38, NO. 20, 3081–3088
25. Watcharakorn Pranee, Sutasinee Neramittagapong, Pornsawan Assawasaengrat & Arthit Neramittagapong “Methanol dehydration to dimethyl ether over strong-acid-modified

diatomite catalysts” ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS 2016, VOL. 38, NO. 21, 3109–3115

26. Watcharakorn Pranee, Sutasinee Neramittagapong, Pornsawan Assawasaengrat & Arthit Neramittagapong “Dimethyl ether synthesis from methanol over diatomite catalyst modified using nitric acid treatment” ENERGY SOURCES, PART A: RECOVERY, UTILIZATION, AND ENVIRONMENTAL EFFECTS, 14 August 2016, VOL. 38, NO. 15, 2244–2249

27. ทองฉัตร จิ่งสมาน พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ” วิศวกรรมลาดกระบัง ฉบับที่ 1 มีนาคม 2559

28. ชวิศา เชื้อแป้น พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับเมทิลีนบลูด้วย MCM-41 ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ” วิศวกรรมลาดกระบัง ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2559

29. วิทยา กรอบทอง, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลลอรินจด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตันบน ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Fe}/\text{TiO}_2$ ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, 26-28 ตุลาคม 2559

30. วโรชา จำปา, พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์, “การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, 26-28 ตุลาคม 2559