

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย
กระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

STUDY ON OPTIMUM CONDITIONS AND KINETICS FOR PHOTO-FENTON
DEGRADATION OF METHYLENE BLUE USING Fe-DIATOMITE CATALYST



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-220-098

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู
ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

STUDY ON OPTIMUM CONDITIONS AND KINETICS FOR PHOTO-FENTON
DEGRADATION OF METHYLENE BLUE USING Fe-DIATOMITE CATALYST



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-220-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON OPTIMUM CONDITIONS AND KINETICS FOR PHOTO-FENTON
DEGRADATION OF METHYLENE BLUE USING Fe-DIATOMITE CATALYST



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-220-098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย
กระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์

Thesis Title Study on Optimum Conditions and Kinetics for Photo-Fenton Degradation of
Methylene Blue using Fe-Diatomite Catalyst

นักศึกษา นางสาวโรชา จำปา


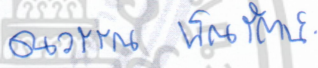


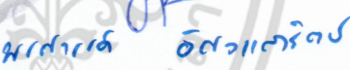
รหัสประจำตัว 59601276

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-220-098

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	
ผศ.ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์	
ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.ญาณิพร พิชรวิโชติ	
ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงวันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาภาวะที่เหมาะสมและจลนพลศาสตร์ของการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์
นักศึกษา	นางสาวโรชา จำปา
รหัสนักศึกษา	59601276
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการเอ็บซุ่มระหว่างไดอะตอมไมต์กับสารละลายเพอร์ซัลเฟตไฮเดรต วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การร้าวของรังสีเอ็กซ์ (XRF) วิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิค BET ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันจากแบบจำลองสามารถสลายสีย้อมได้ 100% เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 5.8 ทำการทดลองซ้ำที่ภาวะดังกล่าว 5 การทดลอง พบว่าสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้เฉลี่ยร้อยละ 99.2% คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.8% และที่ภาวะเหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 72.3% ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร และ pH 5.8 พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 49% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ลดลงเป็น 45% และ 40% ตามลำดับ โดยรูปแบบของปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันพบว่ามีค่าเท่ากับ -2.97 kJ/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on optimum conditions and kinetics for Photo-Fenton degradation of Methylene blue using Fe-Diatomite catalyst
Student	Miss Varocha Champa
Student ID.	59601276
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Pornsawan Assawasaengrat

ABSTRACT

This thesis studied the degradation of methylene blue by Photo-Fenton process using Fe-Diatomite catalysts, prepared by dry impregnation between diatomite and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. 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 $T=25^\circ\text{C}$, the performance of dye degradation is 49%. When the temperature increases to 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 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่มอบความรู้ให้ คำปรึกษาและคำแนะนำโดยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ ได้แก่ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS), X-ray Diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), X-Ray Fluorescence spectroscopy (XRF), Surface area and Porosity Analyzer (BET) และเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer (TOC)

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณครอบครัวผู้ซึ่งให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการดำเนินงานจนสำเร็จ การศึกษา

วโรชา จำปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปฏิกริยาเฟนตัน.....	4
2.1.1 กลไกการเกิดปฏิกริยาเฟนตัน.....	4
2.1.2 กระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	5
2.2 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	6
2.2.1 ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์.....	6
2.2.2 ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์.....	6
2.3 ไดอะตอมไมต์.....	7
2.3.1 คุณสมบัติของไดอะตอมไมต์.....	7
2.3.2 ประโยชน์ของไดอะตอมไมต์.....	7
2.4 สีย้อม.....	7
2.4.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ.....	8
2.4.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี.....	8
2.4.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน.....	8
2.5 เมทิลีนบลู.....	10
2.5.1 การใช้งานของเมทิลีนบลู.....	10
2.5.2 ความเป็นพิษของเมทิลีนบลู.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	11
2.6.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ.....	11
2.6.2 หลักการการออกแบบการทดลอง.....	11
2.6.3 แนวทางการออกแบบการทดลอง.....	12
2.6.4 ขั้นตอนการดำเนินการออกแบบการทดลอง.....	12
2.6.5 ประเภทของแบบการทดลอง.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.7.1 ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน.....	18
2.7.2 ศึกษาการออกแบบการทดลอง.....	20
2.7.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	22
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	22
3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์.....	22
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์.....	23
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดย ใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).....	23
3.5 การตรวจวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon: TOC).....	23
3.6 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ที่มีนัยสำคัญ.....	23
3.6.1 การออกแบบการทดลอง.....	23
3.6.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลอง.....	24
3.7 การทดสอบการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน.....	24
3.7.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลีนบลู.....	24
3.7.2 การทดสอบการสลายสีย้อม.....	25
3.7.3 คำนวณหาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	25
3.8 ศึกษาจลนพลศาสตร์.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	27
4.1 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เข้ากับเหล็กไดอะทอมไมต์ต่อ การสลายสีย้อมเมทิลีนบลู.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์.....	28
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction technique: XRD).....	28
4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะทอมไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	29
4.2.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF).....	29
4.2.4 การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET).....	30
4.3 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ที่มีนัยสำคัญ	31
4.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	31
4.3.2 แบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	32
4.3.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง.....	35
4.3.4 ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการ โฟโตเฟนตัน.....	36
4.4 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดย ใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS).....	37
4.5 การกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon : TOC).....	37
4.6 จลนพลศาสตร์.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	50
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ.....	56
ภาคผนวก ค การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab.....	58

ประวัติผู้เขียน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของเมทิลีนบลู.....	10
2.2 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2 ³ แฟคทอเรียล.....	14
2.3 การกำหนดค่า Resolution ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน.....	15
2.4 สรุปวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ.....	17
2.5 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	19
2.6 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาการออกแบบการทดลอง.....	20
2.7 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาจลนพลศาสตร์.....	21
3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	24
4.1 ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์.....	29
4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะตอมไมต์.....	30
4.3 ระดับของปัจจัยจากการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	31
4.4 การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	31
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	33
4.6 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ภาวะที่เหมาะสม.....	36
4.7 ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะที่เหมาะสม.....	37
4.8 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเพนตันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	41
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	50
ก.2 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์กับเหล็กซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้น สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัม ต่อลิตร pH 5.7.....	51
ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลูและประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	51
ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ภาวะที่ เหมาะสม.....	53
ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	53
ก.6 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็กหลังการเกิดปฏิกิริยาในการสลายสีย้อมที่ภาวะที่ เหมาะสมที่สุด.....	54
ก.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวม.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VI ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.8 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารละลาย สีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร pH 5.8.....	55
ก.9 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่อุณหภูมิ 25, 55 และ 75 องศาเซลเซียส.....	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง **vi** ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	10
2.2 ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับ 3 ปัจจัย.....	16
4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.7.....	27
4.2 ดิฟเฟอเรนเชียลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	28
4.3 สันฐานและลักษณะพื้นผิวของ (A) ไดอะทอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (B) ไดอะทอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (C) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า และ (D) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	29
4.4 Residual plots จากการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง.....	35
4.5 Optimization Plot ของการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab.....	36
4.6 เปอร์เซ็นต์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะที่เหมาะสมที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที.....	38
4.7 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	39
4.8 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 0-120 วินาที.....	40
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C/C_0)$ กับ เวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	41
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$	42
ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	50
ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	53
ค.1 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	58
ค.2 การเลือกการออกแบบการทดลองและจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	58
ค.3 การเลือกการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	59
ค.4 การกำหนดข้อปัจจัยที่ใช้ในการทำลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	59
ค.5 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.6 ตารางการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	60
ค.7 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต.....	61
ค.8 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	61
ค.9 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	62
ค.10 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์.....	62
ค.11 วิเคราะห์ปัจจัยไม่มีนัยสำคัญ.....	63
ค.12 คัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก.....	63
ค.13 การวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมานั้นประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เช่น สีย้อม ความเป็นกรด เบส สารแขวนลอย ความร้อนและอื่นๆซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ สารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) โดยส่วนมากแล้วสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถกำจัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีต่างๆไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้วยังลดการแพร่ของออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของแหล่งน้ำและบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอาจทำให้สัตว์หรือพืชน้ำตายได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมของโรงงานจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมเพื่อลดและกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำให้ได้ตามมาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ กระบวนการในการบำบัดน้ำเสียนั้นมี 4 วิธี ได้แก่ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตันก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อได้เปรียบคือ มีต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับการบำบัดน้ำเสียทางเคมีวิธีอื่นๆ[1] เมื่อใช้กระบวนการเฟนตันร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลตหรือกระบวนการโฟโตเฟนตัน (Photo-Fenton process) จะยิ่งทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) เพิ่มมากขึ้นซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง โดยจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์นำไปสู่การสลายสารเหล่านี้ส่งผลให้ความเป็นพิษลดลง [2]

ปฏิกิริยาเฟนตันแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Fenton) นั้นมักจะพบปัญหาในการแยกโลหะหนัก เช่น เหล็กออกจากน้ำเสียหลังจากการบำบัด ดังนั้นจึงมีการศึกษาปฏิกิริยาเฟนตันแบบวิวิธพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Heterogeneous Fenton) ซึ่งวัสดุรองรับที่นิยมใช้มักเป็นวัสดุที่มีรูพรุนเช่น ซีโอไลต์ อะลูมินา ดิน ไดอะตอม เป็นต้น ไดอะตอมไมต์หรือดินเบา นั้นมีคุณสมบัติคือมีขนาดของรูพรุนค่อนข้างใหญ่ พื้นที่ผิวสูงและเสถียรต่อการทำปฏิกิริยาเคมี นิยมใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา [3]

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงเตรียมเหล็กไไดอะตอมไมต์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design) ในการหาภาวะที่เหมาะสมในการละลายสีย้อม และทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ออกแบบการทดลองและหาภาวะที่เหมาะสมในการละลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์
- 1.2.2 ศึกษากลไกของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์
- 1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์
 - 1.3.2.1 วิเคราะห์โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
 - 1.3.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF)
 - 1.3.2.3 วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
 - 1.3.2.4 วิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไไดอะตอมไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
 - 1.3.2.5 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจะเพาะและรูพรุนโดยใช้เครื่อง Surface area and Porosity Analyzer (BET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ออกแบบการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วิธี เซ็นทรัลคอมโพสิตที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 300-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กไดอะทอมไมต์ 0.2-0.8 กรัมต่อลิตรและ pH 3-7

1.3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

หาค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy: E_a) ของ ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.8 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 25 55 และ 75 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้

1.4.2 สามารถเข้าใจจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันได้

1.4.3 ใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกริยาเฟนตัน

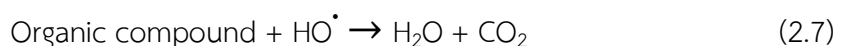
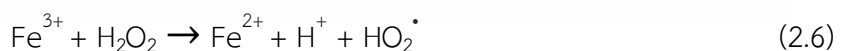
ปฏิกริยาเฟนตันเป็นหนึ่งในกระบวนการของแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เป็นการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันระหว่างไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}/Fe^{3+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อที่จะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) กระบวนการนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปน เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติกหรือสารเคมีที่มาจากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น กระบวนการเฟนตันที่ประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจะช่วยลดค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) ค่าปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับทำปฏิกริยาเคมีกับสารอินทรีย์ (COD) กลิ่น สี รวมทั้งช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ [4]

2.1.1 กลไกการเกิดปฏิกริยาเฟนตัน

กลไกการเกิดปฏิกริยาของสารละลายเฟนตันแสดงดังสมการ (2.1) ปฏิกริยาออกซิเดชันระหว่างสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเฟอร์รัสไอออน ซึ่งจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)



นอกจากปฏิกริยาหลักดังที่แสดงในสมการ (2.1) ในสารละลายยังเกิดปฏิกริยาอื่นๆขึ้นด้วยดังนี้



สมการทั้งหมดเป็นปฏิกริยาที่จะเกิดสำหรับปฏิกริยาเฟนตันเท่านั้นโดยใช้สมการของ Pure system (Flaherty, 1992) โดยสมการทั้งหมดจะไม่ได้เกิดขึ้นทุกสมการ แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณของเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเมื่อเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) มีปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากเกินไป การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.2) แต่ถ้าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณมากเกินไป ในภาวะที่เป็นกรดการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2.5) และ (2.6) จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2.1) (2.3) และ (2.4) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือ น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ (2.7)

2.1.2 กระบวนการโฟโตเฟนตัน

กระบวนการโฟโตเฟนตันเป็นการนำรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) มาประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งกระบวนการกระบวนการโฟโตไลซิสของรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วยในการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการ 2.8 [5]



โดยปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันมีดังนี้ [6]

2.1.2.1 ความเข้มข้นของเหล็ก

เฟนตันรีเอเจนต์ (Fenton Reagent) คือสารละลายของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็ก โดยเหล็กที่ใส่ลงไปนั้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ในภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่เกิดการแตกเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล หากเพิ่มความเข้มข้นเหล็กจนถึงจุดหนึ่งแล้ว พบว่าการเติมเหล็กเข้าไปจะไม่ส่งผลใดๆต่อประสิทธิภาพของระบบ ณ จุดที่ปริมาณเหล็กเหมาะสมที่สุดนี้เป็นคุณลักษณะของ เฟนตันรีเอเจนต์

2.1.2.2 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลโดยตรงกับปริมาณของไฮดรอกซิลเรดิคัลและส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในระบบ หากความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีมากเกินไป ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นน้ำและออกซิเจน

2.1.2.3 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเฟนตันจะเกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หากอุณหภูมิสูงถึง 40-50 องศาเซลเซียสจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นออกซิเจนและน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.4 ผลกระทบจากค่า pH

ค่า pH ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 3-6 โดยประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จะลดลงเมื่อเฟอรัสไอออนเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไอออน จึงทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำโดยที่ไม่เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือสารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยไม่สูญหายไป ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและจะได้อกลับคืนมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภท [7]

2.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (Phase) เหมือนกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ สภาพการเคลื่อนที่จะเหมือนกับสารอื่นๆในระบบ โดยอัตราการเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวเอง

2.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคแตกต่างกับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายไม่สม่ำเสมอและสภาพการเคลื่อนที่จะแตกต่างจากสารอื่นๆ ตัวเร่งปฏิกิริยากระทำโดยอาศัยพื้นที่ผิวและอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับพื้นที่ผิวและความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มักอยู่ในสถานะของแข็ง

ในปฏิกิริยาเพนตันออกซิเดชันแบบเอกพันธ์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญคือ เฟอรัสไอออน แต่เนื่องจากปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงหรือในบางกรณีสารที่ต้องการกำจัดสามารถทำปฏิกิริยากับเฟอรัสไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพสูงเช่น ฟอสเฟตไอออน ทำให้เฟอรัสไอออนมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาน้อยลงรวมทั้งเกิดกากตะกอนของเหล็ก (Iron sludge) ทำให้การกำจัดสารเหล่านี้มีความยุ่งยากและเพิ่มต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาจึงมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เข้ามาแทนที่ ซึ่งความแตกต่างระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สำหรับปฏิกิริยาเพนตันออกซิเดชัน สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่นิยมใช้ได้แก่ เฟอรัสซัลเฟต (FeSO_4) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่นำมาศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ เหล็กออกไซด์บนซิลิกาซึ่งสกัดจากเปลือกข้าว (Fe-Rice hull based SiO_2) เหล็กออกไซด์บนซีโอไลต์ (Fe-Zeolite) ของเสียอุตสาหกรรมเหล็ก (Steel industry waste) และเหล็กบนดินเหนียว (Fe-Clay) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไดอะตอมไมต์

ไดอะตอมไมต์หรือดินเบา (Diatomite) เกิดจากการตกทับถมกันของเปลือกหรือโครงสร้างส่วนแข็ง (Frustules) ของสาหร่ายเซลล์เดียวที่เรียกว่า “ไดอะตอม(diatom)” จำนวนมหาศาลและมีตะกอนพืคพาขนาดละเอียดอีกจำนวนหนึ่งสะสมปะปนอยู่ เปลือกของไดอะตอมประกอบด้วยซิลิกาไร้ผลึกในรูปของโอปอล (Opaline silica, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปมากมาย อาจเป็นท่อกกลม จาน สามเหลี่ยมหรืออื่นๆ มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 50-100 ไมครอน

ไดอะตอมไมต์มีสารจำพวกซิลิกาเป็นองค์ประกอบมีลักษณะอ่อนนุ่ม 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% [8]

2.3.1 คุณสมบัติของไดอะตอมไมต์

เปลือกของไดอะตอมมีลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งคือมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก การที่เปลือกไดอะตอมมีรูปร่างต่างกันทำให้การจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบหรืออัดตัวไม่สนิทเมื่อเกิดการทับถม ทำให้เกิดเป็นคุณสมบัติเฉพาะของไดอะตอมไมต์คือ

1. มีรูพรุน (porosity) สูง
2. ความหนาแน่นต่ำ
3. พื้นที่ผิวจำเพาะสูง
4. ความสามารถในการดูดซับสูง

2.3.2 ประโยชน์ของไดอะตอมไมต์

ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของไดอะตอมไมต์จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น

1. ตัวช่วยกรอง (Filter aids)
2. ตัวเติมปรับสภาพ (Functional filler)
3. ทำวัสดุผสมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregates)
4. ฉนวนกันความร้อน (Insulator)
5. วัสดุดูดซับ (Absorbent)

2.4 สีย้อม

สีย้อม (Dye) เป็นสารที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดมีคุณสมบัติในการละลายน้ำ ในขณะที่บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่มีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลาย

โครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของ สีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกัน จะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กันไป [9]

การจำแนกสีย้อม สีย้อมที่นำมาใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกประเภทได้เป็น 3 ประเภท [10]

2.4.1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

การแบ่งสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

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

เมื่อทำการย้อมจะต้องทำให้สีสามารถเคลื่อนเข้าสู่เส้นใยแล้วเกิดการยึดติดกับเส้นใยได้ โดยกระบวนการเป็นได้ทั้งแบบเชิงกลหรือเชิงเคมี เมื่อสีย้อมอยู่ในรูปของสารละลายแล้วจะเป็นการยากต่อการจำแนกว่าสีที่ละลายอยู่นั้นเป็นสีย้อมหรือเม็ดสี

2.4.2 การจำแนกสีย้อมตามส่วนประกอบทางเคมี

การจำแนกสีย้อมโดยกรรมวิธีนี้ ถือเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากสีในกลุ่มเดียวกันอาจมีวิธีย้อมที่แตกต่างกันและการทำงานกับชนิดของเส้นใยต่างกัน สามารถจำแนกได้เป็น 11 ชนิด คือ

1. Azo Colorants
2. Phenylmethane Dyes
3. Xanthene Dyes
4. Indigoid Dyes
5. Polyolliquinone Dyes
6. Sulphur Pusion Dyes
7. Amine Oxidation Colorants
8. Phthalocyanine Colorants
9. Onium Dyes
10. Reactive Dyes
11. Pigment

2.4.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้งาน

การจำแนกสีย้อมโดยวิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกต่อผู้ใช้งาน ทั้งนี้ยังเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมผลิตสี สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. สีเบสิก (Basic) เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดที่มีประจุบวกของเกลือแอมโมเนียมซัลโฟเนียม หรือออกโซเนียมซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่จะย้อมขนสัตว์

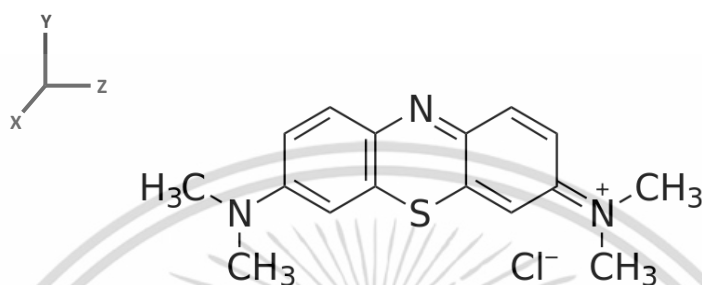
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สีแอซิด (Acid) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกำมะถัน ใช้ในการย้อมขนสัตว์ อาจใช้ในการย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่ประเภทเซลลูโลสบริสุทธิ์จำพวก ปอ ป่าน
3. สีมอร์แดนต์ (Mordant) เป็นสีที่มีต้นแบบมาจากสีแอซิดและได้รับการพัฒนาโดยการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิด ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน
4. สีไดเรกต์ (Direct) เป็นสารประกอบไอออนิก มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้มีความสามารถในการละลายในน้ำสูง จึงทำให้ไม่คงทนต่อกระบวนการที่ใช้น้ำมาก ใช้ในการย้อมฝ้ายหรือเส้นใยเซลลูโลส
5. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีย้อมประเภทไม่ละลายน้ำ จะเกิดเป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ ใช้ในการย้อมเส้นใยอาซิเตท หรือเส้นใยสังเคราะห์ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย
6. สีอะโซอิก (Azoic Dyes) เป็นสารประกอบไอออนิก ที่ตัวสีไม่ละลายน้ำ หากย้อมด้วยสารประเภทฟีนอลจะก่อตัวเป็นสีบนเส้นใย แล้วจึงย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเนียม เนื่องจากเกลือไดอะโซเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบไอออนิกที่ให้สี ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส
7. สีแว็ต (Vat Dyes) เป็นกลุ่มสีที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ อินดิโก (Indigo) และ แอนทราควิโนน (Anthraquinone) การย้อมสีประเภทนี้จะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายก่อนก่อนทำให้เป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนเส้นใย ใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสเช่นฝ้าย
8. สีกำมะถัน (Sulphur Dyes) เป็นกลุ่มสีมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย ในปัจจุบันได้มีการนำสีปรีดิเวสเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น
9. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorant) เป็นสีที่เกิดจากการออกซิไดซ์เกลืออะนิลีนด้วยสารเคมีที่เหมาะสม
10. สีโอเนียม (Onium Dyes) เป็นเม็ดสีที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ ซึ่งกรรมวิธีการย้อมจะดำเนินการเช่นเดียวกับสีแว็ต โดยการให้สีดูดซึมผ่านเข้าเส้นใยและเปลี่ยนกลับเป็นสีที่ไม่ค่อยละลายน้ำอีกครั้ง ส่วนใหญ่จะใช้ในงานพิมพ์
11. สีโลหะ (Mineral Colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ หากต้องการย้อมต้องทำให้สารนี้เกิดการตกตะกอนในเส้นใยก่อน
12. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่มีความสามารถในการละลายน้ำใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เมทิลีนบลู (Methylene Blue : MB)

เมทิลีนบลูคือสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic Compound) ดังที่แสดงในรูป 2.1 มีสูตรโมเลกุล $C_{16}H_{18}ClN_3S$ ที่อุณหภูมิห้องจะมีสถานะเป็นของแข็ง ไร้กลิ่น สีเขียวเข้ม เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินจัดเป็นสีประเภทสีเบสิคคุณสมบัติของเมทิลีนบลูแสดงในตารางที่ 2.1 [11]



รูปที่ 2.1 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

2.5.1 การใช้งานของเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลูใช้งานในหลายสาขา เช่น ชีววิทยา การแพทย์ เคมี และ อุตสาหกรรม ในสาขาชีววิทยา เมทิลีนบลูใช้เป็นอินดิเคเตอร์เพื่อศึกษาเซลล์ ทางด้านการแพทย์จะใช้คุณสมบัติในการฆ่าเชื้อของเมทิลีนบลู สำหรับภาคอุตสาหกรรมเมทิลีนบลูมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่นการย้อมสีกระดาษ ฝ้าย หรือไหม และใช้เคลือบกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ความเป็นพิษของเมทิลีนบลู

โดยทั่วไปเมทิลีนบลูจะใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นผลให้เกิดน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์และสีที่สูง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ สำหรับอันตรายต่อมนุษย์ หากสัมผัสโดยตรง สูดดม หรือ กลืน และอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตา

2.6 การออกแบบการทดลอง

2.6.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ

การออกแบบการทดลองทางสถิติ หมายถึง กระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและข้อสรุปที่สมเหตุสมผล โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output หรือ Response) โดยตัวแปรนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable หรือ Factor Variable) และตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable หรือ Factor Variable) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองจึงมีดังนี้ [12-13]

1. หาดตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุด
2. หาดตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ
3. หาดตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ตัวแปรตอบสนองมีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาดตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

2.6.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

1. การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การจัดสรรวัสดุในการทดลองและลำดับของการทดสอบแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะมีกระจายได้อย่างอิสระ การทำการทดลองแบบสุ่มจะช่วยลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้
2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดจากการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยที่แท้จริงที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง การทำการทดลองซ้ำจะทำให้ประมาณค่าได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น
3. การทำการทดลองแบบบล็อก เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในการทดลอง หรือลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไข เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะได้กำหนดปัญหาในการทดลองได้อย่างชัดเจนและเพื่อระบุวัตถุประสงค์ของการทดลองให้มีความสมเหตุสมผล
2. การเลือกตัวแปรตอบสนอง โดยเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษา
3. การเลือกปัจจัยและการกำหนดระดับของปัจจัย ต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง
4. การเลือกการออกแบบการทดลอง ในการเลือกการออกแบบการทดลองต้องพิจารณาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (จำนวนการทดลองซ้ำ) การเลือกลำดับการทดลองและต้องคำนึงถึงการบล็อก การทำการทดลองซ้ำ หรือข้อจำกัดอื่นๆ ด้วย
5. การดำเนินการทดลอง ต้องคำนึงถึงหลักการดังนี้ คือ ทดลองแบบสุ่ม แต่ละการทดลองต้องทำการทดลองซ้ำ พยายามลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง การทำการทดลองต้องไม่มีอคติ วิเคราะห์ตรงประเด็น และต้องมีการวัดผลที่ชัดเจนและแม่นยำ
6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จะเน้นหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ด้วยกราฟค่าเฉลี่ย (Mean Plot) และกราฟผลกระทบร่วมของปัจจัย (Interaction Plot) ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติมากมาย เช่น SPSS, Minitab, Statistica, SAS, Statgraphics และอื่นๆ ให้เลือกใช้
7. การสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

2.6.4 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการออกแบบการทดลองส่วนมากจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening) การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) และการทวนสอบ (Verification)

2.6.4.1 การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยลดปัญหาระหว่างทำการทดลอง เช่น คน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เงินทุน และวิธีการทดลอง ควรมีการวางแผนและจัดสรรทรัพยากรให้ดีขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัญหา (Define the problem) การกำหนดปัญหาที่มีขอบเขตที่ชัดเจนจะช่วยให้การกำหนดตัวแปรถูกต้อง และสามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) การกำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะดำเนินการนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และข้อมูลที่ได้นั้นใช้ได้จริง
3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต
4. กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยหลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control: SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิมรวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจจะไม่มีประโยชน์มากนัก

2.6.4.2 การคัดกรอง

ในการทดลองหนึ่งๆ ส่วนมากจะมีตัวแปรจำนวนมากที่อาจส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจศึกษา ดังนั้นการคัดกรองจึงเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดกรองตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่เราสนใจศึกษา การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ การคัดกรองอาจจะทำให้สามารถหาค่าที่เหมาะสม (Optimum) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งวิธีที่ใช้ในการคัดกรองตัวแปรมีดังต่อไปนี้

1. Two-Level Full Factorial และ Fractional Factorial ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมใช้กันแพร่หลาย
2. แฟคต์เรียล-เบอร์แมนแม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลอง เพื่อการคัดกรอง
3. General Full Factorial (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) มีประโยชน์ในการทำการทดลองเพื่อการคัดกรองตัวแปรที่มีจำนวนตัวแปรไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4.3 การหาค่าที่เหมาะสม

หลังจากที่มีการคัดกรองตัวแปร ขั้นตอนถัดมาจะทำการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรเหล่านี้โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) โดยใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ของเซ็นทรัลคอมโพสิตและบ็อกซ์-เบนเคนในกรณีที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Responses) สามารถใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งมีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ในการหาค่าที่เหมาะสม

2.6.4.4 การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบว่าค่าที่วิเคราะห์มาได้จากโปรแกรม Minitab นั้นเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถให้ผลลัพธ์ได้จริง โดยทำการทดลองที่ภาวะตามค่าที่หามาจากค่าที่เหมาะสม

2.6.5 ประเภทของแบบการทดลอง

2.6.5.1 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design)

สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ทั้งผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction Factor) ผลกระทบของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟคทอเรียล

ผลกระทบหลัก (Main Effect)	ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Way Interactions)	ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (3-Way Interactions)
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (ไม่รวมการทดลองซ้ำ) เท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน (No Aliased Structure) และศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ส่วนข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองแปรผันตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5.2 การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

นิยมใช้กับการทดลองที่มีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่จำกัด โดยทั่วไปนิยมศึกษาที่ 2 ระดับ จำนวนการทดลองเท่ากับ 2^{k-p} หรือ 3^{k-p} ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองน้อย ส่วนข้อเสีย คือ การตีความผลจะซับซ้อนเนื่องจากในการทดลองมีโครงสร้างที่ซับซ้อนของผลกระทบ จึงต้องกำหนดค่า Resolution ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การกำหนดค่า Resolution ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน

Resolution	สรุปรายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ
III	ผลกระทบหลักไม่ซับซ้อนกับผลกระทบหลัก แต่ซับซ้อนกับผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับคัดกรองปัจจัย
IV	ผลกระทบหลักไม่ซับซ้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย แต่ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยซับซ้อนกัน จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลกระทบหลัก
V	ผลกระทบหลักไม่ซับซ้อนกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยไม่ซับซ้อนกัน จึงเหมาะสำหรับศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย ในกรณีที่ไม่นสนใจผลกระทบตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป

2.6.5.3 การทดลองแบบแฟคเคิต-เบอร์แมน (Plackett-Burman Design)

ใช้ในการคัดกรองปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญเพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน จำนวนการทดลอง (n) โดยที่ไม่ทำการทดลองซ้ำเท่ากับ 2^p หรือ 3^p เมื่อ p เท่ากับ 0, 1, 2, ..., 6 ข้อดีคือการกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยได้จำนวนมากพร้อมๆ กัน ข้อเสียคือจำนวนปัจจัยหลักที่ศึกษาได้สูงสุดไม่เกิน $n-1$ เสมอและเนื่องจากแบบการทดลองนี้มี Resolution III จึงไม่เหมาะจะนำไปใช้ในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญสูง

2.6.5.4 การทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเคน (Box-Behnken Design)

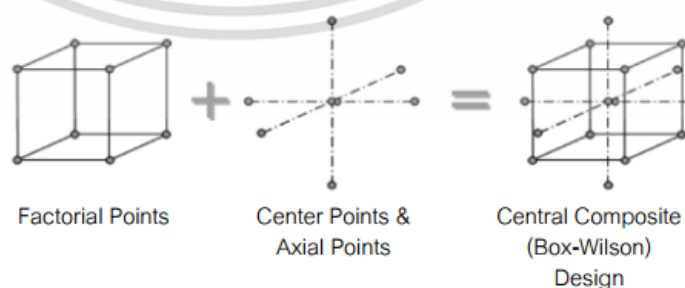
เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเคนใช้หลักการของ 2^2 การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า 3^k การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป การทดลองแบบบ็อกซ์-เบ็นเคนสามารถ

ประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ แต่ใช้กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย ข้อดี คือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effect) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Interaction) ข้อเสียคือจำนวนครั้งที่ทดลองมากและไม่สามารถลดจำนวนได้ และยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

2.6.5.5 การทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite: CCD)

เหมาะสำหรับในการศึกษาหรือสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสอง (Second-order or Quadratic Model) การทดลองแบบ CCD มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองพหุนามอันดับสอง ข้อดีของการทดลองแบบ CCD คือ (1) เหมาะสำหรับการศึกษาสมการพหุนามอันดับสองมากที่สุดในกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) (2) มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงเนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่ารวมทั้งเลือกใช้ได้ทั้งการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับและการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (3) โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ 2^{k-p} การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนและ (4) สามารถแยกการทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับคือทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial Portion) เพื่อสร้างสมการเชิงเส้นในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับและคาดการณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Point) ถ้าสมการเชิงเส้นไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนจุดแกน (Axial Point) จะได้สมการพหุนามอันดับสอง ข้อเสียของการทดลองแบบ CCD คือไม่เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factor)



รูปที่ 2.2 ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตสำหรับ 3 ปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย โดยทำการเปรียบเทียบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน การทดลองแบบบล็อกซ์-เป็นเคนและการทดลองแบบ CCD แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ

แบบการทดลอง	วัตถุประสงค์ในการทดลอง
3^k Full Factorial	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ใช้งบประมาณมาก
3^{k-p}	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีน้อย และไม่เหมาะสมในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองได้ทั้งหมด ในกรณีที่ Resolution มีค่ามาก สามารถประมาณผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้
Box-Behnken	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณเท่านั้น - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ทุกค่า
CCD	<ul style="list-style-type: none"> - เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพเพียง 1 ปัจจัย ยังคงใช้ CCD ได้ - ประมาณค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และสามารถเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ตามระบุ - เป็นแผนการทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

Huan Liang และคณะ [14] ศึกษาการสลายโรดามีนบี(Rhodamine B : RhB) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ไดอะตอมไมต์เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ (diatomite-Fe₂O₃) โดยความเข้มข้นโรดามีนบีเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร, ตัวเร่งปฏิกิริยาไดอะตอมไมต์เหล็กออกไซด์ 0.1 กรัม ทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันเป็นเวลา 80 นาที พบว่าสามารถสลายโรดามีนบีได้ถึง 99.4% และกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon : TOC) ได้ถึง 73.41% นอกจากนี้เมื่อทดลองนำตัวเร่งปฏิกิริยาไดอะตอมไมต์เหล็กออกไซด์มาทดสอบเสถียรภาพโดยการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นจำนวน 5 รอบพบว่าประสิทธิภาพในการสลายโรดามีนบีเฉลี่ยสูงกว่า 90%

Fei Ji และคณะ[15] ได้ทำการทดลองกระบวนการเฟนตันในการออกซิไดซ์เมทิลีนบลูที่เป็นสีย้อมประเภทเบสิค งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีของเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้ LiFe(WO₄)₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมและความเข้มแสงรวมไปถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีของกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์และแบบเอกพันธุ์ จากการศึกษาพบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัมต่อลิตรและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 340 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ pH 5 สามารถกำจัดสีเมทิลีนบลูได้ 94% ในเวลา 60 นาที ที่ภาวะเดียวกันกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบเอกพันธุ์สามารถลดสีเมทิลีนบลูได้ 59%

Yaowen Gao และคณะ [16] ได้ทำการทดลองกระบวนการเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กเบนโทไนต์ (Fe-supported bentonite) ในการสลายโรดามีนบี งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถในการสลายโรดามีนบีในการทดลองเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมของกระบวนการโฟโตเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์และแบบเอกพันธุ์ จากการศึกษาที่ความเข้มข้นโรดามีนบี 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเบนโทไนต์ 0.25 กรัมต่อลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 408 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเบนโทไนต์สามารถดูดซับโรดามีนบีได้ประมาณ 52% หลังจากแช่ตัวเร่งปฏิกิริยาข้ามคืนในสารละลายโรดามีนบีเพื่อให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับคายซับแล้วจึงเริ่มปฏิกิริยาเฟนตันโดยเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 180 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการสลายโรดามีนบีของกระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถสลายโรดามีนบีหลังจากการดูดซับได้อีก 41% เท่ากับสลายโรดามีนบีได้ 93% ในขณะที่สลายโรดามีนบีด้วยกระบวนการเฟนตันแบบไม่ใช้แสงพบว่าสามารถสลายโรดามีนบีหลังจากการดูดซับได้อีกเพียง 5% เท่ากับสลายโรดามีนบีได้เพียง 57% ในการกำจัด COD โดยทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 300 นาทีพบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถลดได้ถึง 80% ในขณะที่กระบวนการเฟนตันแบบไม่ใช้แสงสามารถกำจัด COD ได้ไม่ถึง 6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

นักวิจัย	กระบวนการ	สี	ปริมาณ catalyst	[H ₂ O ₂] (mg/L)	pH	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)
Huan Liang และคณะ	Heterogeneous Photo-Fenton Fe ₂ O ₃ -diatomite	Rh B 80 mg/L	0.25 g/L	408	4.2	80	93
FeiJi และคณะ	Heterogeneous Photo-Fenton ตัวเร่งปฏิกิริยา LiFe(WO ₄) ₂	MB 100 mg/L	1 g/L	170	5	60	84
	Homogeneous Photo-Fenton	MB 100 mg/L	0.65 mgFe/L	170	5	60	59
Yaowen Gao และคณะ	Heterogeneous Photo-Fenton ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-bentonite	RhB 80 mg/L	0.25 g/L	408	4.2	180	93
	Heterogeneous Dark-Fenton ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-bentonite	RhB 80 mg/L	0.25 g/L	408	4.2	180	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ศึกษาการออกแบบการทดลอง

Abd Elaziz Sarrai และคณะ[17] ได้ศึกษาการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสลายไทโลซินความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสลายไทโลซิน ได้แก่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเหล็กและ pH จากการทดลองพบว่าค่า TOC จะลดลงเมื่อความเข้มข้นเหล็กเพิ่มขึ้นโดยช่วง pH ที่ให้ประสิทธิภาพในการลด TOC ได้ดีที่สุดอยู่ในช่วง 2.48-3.05 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าประสิทธิภาพในการลด TOC ลดลง จากการออกแบบการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.4 กรัมต่อลิตร pH 2.6 ความเข้มข้นเหล็ก 6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถสลายไทโลซินได้สูงถึง 97.1% โดยผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองที่ได้

Abdelhadi Abaamrane และคณะ[18] ได้ศึกษาการออกแบบการทดลองแบบ 2-level full factorial เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสลายเมทอมิลด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการสลายเมทอมิลได้แก่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นสารละลายเหล็กไนเตรต ความเข้มข้นเมทอมิลและ pH ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA ในการหาภาวะที่ดีที่สุดในการสลายเมทอมิลพบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นสารละลายเหล็กไนเตรต 0.5 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเมทอมิล 0.06 มิลลิโมลาร์และ pH 3 โดยสามารถสลายเมทอมิลได้ถึง 100%

ตารางที่ 2.6 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาการออกแบบการทดลอง

นักวิจัย	กระบวนการ	ออกแบบการทดลอง	ภาวะที่เหมาะสม				
			[H ₂ O ₂]	[Fe]	pH	ความเข้มข้นสารตั้งต้น	ประสิทธิภาพในการสลายสารตั้งต้น
Abd Elaziz Sarrai และคณะ	Degradation of Tylosin by Photo-Fenton Reaction	CCD	0.4 mg/L	6 mg/L	2.6	15 mg/L	97.1%
Abdelhadi Abaamrane และคณะ	Degradation of Methomyl by Photo-Fenton Process	2-level full factorial	10 mM	0.5 mM ของ Fe(NO ₃) ₃	3	0.06 mM	100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

Dao Sy Duc [19] ศึกษาการสลายสีรีแอกทีฟบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนแก้ว จากการทดลองพบว่าภาวะที่ดีที่สุดในการสลายสีรีแอกทีฟบลูคือที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3.92 มิลลิโมลาร์และ pH 3 ใช้เวลา 90 นาทีในการทำปฏิกิริยาสามารถสลายสีรีแอกทีฟบลูได้ 86.67% จากนั้นศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบข้อมูลกับปฏิกิริยาแบบ pseudo-first order และ pseudo-second order พบว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นไปตามปฏิกิริยาแบบ pseudo-first order โดยค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.0219 min^{-1} และ $R^2 = 0.9414$

Xiaoliang Liang และคณะ[20] ศึกษาการสลายเมทิลีนบลูและเอซิดออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้โครเมียมบนแมกนีไทท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อใส่โครเมียมลงบนแมกนีไทท์ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบออกไซด์ ซึ่งส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวมากขึ้น คุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับจึงดีขึ้นไปด้วย เมื่อทดลองการสลายเมทิลีนบลูและเอซิดออเรนจ์ด้วยกระบวนการเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโครเมียมบนแมกนีไทท์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโครเมียมบนแมกนีไทท์ดูดซับเมทิลีนบลูแต่ไม่ดูดซับเอซิดออเรนจ์ โดยการดูดซับเมทิลีนบลูนั้นเป็นไปตาม Langmuir-Hinshelwood และการสลายเมทิลีนบลูมีลักษณะเป็นไปตามปฏิกิริยา zero-order ในขณะที่การสลายเอซิดออเรนจ์นั้นเป็นไปตามปฏิกิริยาแบบ pseudo-first order

ตารางที่ 2.7 สรุปข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาจลนพลศาสตร์

นักวิจัย	กระบวนการ	ปฏิกิริยา	R^2	$k \text{ (min}^{-1}\text{)}$
Dao Sy Duc	Degradation of Reactive blue by Heterogeneous Fenton	Pseudo-first order	0.9414	0.0219
Xiaoliang Liang และคณะ	Degradation of Methylene blue by Heterogeneous Fenton	Zero-order	0.9810	0.0087
	Degradation of Acid Orange II by Heterogeneous Fenton	Pseudo-first order	0.9920	0.0032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนสาร
2. เครื่อง pH meter
3. ไมโครฟิลเตอร์
4. เครื่องแก้วต่างๆ
5. ตู้อบสารเคมี
6. ตู้ยวี่
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง
8. เครื่อง Visible Spectrophotometer

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. ไดอะตอมไมต์ (ดินเบา)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. เมทิลีนบลู
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H_2O_2)
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
7. สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต($Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$)

3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์

1. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction spectrometry : XRD)
2. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาร์รังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุแต่ละชนิด (X-Ray Fluorescence spectrometry : XRF)
3. วิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
4. วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET)

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AAS-680 ของบริษัท Shimadzu โดยทำการทดสอบเทียบมาตรฐานที่ความเข้มข้นเหล็ก 0 0.5 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำสารละลายตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันและกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกไปตรวจวัดปริมาณเหล็กโดยเทียบกับกราฟสอบเทียบมาตรฐาน

3.5 การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon : TOC)

นำสารละลายตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันและกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกไปที่เวลา 30 และ 60 นาทีไปตรวจวัดหาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม(TOC) ด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer ของบริษัทยี่ห้อ Shimadzu

3.6 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

3.6.1 การออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (CCD) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในกาสลายสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยขอบเขตปัจจัยที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

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

3.6.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลอง

วิเคราะห์การถดถอยซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชัน Second-order Response ดังสมการที่ 3.1

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.1)$$

เมื่อ β_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัด

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น

β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วม

x_i และ x_j คือ ตัวแปรอิสระใน Coded Units

ε คือ ค่าความคาดเคลื่อน

3.7 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

3.7.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

1.1 เตรียมสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 5 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 นำสารละลายที่เตรียมไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตรนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การทดสอบการสลายสีของเมทิลีนบลู

2.1 เตรียมสารละลายสีของเมทิลีนบลูตามความเข้มข้นที่ต้องการปริมาตร 250 มิลลิลิตร เทใส่ ปีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือ โซเดียม ไฮดรอกไซด์

2.2 นำสารละลายในข้อ 1 ใส่ตู้ยวี่พร้อมปั่นกวนโดยที่ยังไม่ต้องเปิดไฟ

2.3 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ตามปริมาณที่ต้องการจากนั้นเทใส่ลงใน สารละลายสีของเมทิลีนบลู

2.4 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายข้อ 3 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ เปิดไฟ แล้วเริ่มจับเวลา

2.5 ให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 30 นาทีแล้วจึงปิดไฟ นำสารละลายไปเหวี่ยงแยกตัวเร่ง ปฏิกิริยาออก

2.6 วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer

3.7.3 คำนวณประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลีนบลู

คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\% \text{Efficiency} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.8 ศึกษาจลนพลศาสตร์

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

3.8.1 ทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายสีของเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร และ pH 5.8 โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลาย เป็น 25 (อุณหภูมิห้อง) 50 และ 75 องศาเซลเซียส

3.8.2 เก็บสารละลายที่เวลา 0 1 2 3 5 10 และ 15 นาทีแล้วนำไปกรองด้วยไมโครฟิลเตอร์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.8.3 ช่วงแรกของปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) พล็อต กราฟระหว่าง $\ln(C/C_0)$ กับ เวลา ความชันที่ได้คือค่าคงที่อัตรา (k) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดัง สมการที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\ln \frac{C}{C_0} = kt \quad (3.3)$$

3.8.4 พล็อตกราฟระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ ความชันที่ได้คือ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือค่าคงที่ของอาเรเนเนียส (A) เป็นไปตามสมการที่ 3.4

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

$$\ln(k) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(A) \quad (3.4)$$



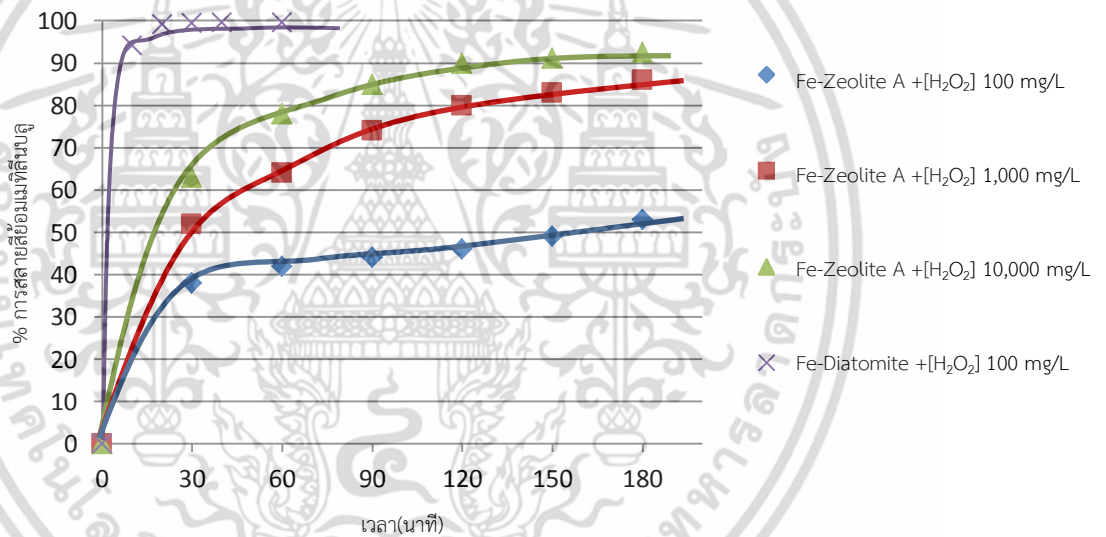
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอกับเหล็กไดอะตอมไมต์ต่อการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7 ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอและเหล็กไดอะตอมไมต์แสดงผลดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 5.7

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เหล็กไดอะตอมไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 95% ภายในเวลา 10 นาที ในขณะที่เมื่อใช้เหล็กซีโอไลต์เอเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะเดียวกันนั้นสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 53% โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 180 นาทีและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ถึง 93% ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์เอมีพื้นที่ผิวมากและมีรูพรุนขนาดเล็ก(4.2 อังสตรอม) [21] จึงทำให้โมเลกุลของไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH⁻) ที่เข้าไปในโครงสร้างเกิดแรงอันตรกิริยากับผนังของโครงสร้างซีโอไลต์เอส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ต้องทำ

ปฏิกิริยากับโมเลกุลสีย้อมลดลง ความสามารถในการสลายสีย้อมจึงลดลงด้วยเช่นกัน [22] ทำให้ต้อง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

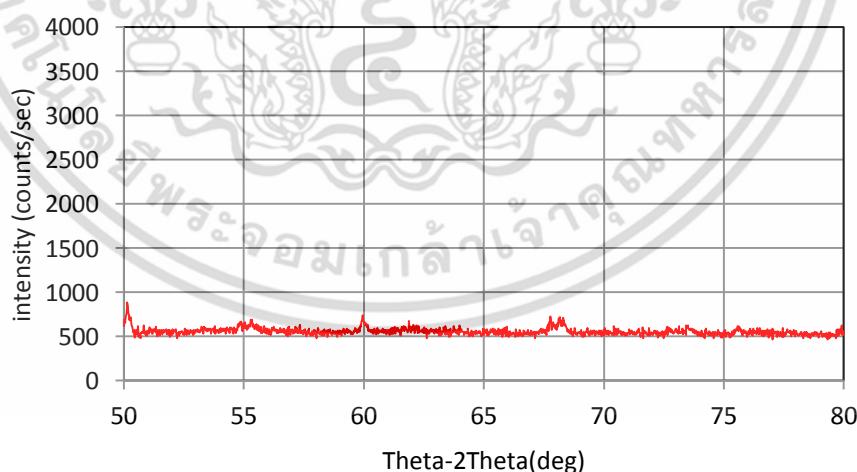
ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นปริมาณมากในการทำปฏิกิริยาและเนื่องจากเมทิลีนบลูมีขนาดกว้าง \times ยาว \times สูงเท่ากับ $4 \times 7.93 \times 16.34$ อังสตรอม [23] ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของซีโอไลต์เอทำให้เมทิลีนบลูไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนของซีโอไลต์เอได้ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 129 อังสตรอมทำให้เมทิลีนบลูสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ จากผลการทดลองข้างต้นประสิทธิภาพในการสลายสีของเมทิลีนบลูของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซีโอไลต์เอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ในการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีของเมทิลีนบลู

4.2 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิค

วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction technique: XRD)

จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (Dry Impregnation) โดยหยดสารละลาย 0.69 โมลาร์ของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาตร 28 มิลลิลิตรลงบนไดอะตอมไมต์ปริมาณ 20 กรัมแล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้มอ่อน เมื่อตรวจโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.2 พบว่าโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากอะตอมในไดอะตอมไมต์มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน



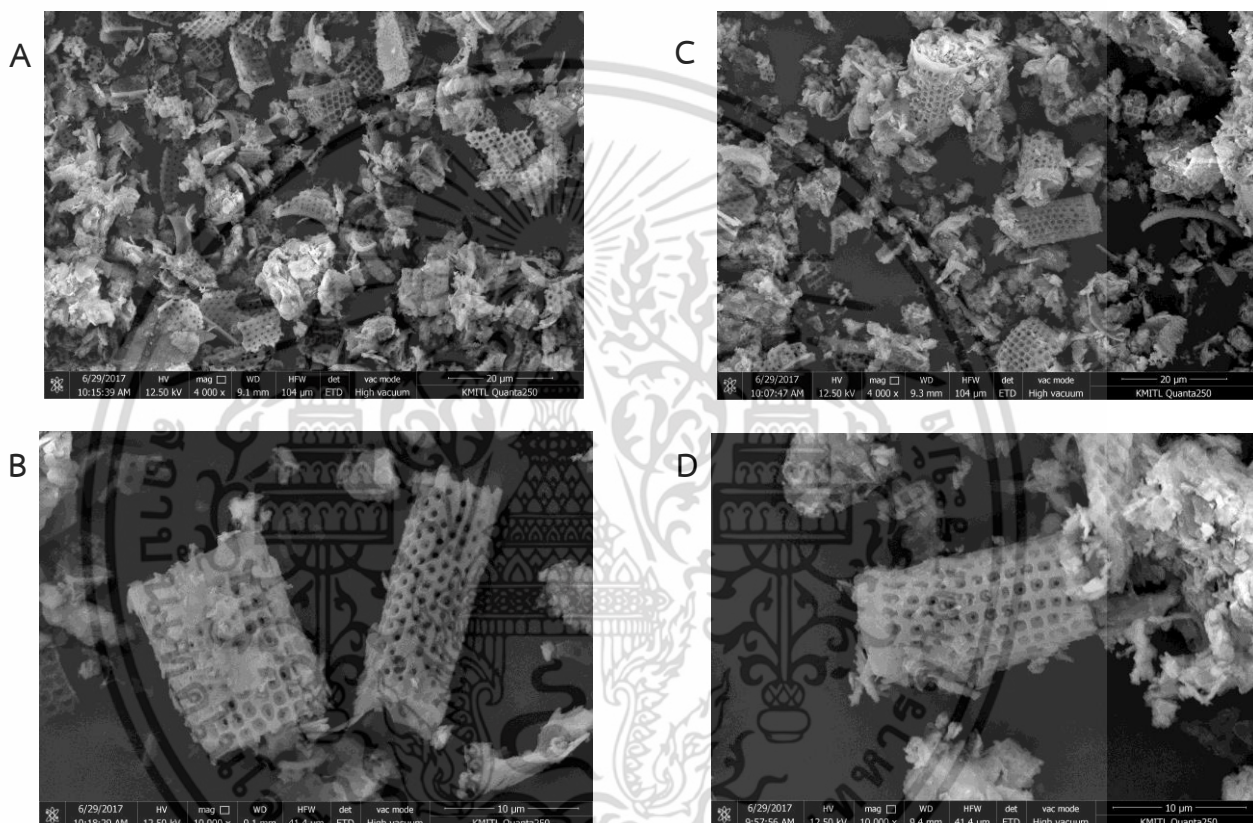
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการวิเคราะห์สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของไดอะตอมไมต์ก่อนและหลังเติมเหล็กพบว่า การเติมเหล็กลงบนไดอะตอมไมต์ไม่ทำให้โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไป โดยที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าไดอะตอมไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีลักษณะคล้ายตาข่ายทรงกระบอกหลากหลายขนาดและมีรูพรุนขนาดใหญ่แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัณฐานและลักษณะพื้นผิวของ (A) ไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า (B) ไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (C) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า และ (D) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.2.3 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการ

วิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF)

วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอ็กซ์ (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์คือออกซิเจนและซิลิกอนซึ่งมีปริมาณถึง 50.4%wt/wt และ 31.1%wt/wt ตามลำดับ ปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 5.8% wt/wt หรือคิดเป็น 57.8 มิลลิกรัมเหล็กต่อ 1 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

ตารางที่ 4.1 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

4.2.4 การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET)

วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน (BET) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 20.38 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนเท่ากับ 0.071 มิลลิลิตรต่อกรัมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 12.9 nm ซึ่งจัดเป็นวัสดุแบบมีโซพอร์ (Mesoporous) คือวัสดุที่มีขนาดของรูพรุน 2-50 นาโนเมตร[24] นอกจากนี้ขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ยังมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลเมทิลีนบลู

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มี นัยสำคัญ

4.3.1 การออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเพนตันโดย Abdelhadi Abaamrane และคณะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเพนตันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเหล็ก และ pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ดังนั้นจึงใช้การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลู โดยตารางที่ 4.3 แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง จากการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและตารางที่ 4.4 แสดงลำดับการทดลองและประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ได้จากการทดลองโดยทำการทดลองทั้งหมด 31 การทดลอง

ตารางที่ 4.3 ระดับของปัจจัยจากการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

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

ตารางที่ 4.4 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) การออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตและประสิทธิภาพการ

สลายสี่อ้อม

Std. Order	Run Order	ปัจจัย				%Eff
		X1	X2	X3	X4	
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
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

ตารางที่ 4.5 แสดงผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SEcoef) สำหรับแบบจำลองการถดถอยใน Coded units ระหว่างค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อมกับตัวแปรแต่ละตัว

ตารางที่ 4.5 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

ในการออกแบบการทดลองตั้งสมมติฐานหลักว่าตัวแปรทั้งสี่ตัวแปรไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลินบลู (ไม่มีนัยสำคัญ: H_0) การวิเคราะห์ตัวแปรว่าเป็นไปตามสมมติฐานหรือไม่จะพิจารณาจากค่า P-Value โดยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า α (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

$$\begin{aligned} \%Eff = & 69.67 + 10.597X1 + 2.402X2 - 8.031X3 + 1.651X4 - 2.623(X1)^2 \\ & - 1.481(X4)^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

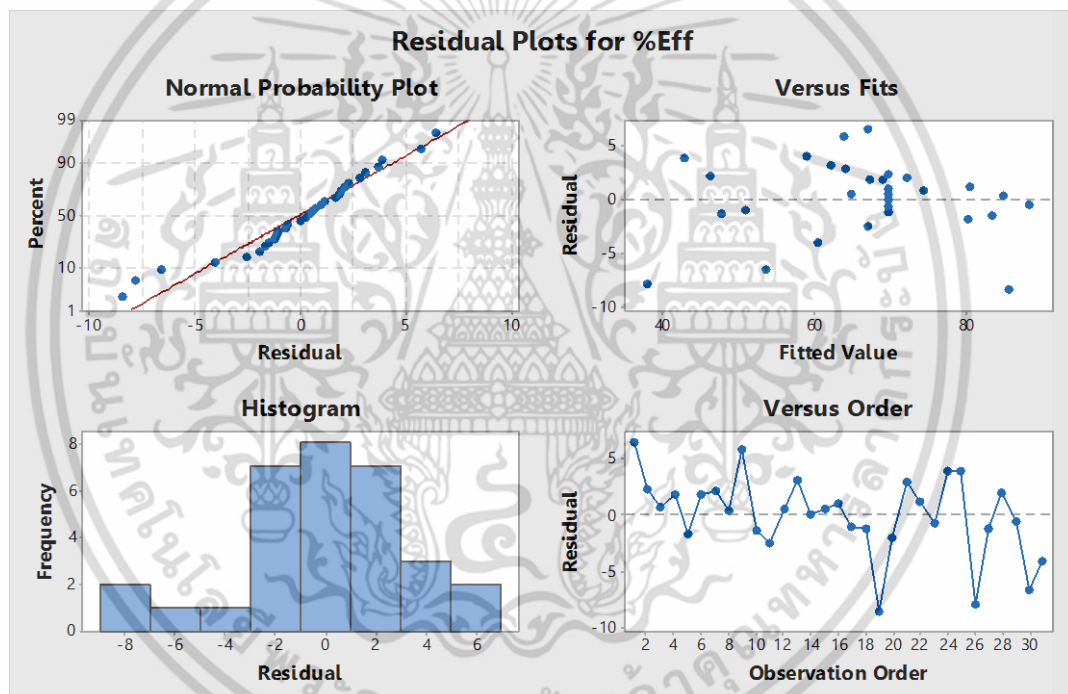
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรในสมการพบว่าสัมประสิทธิ์หน้า X_1 เท่ากับ +10.597 หมายความว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสลายสี ย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสีย้อมในระบบมีเพิ่ม มากขึ้น สัมประสิทธิ์หน้า X_2 เท่ากับ +2.402 หมายความว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะตอมไมต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก เหล็กทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลดัง สมการที่ 4.2 ขณะที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรหน้า X_3 มีค่าเท่ากับ -8.031 หมายความว่าเมื่อ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณแสงยูวีที่ส่องผ่านไปกระตุ้นให้ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์แตกตัวลดลง ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลจึงเกิดขึ้นช้าลง [25] สัมประสิทธิ์หน้า X_1^2 มีค่า เท่ากับ -2.632 หมายความว่าเมื่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไปจะส่งผลให้ไฮ ดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นรวมตัวกันเองกลายเป็นน้ำดังสมการที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการสลายสี ย้อมเมทิลีนบลูจึงลดลง [26] และสัมประสิทธิ์หน้า X_4^2 มีค่าเท่ากับ -1.481 หมายความว่าที่ pH สูงๆ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีความเสถียรขึ้นส่งผลให้แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ น้อยลงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงด้วยเช่นกัน [27] ความเหมาะสม ของแบบจำลองลดรูปสำหรับค่า %Efficiency พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R^2) ของ แบบจำลองมีค่าเท่ากับ 92.9%



4.3.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจากกราฟ Residual plot ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface) แสดงดังรูปที่ 4.4 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

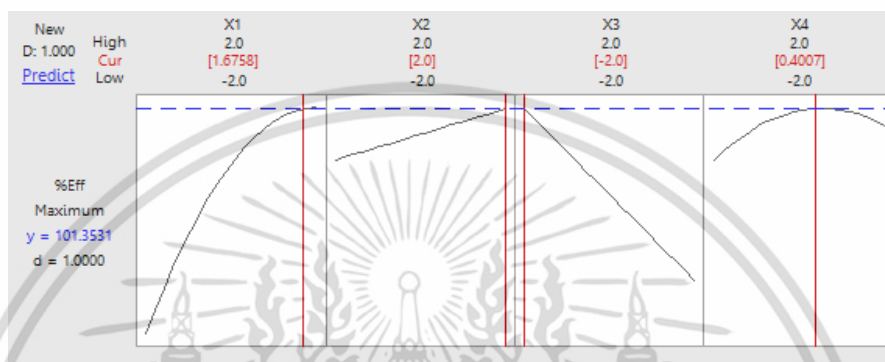


รูปที่ 4.4 Residual plots จากการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 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 4.5 ที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายสีได้ 100%



รูปที่ 4.5 Optimization Plot ของการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab

ทดลองซ้ำที่ภาวะที่เหมาะสมข้างต้นเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากแบบจำลอง แสดงผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าภาวะที่เหมาะสมสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้เฉลี่ย 99.2% เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.8% ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่ภาวะที่เหมาะสม

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

วัดปริมาณเหล็กในสารละลายหลังจากทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมด์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.8 ทั้ง 5 ครั้งด้วยเครื่อง AAS ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะที่เหมาะสม

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

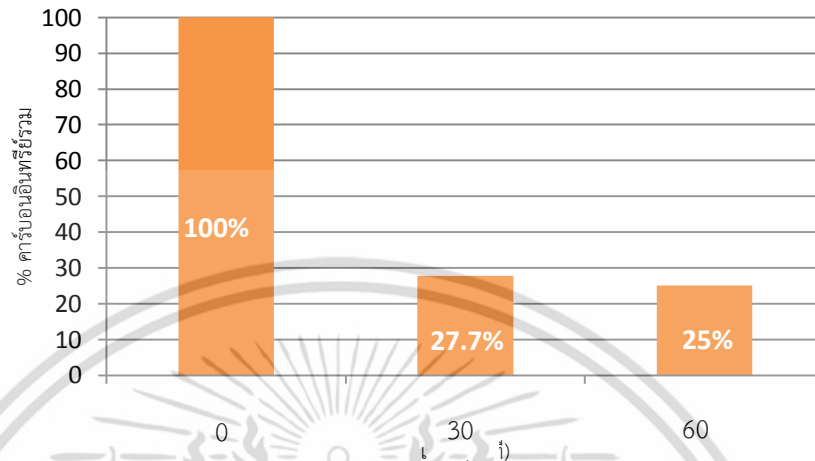
พบว่าหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันเหล็กบางส่วนละลายหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาป้อนอยู่ในสารละลายความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 19.6% ของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมด์ เหล็กที่หลุดจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาโฟโตเพนตันแบบเอกพันธ์ ซึ่งไอออนของเหล็กในสารละลายทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เร็วกว่าไอออนของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งไดอะทอมไมด์ [28]

4.5 การกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon : TOC)

วิเคราะห์หาค่าคาร์บอนอินทรีย์รวมด้วยเครื่อง TOC ของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมด์ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 200 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.8 เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 และ 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าสารละลายสีย้อมก่อนทำปฏิกิริยามีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 100% หลังทำปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ 30 นาทีแรกมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 27.7% และที่ 60 นาทีมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 25.0% ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมที่เวลา 30 และ 60 นาทีเท่ากับ 72.3% และ 75.0% ตามลำดับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมที่ 30 นาทีและ 60 นาที พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อปฏิกิริยาโฟโตเพนตันดำเนินไปจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาคงที่แล้วที่ 30 นาที เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาต่อไปจนถึง 60 นาทีจึงไม่มีผลต่อการสลายคาร์บอนอินทรีย์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมด์ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีคุณสมบัติคือสามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [29]

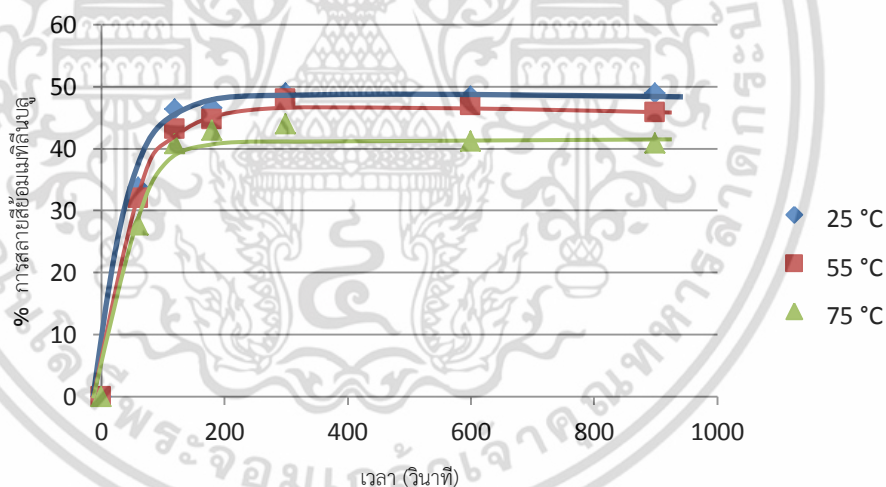


รูปที่ 4.6 เปอร์เซนต์คาร์บอนอินทรีย์รวมในสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมที่เวลา 0, 30 และ 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

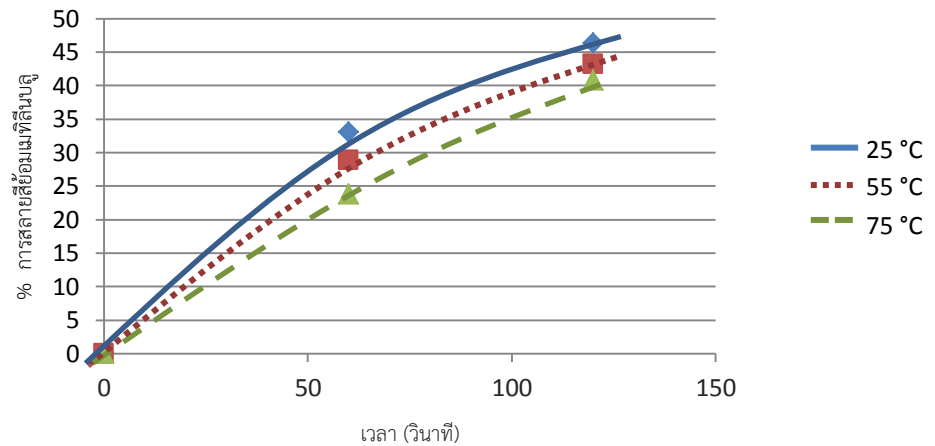
4.6 จลนพลศาสตร์

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเพนตันที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัม/ลิตร pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายเป็น 25 55 และ 75 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลง โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 49% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียสสามารถสลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ 45% และ 40% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ จึงทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ได้จากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง ทั้งนี้ในการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาเพนตันมักจะใช้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียสเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้ที่สุดและไม่ก่อให้เกิดการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [30]



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการสลายสีของเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร เหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร, pH 5.8 และความเข้มข้นสารละลายสีของเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 0-120 วินาที

จากงานวิจัยของ Dao Sy Duc พบว่าในช่วงแรกของปฏิกิริยาเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอย่างรวดเร็วและความเข้มข้นคงที่และปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าคงที่ ทำให้ลดรูปสมการที่ 4.4 ลงเป็นสมการที่ 4.5 และจากกราฟที่ 4.7 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการสลายสีของเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นตรงในช่วงแรกของปฏิกิริยา (0-120 วินาที) เมื่อขยายกราฟเป็นรูปที่ 4.8 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)

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

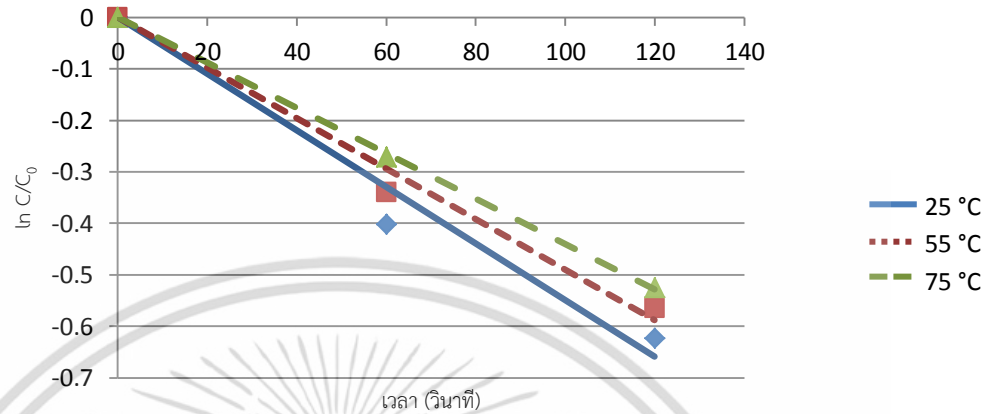
$$\frac{dC}{dt} = -k C_{MB}^m \quad (4.5)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่อัตราลดลงเนื่องจากปริมาณไฮดรอกซิลเรติคัลที่ลดลงอย่าง
ที่กล่าวไปข้างต้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าช้าลงโดยแสดงผลดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C/C_0)$ กับ เวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเพนตันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

T (°C)	k (s ⁻¹)	R ²
25	0.0055	0.95
55	0.0051	0.98
75	0.0046	0.98

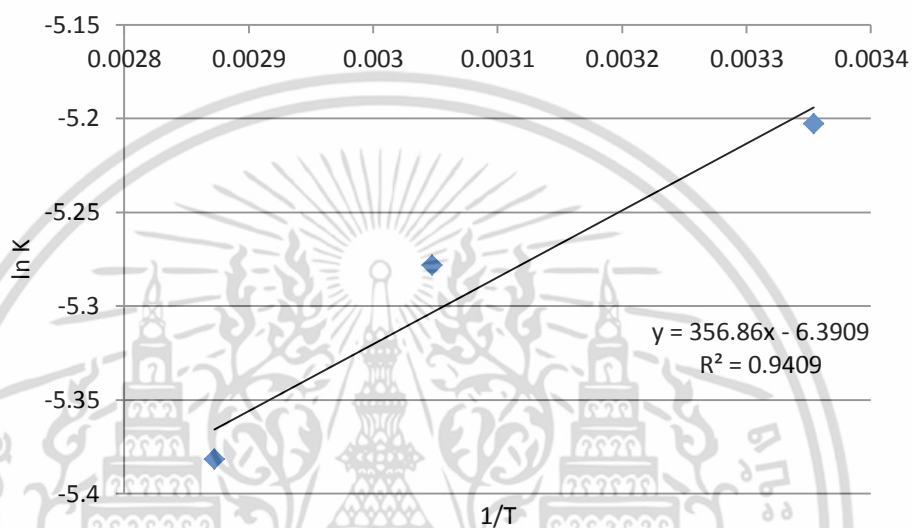
ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) สามารถทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$
เป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.8 และ 4.9 แสดงได้ดังรูปที่ 4.10

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กไดอะทอมไมต์ที่เตรียมได้จากวิธีเอ็บซุ่ม วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีรูปร่างผลึกแบบออสันฐาน 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 ออกแบบการทดลองด้วยวิธีเช่นทรีลคอมโพสิตเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมโดยปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนต้น 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 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบเช่นทรีลคอมโพสิตเหมาะสมกับการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตเฟนต้น วิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาหลังทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนต้นที่ภาวะที่เหมาะสม พบว่าเหล็กหลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา 11.3 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งคิดเป็น 19.6% ของเหล็กที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ไดอะทอมไมต์ วิเคราะห์ค่าคาร์บอนอินทรีย์รวมของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมข้างต้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวมเท่ากับ 72.3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายสี้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตรและ pH 5.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 55 และ 75 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการสลายสี้อมเมทิลีนบลูลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เร่งให้แตกตัวเป็นออกซิเจนและน้ำ โดยปฏิกิริยาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันพบว่ามีความเท่ากับ -2.97 kJ/mol โดยความหมายทางคณิตศาสตร์คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปเร่งให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ ส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ใช้ในการสลายโมเลกุลสี้อมลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. วิเคราะห์ตำแหน่งที่เหล็กไปเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะตอมไมต์
2. ศึกษาวิธีเติมเหล็กหรือชนิดของเหล็กที่ไหลลดลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดอะตอมไมต์แบบใหม่เพื่อลดปริมาณของเหล็กที่หลุดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงสมการถดถอยค่าคงที่อัตรา และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่เหมาะสมมากขึ้นสำหรับปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันแบบวิธีพินธุ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bae, S., Kim, D., and Lee, W., “Degradation of diclofenac by pyrite catalyzed Fenton oxidation” *Environ.* Vol. 134-135. 2013. pp. 93–102.
- [2] 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.* Vol. 39. 2016. pp. 97–109.
- [3] Rui Shan., Che Zhao., Haoran Yuan., Shuxiao Wang., and Yazhuo Wang “Transesterification of vegetable oil using stable natural diatomite-supported catalyst” *Energy Conversion and Management.* Vol. 138. 2017. pp. 547-555
- [4] จีรวรรณ พิจารย์. วาสนา พันชน. มิกิ กัณณะ. สรวุฒิ สมนาม. สัมพันธ์ วงศ์นาวา. “การพอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.* ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม 2558, หน้า 174-185
- [5] ณัชชารีย์ ธนกรจิตพิพัฒน์ และกรรณิการ์ ดิขวงศ์. 2555. หน้า 839-846 “การบำบัดน้ำเสียโรงอาหารโดยกระบวนการเฟนตัน” *การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9.* นครปฐม : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- [6] สุขนัม แก้วมาตย์. บุญสร้าง ดิเรกสถาพร. 2555 “การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์” *การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50.* กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] ณัฐฉิณี ศุภเมธานนท์. “การใช้เศษเครื่องปั้นดินเผาชนิดไม่เคลือบจากตำบลด่านเกวียนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสีย” *คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 2556*
- [8] เชิดศักดิ์ อรรถอรุณ. “การสำรวจและวิจัยคุณภาพของดินเบาลำปางเพื่อใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม” *รายงานวิชาการกองเศรษฐศาสตร์วิทยา กรมทรัพยากรธรณี, ฉบับที่ กศ 7, 2544, หน้า 1-2*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [9] กฤษฎาพร สีโต “โฟโตเพนตันและ TiO_2 – โฟโตคะตะไลติกเดกราดเดชันของสีรีแอดทีฟเรด 141” คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546
- [10] Abrahart, E.N. “Dyes and their Intermediates” Pergamon Press Ltd., 1968 , pp. 77-78.
- [11] ชำนาญ ราษฎร์. “การศึกษาสมบัติทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอินทรีย์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2544
- [12] Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 8th ED. United States: John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [13] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. “การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง” กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 2551.
- [14] Huan Liang., Sen Zhou., Yuting Chen., and Chunjie Yan “Diatomite coated with Fe_2O_3 as an efficient heterogeneous catalyst for degradation of organic pollutant” **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.** Vol 49. 2015. Pp 105-112
- [15] Fei Ji, Chaolin Li, Jiahuan Zhang and Lei Deng “Heterogeneous photo-Fenton decolorization of methylene blue over $LiFe(WO_4)_2$ ” **Journal of Hazardous Materials.** Vol. 186. 2011. pp. 1979-1984
- [16] Yaowen Gao, Yan Wang and Hui Zhang “Removal of Rhodamine B with Fe-supported bentonite as heterogeneous photo-Fenton catalyst under visible irradiation” **Applied Catalysis B: Environmental.** Vol. 178. 2015. pp. 29-36
- [17] Abd Elaziz Sarrai., Salah Hanini., Nachiida Kasbadji Merzouk., Djilali Tassalit., Tibor Szabó., Klára Hernádi., and László Nagy. “Using Central Composite Experimental Design to Optimize the Degradation of Tylosin from Aqueous Solution by Photo-Fenton Reaction” **Materials.** Vol. 9. 2016. pp. 1-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [18] Abdelhadi Abamrane., Samir Qourzal., Saïd Mançour Billah., Ali Assabbane., and Yhya Ait-Ichou. “Modeling Experimental Design for Photo-Fenton Degradation of Methomyl” **Open Journal of Applied Sciences**, Vol.2. 2012. pp. 216-223
- [19] Dao Sy Duc. “Degradation of Reactive Blue 181 Dye by Heterogeneous Fenton Technique Using Modified Fly Ash” **Asian Journal of Chemistry**. Vol.25. 2013. pp. 4083-4086
- [20] Xiaoliang Liang., Yuanhong Zhong., Hongping He., Peng Yuan., Jianxi Zhu., Sanyuan Zhu., and Zheng Jiang. “ The application of chromium substituted magnetite as heterogeneous Fenton catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes” **Chemical Engineering Journal**. Vol.191. 2012. pp. 177-184
- [21] ณีรณช วรรณเชิดชู. เอกชัย จารุपालี. สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์ “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอโดยใช้ดินดำสุราษฎร์เป็นแหล่งของซิลิกาและอลูมินาและใช้การเติบโตของผลึกแบบทุติยภูมิ” **วารสารรวมคำแห่ง(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**. ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม 2556, หน้า 1-17
- [22] ดร.อดิศักดิ์ ไสยสุข “วัสดุมีรูพรุนแบบลำดับชั้น: ความสำคัญและประโยชน์” **ข่าวสารคณะวิทยาศาสตร์ มช.** ปีที่ 20, กรกฎาคม 2557, หน้า 5-7
- [23] 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 Lénin 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
- [24] IUPAC “Manual on Catalyst Characterization” **Pure &Apply. Chem.** Vol. 63. 1991. pp. 1227-1246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] ชลดา อีรการณวงศ์ “ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไททาเนียมไดออกไซด์” *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, มกราคม 2554, หน้า 62-73
- [30] 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
- [31] 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

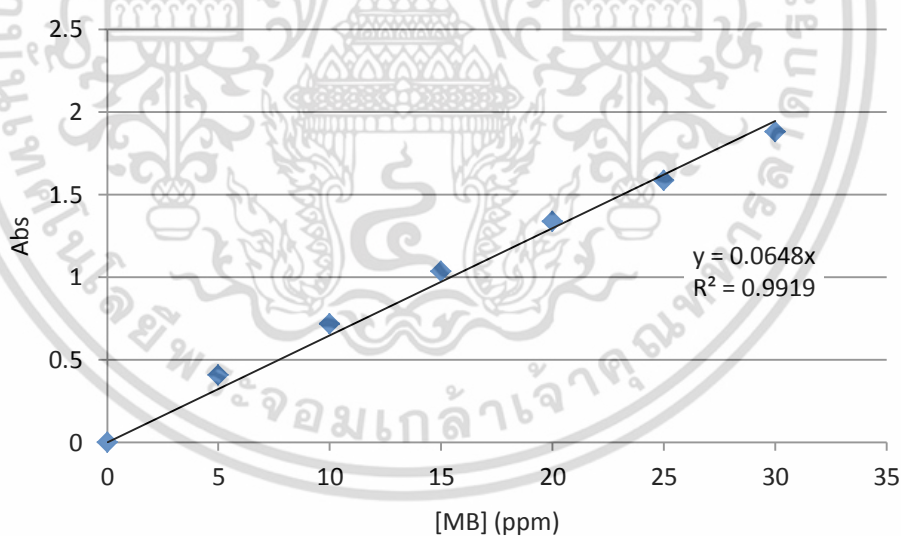
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน เมทิลีนบลู (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
5	0.405
10	0.715
15	1.033
20	1.335
25	1.586
30	1.879



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 เปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์กับเหล็กซีโอไลต์เอทีความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเหล็ก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5.7

time (min)	Fe-zeolite A with [H ₂ O ₂] 100 ppm		Fe-zeolite A with [H ₂ O ₂] 1,000 ppm		Fe-zeolite A with [H ₂ O ₂] 10,000 ppm		เหล็กไดอะทอมไมต์ with [H ₂ O ₂] 100 ppm	
	Abs	%Eff.	Abs	%Eff.	Abs	%Eff.	Abs	%Eff.
0	0.833	0	0.785	0	0.792	0	0.836	0
10	-	-	-	-	-	-	0.049	94.1
20	-	-	-	-	-	-	0.008	99.1
30	0.513	38	0.373	52	0.293	63	0.005	99.4
60	0.487	42	0.279	64	0.172	78	0.004	99.6
90	0.464	44	0.205	74	0.118	85	0.004	99.6
120	0.452	46	0.156	80	0.075	90	-	-
150	0.422	49	0.132	83	0.064	91.2	-	-
180	0.389	53	0.112	86	0.059	92.5	-	-

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูและประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

Std. Order	Run Order	ปัจจัย				Abs*	%Eff
		X1	X2	X3	X4		
11	1	-1	-1	-1	1	0.897	73.47
25	2	0	0	0	0	1.097	71.95
20	3	0	2	0	0	1.070	75.17
14	4	1	-1	1	1	1.283	69.08
10	5	1	-1	-1	1	0.914	81.79
8	6	1	1	1	-1	1.268	70.70
13	7	-1	-1	1	1	1.292	48.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3(ต่อ) ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูและประสิทธิภาพการสลายสี
ย้อมเมทิลีนบลูด้วยการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

Std. Order	Run Order	ปัจจัย				Abs*	%Eff
		X1	X2	X3	X4		
4	8	1	1	-1	-1	0.950	85.24
3	9	-1	1	-1	-1	0.931	69.53
7	10	-1	1	1	-1	1.331	46.23
24	11	0	0	0	2	1.135	64.45
19	12	0	-2	0	0	1.156	65.28
9	13	-1	-1	-1	1	0.900	65.32
27	14	0	0	0	0	1.158	69.68
31	15	0	0	0	0	1.138	70.17
29	16	0	0	0	0	1.162	70.65
15	17	-1	1	1	1	1.230	49.92
26	18	0	0	0	0	1.090	68.49
21	19	0	0	-2	0	0.688	77.23
2	20	1	-1	-1	-1	0.963	78.17
6	21	1	-1	1	-1	1.360	66.88
18	22	2	0	0	0	1.168	81.56
30	23	0	0	0	0	1.146	68.92
5	24	-1	-1	1	-1	1.338	46.63
1	25	-1	-1	-1	-1	1.026	62.84
17	26	-2	0	0	0	1.095	30.10
28	27	0	0	0	0	1.170	68.46
16	28	1	1	1	1	1.342	74.10
12	29	1	1	-1	1	1.075	87.67
22	30	0	0	2	0	1.564	46.96
23	31	0	0	0	-2	1.161	56.34

หมายเหตุ: * หมายถึงค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เจือจาง 25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

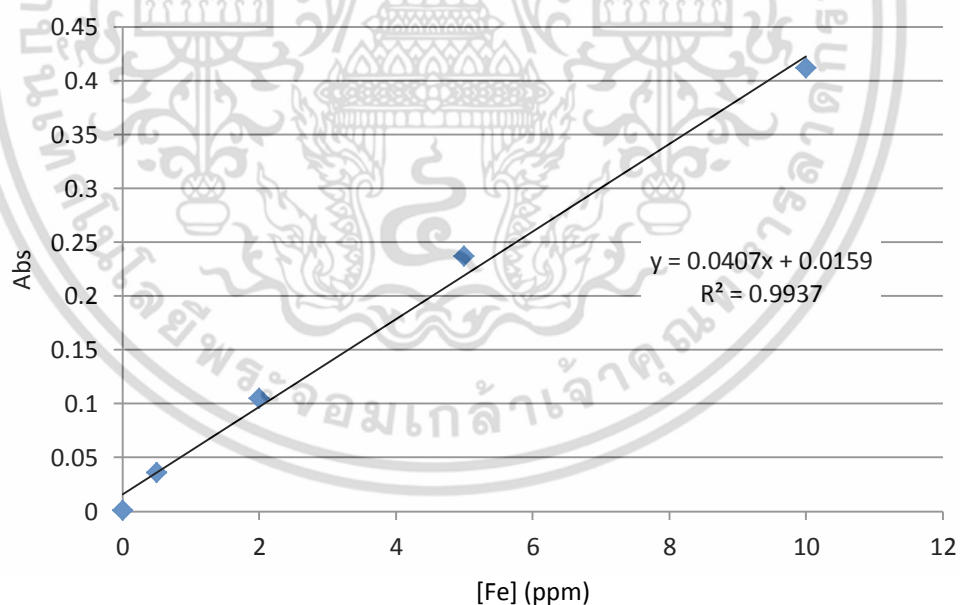
ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีส้มเมทิลีนบลู และประสิทธิภาพการสลายสีส้มที่
ภาวะที่เหมาะสม

Run No.	1	2	3	4	5
Abs*	0.813	0.805	0.810	0.801	0.807
%Eff.	99.2	99.1	99.2	99.2	99.3

หมายเหตุ: * หมายถึงค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลีนบลูที่เจือจาง 20 เท่า

ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ

Fe Conc.(ppm)	Abs
0	0.001
0.5	0.036
2	0.105
5	0.237
10	0.412



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็กหลังการเกิดปฏิกิริยาในการละลายสีย้อมที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุด

Run No.	1	2	3	4	5
Abs	0.105	0.107	0.109	0.116	0.105
Fe Conc.	10.9	11.2	11.4	12.3	10.9

ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์รวม

No.	Sample	Result
1*	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา 30 นาที	TOC 5.496 mg/L
2*	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา 30 นาที	TOC 5.567 mg/L
3*	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา 60 นาที	TOC 5.463 mg/L
4*	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา 60 นาที	TOC 5.344 mg/L
5**	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนเกิดปฏิกิริยา	TOC 4.327 mg/L
6**	สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูก่อนเกิดปฏิกิริยา	TOC 4.312 mg/L

หมายเหตุ: * หมายถึง เจือจางสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 5 เท่า

** หมายถึง เจือจางสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 20 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 116 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไดอะทอมไมต์ 1 กรัมต่อลิตร pH 5.8

T= 25°C	time	0	60	120	180	300	600	900
	abs	1.493	0.999	0.801	0.798	0.763	0.77	0.763
	conc ppm	576	385	309	308	294	297	294
	%Eff	0	33.09	46.35	46.55	48.89	48.43	48.89
	C/C ₀	1	0.67	0.54	0.53	0.51	0.52	0.51
	lnC/C ₀	0	-0.40	-0.62	-0.63	-0.67	-0.66	-0.67
T= 55°C	abs	1.555	1.107	0.884	0.86	0.808	0.825	0.842
	conc ppm	600	427	341	332	312	318	325
	%Eff	0	28.81	43.15	44.69	48.04	46.95	45.85
	C/C ₀	1	0.71	0.57	0.55	0.52	0.53	0.54
	lnC/C ₀	0	-0.34	-0.56	-0.59	-0.65	-0.63	-0.61
T= 75°C	abs	1.538	1.172	0.91	0.878	0.862	0.905	0.909
	conc ppm	593	452	351	339	333	349	351
	%Eff	0	23.80	40.83	42.91	43.95	41.16	40.90
	C/C ₀	1	0.76	0.59	0.57	0.56	0.59	0.59
	lnC/C ₀	0	-0.27	-0.52	-0.56	-0.58	-0.53	-0.53

ตารางที่ ก.9 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่อุณหภูมิ 25, 55 และ 75 องศาเซลเซียส

T (°C)	T (K)	k (S ⁻¹)	R ²	1/T	ln k
25	298.15	0.0055	0.95	0.003354	-5.20301
55	328.15	0.0051	0.95	0.003047	-5.27851
75	348.15	0.0046	0.98	0.002872	-5.3817

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

ข.1 การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายซี้อย้อมเมทิลีนบลู

การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายซี้อย้อมเมทิลีนบลูได้จากกราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่

ก.1 จากสมการเส้นตรงคือ

$$y = 0.0648X$$

เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อลิตร)

y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ข.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพการสลายซี้อย้อมเมทิลีนบลู

การคำนวณหาประสิทธิภาพการสลายซี้อย้อมเมทิลีนบลูหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ข.3 การคำนวณหาความเข้มข้นเหล็กในสารละลาย

การคำนวณหาความเข้มข้นเหล็กในสารละลายได้จากกราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก.2 จากสมการเส้นตรงคือ

$$y = 0.0407X + 0.0159$$

เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 การคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์(E_a) ของปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

คำนวณได้จากความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ กับ $1/T$ ดังความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

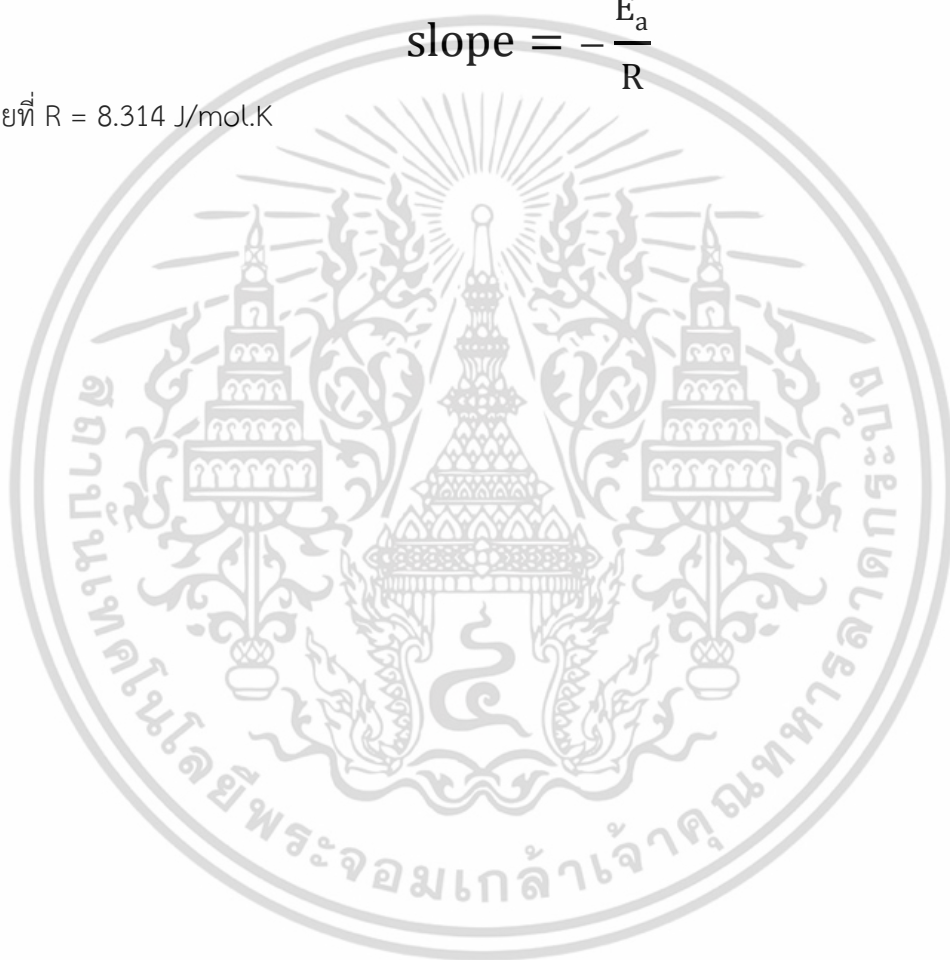
$$\ln(k) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(A)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่อัตรา

T คืออุณหภูมิ(เคลวิน)

$$\text{slope} = -\frac{E_a}{R}$$

โดยที่ $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

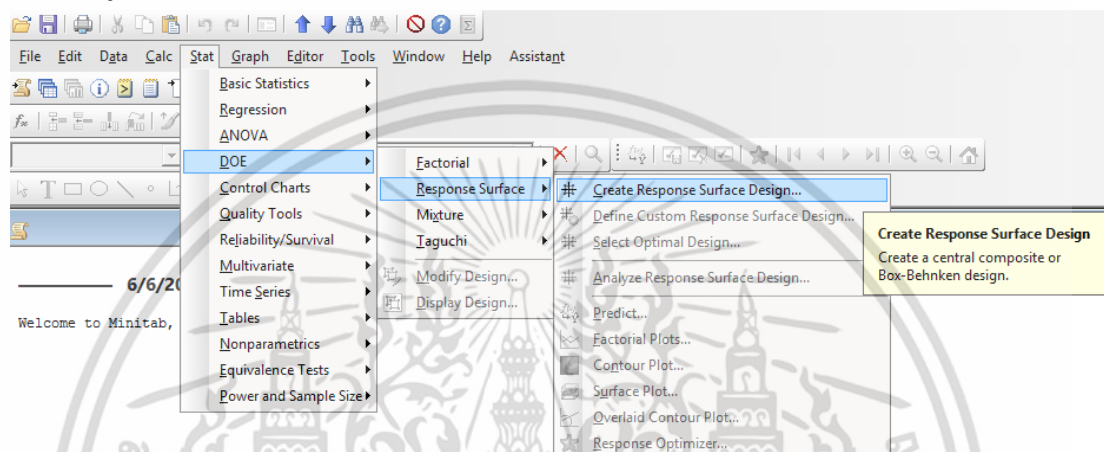
ภาคผนวก ค

การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab

การใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

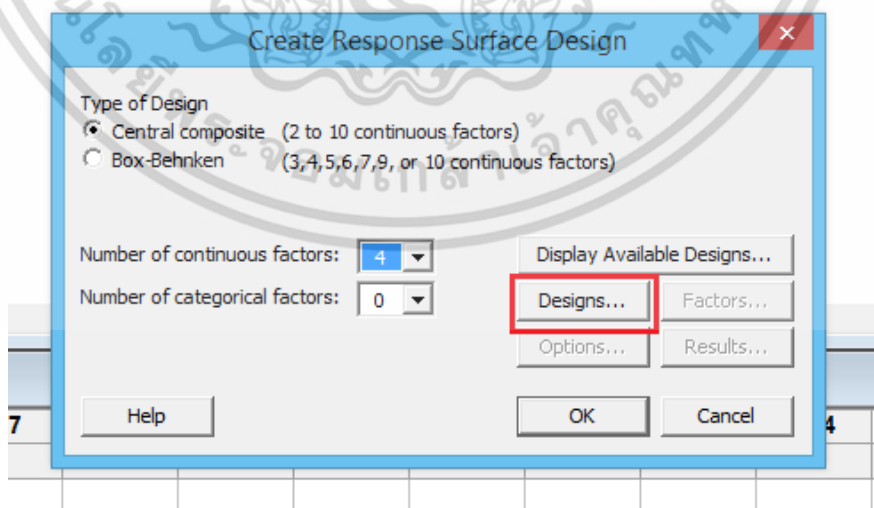
1. เลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design

แสดงดังรูป ค.1



รูปที่ ค.1 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

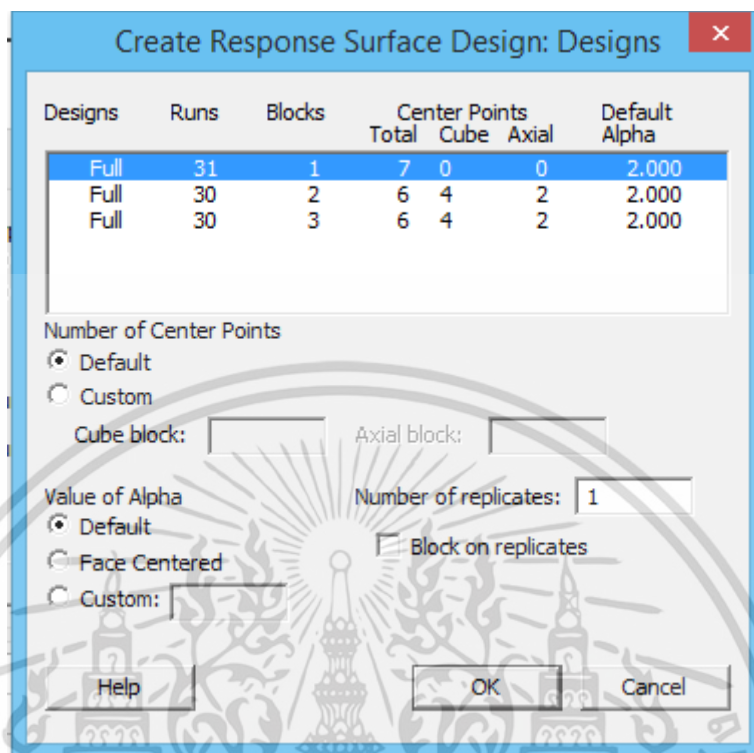
2. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Central composite และใส่ Number of continuous factors = 4 แล้วเลือก Designs แสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 การเลือกการออกแบบการทดลองและจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

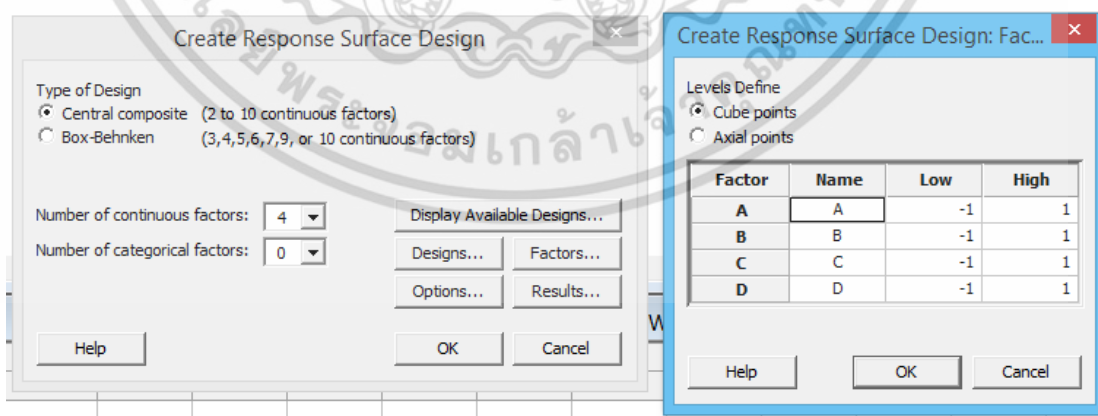
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design: Design เลือก แบบ 31 runs แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.3



รูปที่ ค.3 การเลือกการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

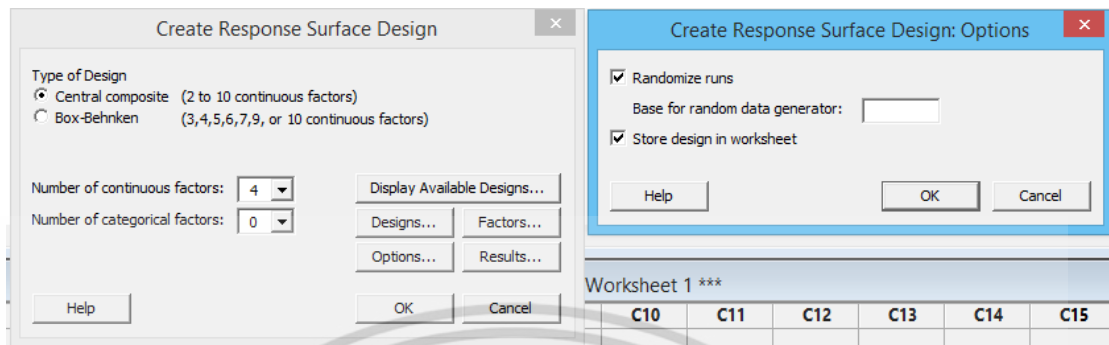
4. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Factors ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design: Factors แล้วพิมพ์ชื่อปัจจัยแล้วกด OK แสดงดังรูป ค.4



รูปที่ ค.4 การกำหนดชื่อปัจจัยที่ใช้ในการทำลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Options ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design: Options เลือก Randomize run แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.5



รูปที่ ค.5 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

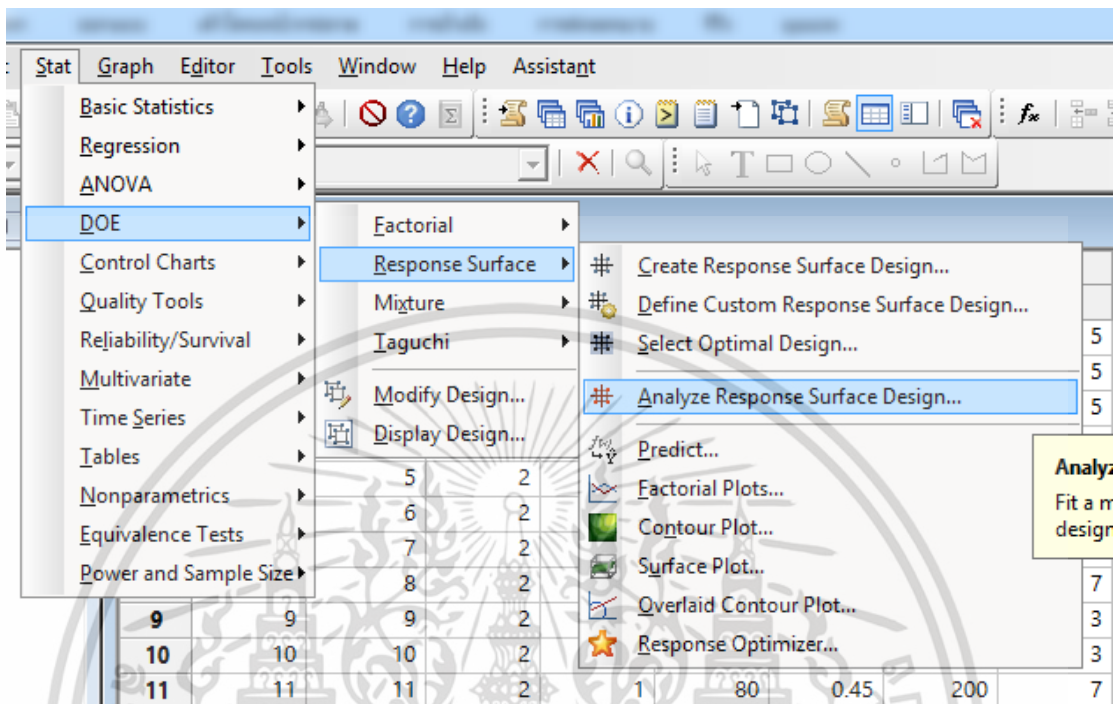
6. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก OK เพื่อสร้างตารางการออกแบบการทดลอง จะได้ตารางการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นดำเนินการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมารอกค่าลงในตาราง แสดงดังรูป ค.6

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	X1	X2	X3	X4	%Eff
1	11	1	1	1	-1	1	-1	1	73.47
2	25	2	0	1	0	0	0	0	71.95
3	20	3	-1	1	0	2	0	0	75.17
4	14	4	1	1	1	-1	1	1	69.08
5	10	5	1	1	1	-1	-1	1	81.79
6	8	6	-1	1	1	1	1	-1	70.70
7	13	7	1	1	-1	-1	-1	1	48.26
8	4	8	1	1	1	1	-1	-1	85.24
9	3	9	1	1	-1	1	-1	-1	69.53
10	7	10	1	1	-1	1	1	-1	46.23
11	24	11	-1	1	0	0	0	2	64.45
12	19	12	-1	1	0	-2	0	0	65.28
13	9	13	1	1	-1	-1	-1	1	65.32
14	27	14	0	1	0	0	0	0	69.68
15	31	15	0	1	0	0	0	0	70.17
16	29	16	0	1	0	0	0	0	70.65
17	15	17	1	1	-1	1	1	1	49.92
18	26	18	0	1	0	0	0	0	68.49
19	21	19	-1	1	0	0	-2	0	77.23
20	2	20	1	1	1	-1	-1	-1	78.17
21	6	21	1	1	1	-1	1	-1	66.88
22	18	22	-1	1	2	0	0	0	81.56
23	30	23	0	1	0	0	0	0	68.92
24	5	24	1	1	-1	-1	1	-1	46.63
25	1	25	1	1	-1	-1	-1	-1	62.84
26	17	26	-1	1	-2	0	0	0	30.10
27	28	27	0	1	0	0	0	0	68.46
28	16	28	1	1	1	1	1	1	74.10
29	12	29	1	1	1	1	-1	1	87.67
30	22	30	-1	1	0	0	0	0	46.96

รูปที่ ค.6 ตารางการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

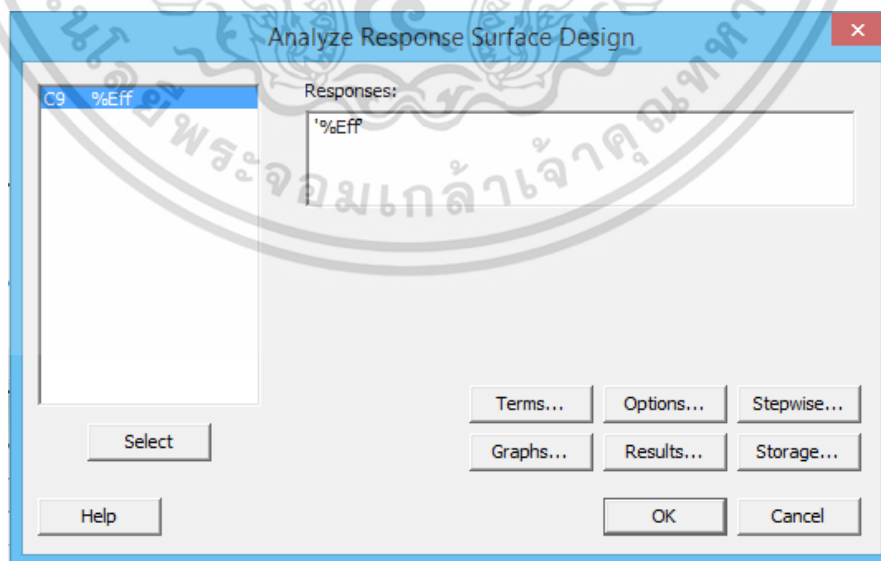
7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface design แสดงดังรูปที่ ค.7



รูปที่ ค.7 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

8. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Responses %Eff แสดงดังรูป

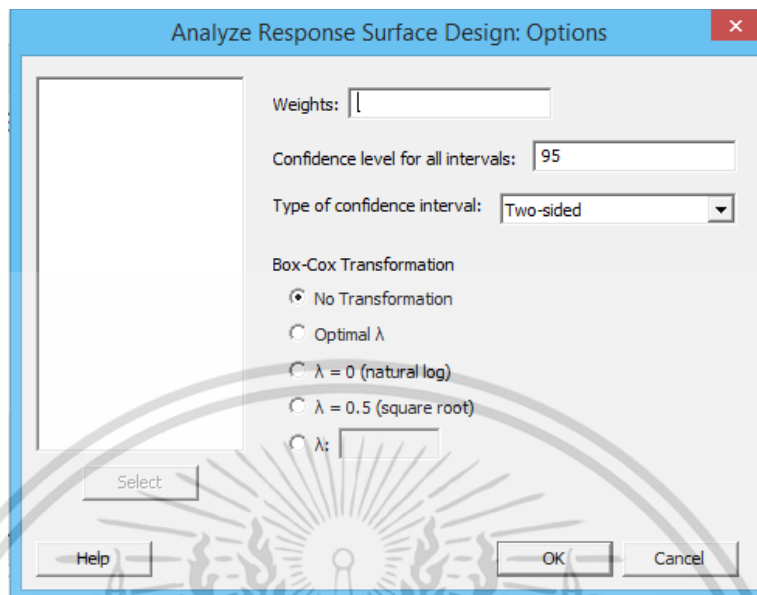
ค.8



รูปที่ ค.8 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล

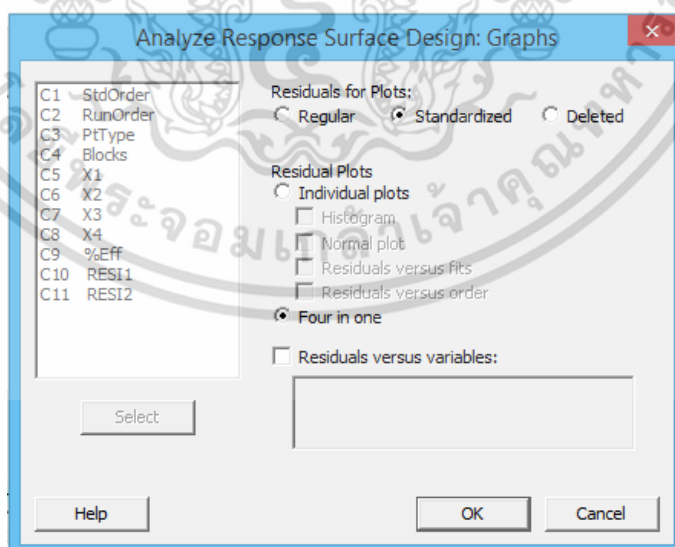
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Options แล้วเลือก Confidence level = 95 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.9



รูปที่ ค.9 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล

10. กลับมาที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Graphs ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design: Graphs สำหรับ Residual Plot เลือก Standardized residuals และ Four in one แล้วกด OK เมื่อกลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก OK แสดงดังรูป ค.10



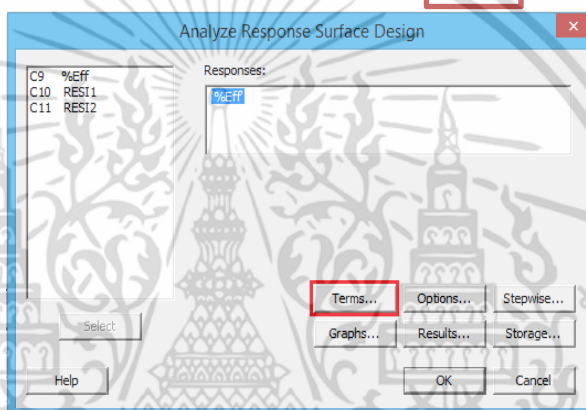
รูปที่ ค.10 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. คัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ (P value > 0.05) ออกโดยไปที่ Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface design แล้วเลือก Terms แสดงดังรูปที่ ค.11

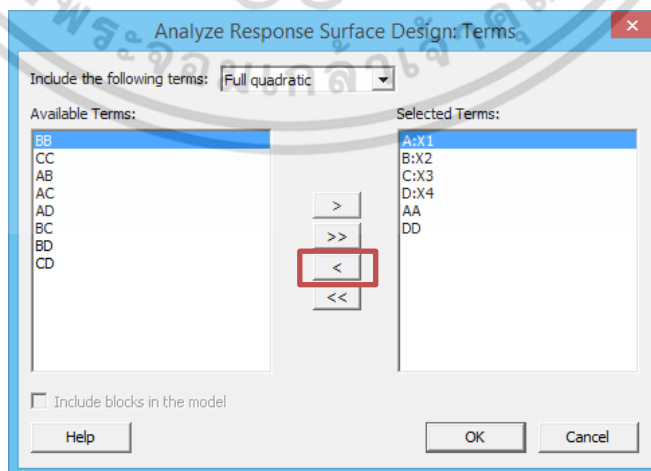
Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		69.76	1.41	49.57	0.000	
X1	21.194	10.597	0.760	13.94	0.000	1.00
X2	4.804	2.402	0.760	3.16	0.006	1.00
X3	-16.062	-8.031	0.760	-10.57	0.000	1.00
X4	3.302	1.651	0.760	2.17	0.045	1.00
X1*X1	-5.264	-2.632	0.696	-3.78	0.002	1.03
X2*X2	1.934	0.967	0.696	1.39	0.184	1.03
X3*X3	-2.130	-1.065	0.696	-1.53	0.146	1.03
X4*X4	-2.981	-1.490	0.696	-2.14	0.048	1.03
X1*X2	0.711	0.355	0.931	0.38	0.708	1.00
X1*X3	3.500	1.750	0.931	1.88	0.078	1.00
X1*X4	-0.011	-0.005	0.931	-0.01	0.996	1.00
X2*X3	-2.213	-1.106	0.931	-1.19	0.252	1.00
X2*X4	0.444	0.222	0.931	0.24	0.815	1.00
X3*X4	-0.195	-0.098	0.931	-0.10	0.918	1.00



รูปที่ ค.11 วิเคราะห์ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

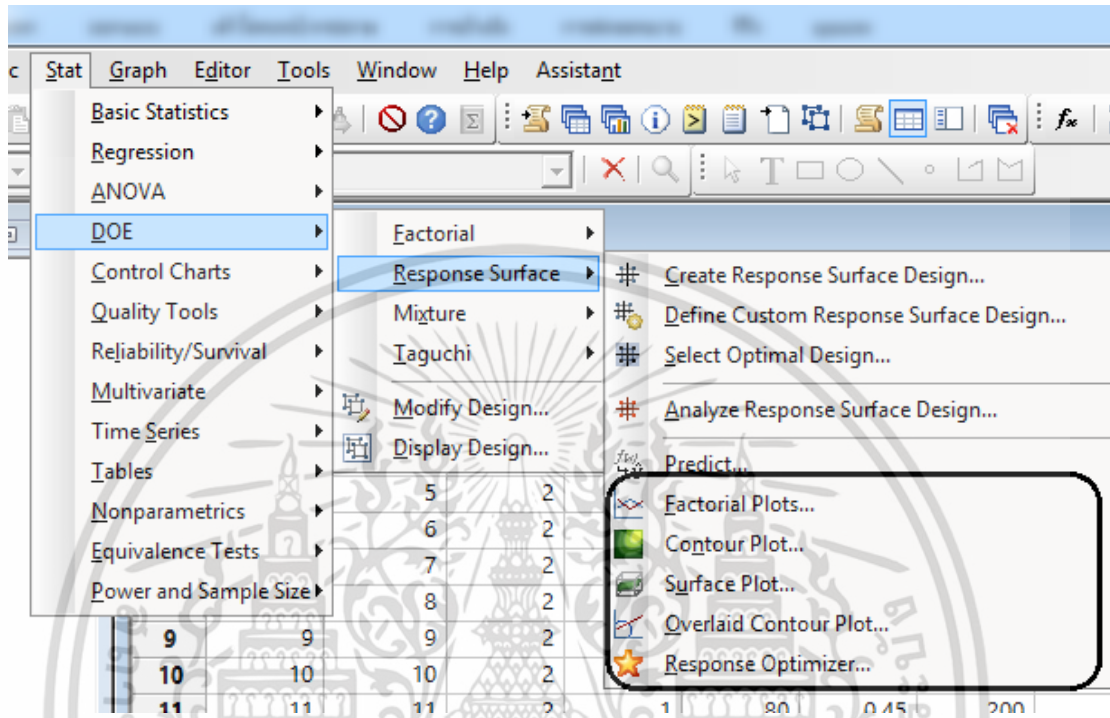
12. เลือกปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกโดยกดลูกศรดังรูปที่ ค.12 เสร็จแล้วจึงกด OK จะกลับมาที่หน้า Analyze Response Surface Design อีกครั้งแล้วกด OK



รูปที่ ค.12 คัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยดูจากกราฟ Surface plot กราฟ Contour plot และ Optimization plot เลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Surface plot/ Contour plot/ Optimization plot (maximized) แสดงดังรูป ค.13



รูปที่ ค.13 การวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวโรชา จำปา
วัน เดือน ปีเกิด	06 ตุลาคม 2535 ที่จังหวัดนนทบุรี
ที่อยู่	113/3 ซอยมณีรัตน์ 4 ตำบลบางชะแยง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
โทร.	0877152719
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2555-2559	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559-2560	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	ปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรี เรื่องการสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย กระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ
ผลงานทางวิชาการระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท	นำเสนองานวิจัยแบบปากเปล่าในหัวข้อ “การสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วย กระบวนการโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เหล็กบนซีโอไลต์เอ” ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TiChE 2016) ณ อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย จังหวัด ปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้