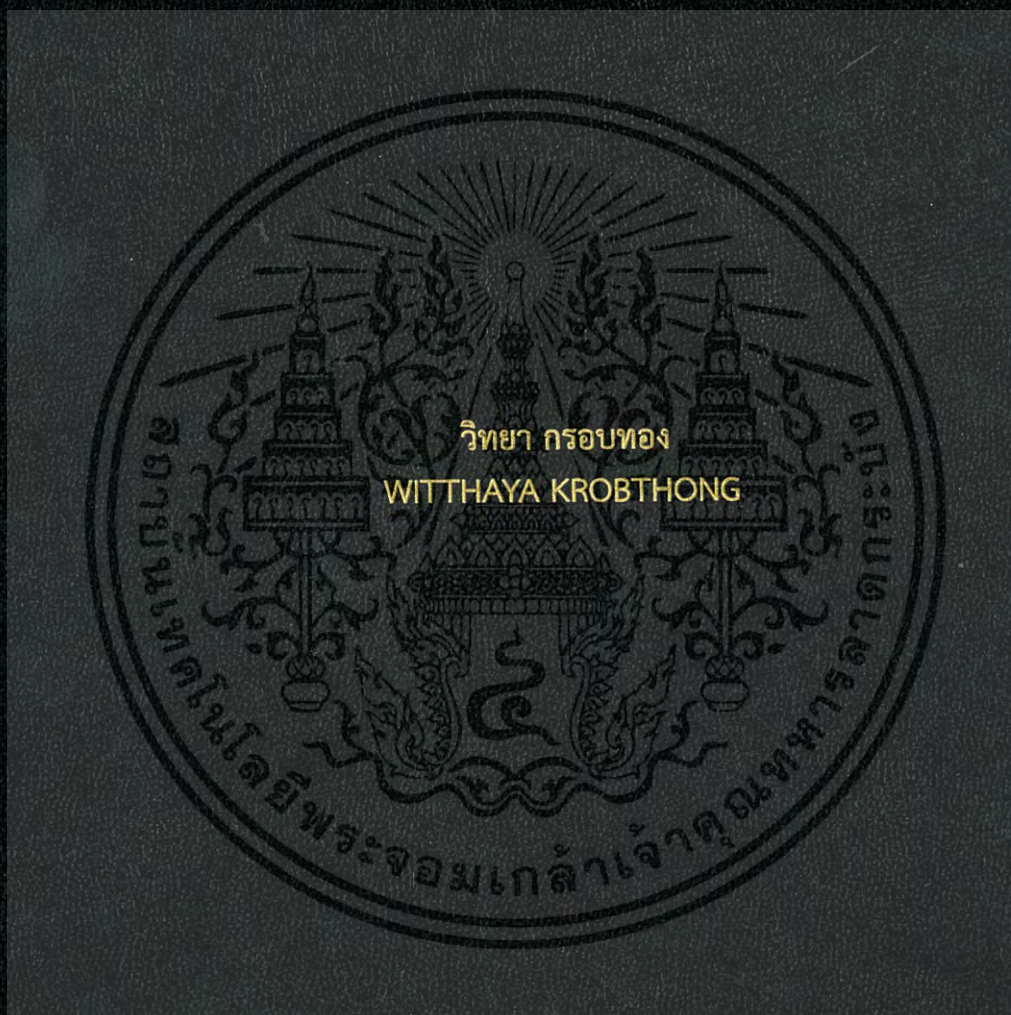


การหาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์บนตัวเร่งปฏิกิริยา
 Fe/TiO_2 ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

OPTIMIZATION OF METHYL ORANGE DEGRADATION ON Fe/TiO_2
CATALYST BY PHOTO-FENTON PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-220-064

การหาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์บนตัวเร่งปฏิกิริยา
 Fe/TiO_2 ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

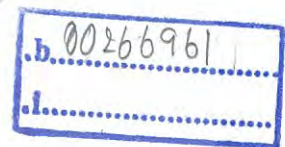
OPTIMIZATION OF METHYL ORANGE DEGRADATION ON Fe/TiO_2
CATALYST BY PHOTO-FENTON PROCESS



T148658

วิทยา กรอบทอง
WITTHAYA KROBTHONG

เลขที่.....
เลขทะเบียน **148658**
วันเดือนปี **14 11 2560**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-220-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMIZATION OF METHYL ORANGE DEGRADATION ON Fe/TiO₂ CATALYST BY PHOTO-FENTON PROCESS

WITTHAYA KROBTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE MASSTER DEGREE
OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-220-064

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 การหาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันด้วยแรงปฏิกิริยา Fe/TiO_2
ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

Thesis Title Optimization of Methly Orange Degradation on Fe/TiO_2 Catlalyst by
Photo-Fenton Process

นักศึกษา นายวิทยา กรอบทอง

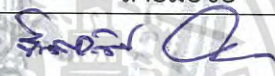
รหัสประจำตัว 57601357

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-220-064

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนวงค์	 จันทวัฒน์ ชัยชนวงค์  อานนท์ นิลจันทร์ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์
ผศ.ดร.วลัยรัตน์	จันทร์อมพร	
ผศ.ดร.ญาณิพร	พัชรพรโชติ	
ผศ.ดร.ธนวรรณ	พิณรัตน์	
ผศ.ดร.พรสวรรค์	อัสวแสงรัตน์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂ ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน
นักศึกษา	นายวิทยา กรอบทอง
รหัสประจำตัว	57601357
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้หาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน โดยเริ่มต้นศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดดังนี้ TiO₂, Fe/TiO₂ และ FeSO₄ ซึ่ง FeSO₄ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา FeSO₄ สามารถสลายสีย้อมได้ถึง 99% และ TiO₂ มีประสิทธิภาพต่ำสุดสามารถสลายสีย้อมได้ 65% ศึกษาผลของการเติมเหล็กบนตัวรองรับ TiO₂ ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %ของน้ำหนักตัวรองรับ พบว่าที่ความเข้มข้นเหล็ก 10 %ของน้ำหนักตัวรองรับมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ศึกษาหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design โดยปัจจัยที่ศึกษามีทั้งหมด 6 ปัจจัยได้แก่ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ (X₁), ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X₂), ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจัน (X₃), ค่าพีเอช (X₄), ความเร็วรอบการปั่นกววน (X₅) และความเข้มแสงยูวี (X₆) จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจัน เรียงตามลำดับความสำคัญ คือ X₂, X₃, X₁, และ X₄ ตามลำดับ ศึกษาหาภาวะของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันได้มากที่สุดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X₁) ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ (X₂) ความเข้มข้นของเมทิลออเรนจัน (X₃) และค่าพีเอช (X₄) พบว่าภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจันได้มากที่สุดที่ได้จากแบบจำลองเป็นไปตามสมการดังนี้ %Efficiency = 38.7 + 0.2666 X₁ + 2.194X₂ - 0.1120X₃ + 1.313X₄ - 0.000475X₁X₁ - 3.181X₂X₂ โดยภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจันได้มากที่สุดสามารถสลายได้ 100% เมื่อใช้ X₁ = 240 ppm X₂ = 530 ppm X₃ = 150 ppm และ X₄ = 3 ตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองโดยการทำการทดลองซ้ำที่ภาวะดังกล่าว 5 การทดลองพบว่า ที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายสีได้ 99.6% วิเคราะห์หาค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 62% และจากการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ 5 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจันลดลงเท่ากับ 99.6% 70.0% 62.9% 55.1% และ 51.7% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Optimization of Methyl Orange Degradation on Fe/TiO ₂ Catalyst by Photo-Fenton Process
Student	Mr. Witthaya Krobthong
Student ID.	57601357
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pronsawan Assawasaengrat

Abstract

The optimization of methyl orange degradation on Fe/TiO₂ catalyst by photo-fenton process was studied using three types of catalysts: TiO₂, Fe/TiO₂ and FeSO₄ which is a homogeneous catalyst. The results showed that Fe/TiO₂ has similar performance as FeSO₄ can degrade methyl orange for 99%, while using TiO₂ as catalyst showed the lowest performance, which degrade the dye for only 65%. In addition, effect of iron addition on TiO₂ support at 5, 10 and 15 percent of substrate weight. The results indicated that Fe/TiO₂ catalyst containing 10% of iron provided the best performance. The crystallinity of catalysts was investigated by X-Ray diffraction (XRD) and Iron content impregnated on catalysts was determined by X-Ray Fluorescence (XRF). The significant effects on degradation of methyl orange were investigated by Fractional factorial design method. The 6 studied factors are concentration of Fe/TiO₂ catalyst(X₁), concentration of H₂O₂(X₂), initial concentration of methyl orange(X₃), pH(X₄), stirring speed(X₅), and UV intensity(X₆). From data analysis results, the significant effects ranking from the ability to degrade methyl orange are: X₂, X₃, X₁ and X₄, respectively. Study of significant effects affecting degradation of methyl orange by Box-Behnken design method. The significant effects are concentration of H₂O₂(X₁), concentration of Fe/TiO₂(X₂), concentration of methyl orange(X₃), and pH(X₄) using model showed that the best condition can fit the following equation: %Efficiency = 38.7 + 0.2666 X₁ + 2.194X₂ - 0.1120X₃ + 1.313X₄ - 0.000475X₁X₁ - 3.181X₂X₂. From the equation, methyl orange can be degraded by 100% when using X₁=240 ppm, X₂=530 ppm, X₃=150 ppm, and X₄=3. The model was verified with 5 repeated experimental trials. The results revealed that the average degradation of methyl orange was 99.6%. Analysis of total organic content (TOC) of solutions from the experiments were conducted. The results shows that 62% TOC removal of solution can be reached. In addition, the efficiency of 5-times-recycled catalyst showed decreased efficiency and the results at each recycle cycle were 99.6%, 70.0%, 62.9%, 55.1% and 51.7% respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและความกรุณาจากคณะอาจารย์และบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

เหล่าคณาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

น้อง พี่ และเพื่อนทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจในระหว่างการทำดำเนินงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และบุคคลในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ จนประสบความสำเร็จทางการศึกษา และสามารถนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วิทยา กรอบทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แหล่งกำเนิดและประเภทของน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดของน้ำเสีย.....	5
2.1.2 ประเภทของสิ่งสกปรกในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรม สิ่งทอ.....	6
2.1.3 กระบวนการฟอกย้อม.....	6
2.2 องค์ประกอบและลักษณะน้ำเสียสีย้อม.....	6
2.2.1 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป.....	6
2.3 สีย้อม.....	7
2.3.1 ประเภทของสีย้อม.....	7
2.3.2 เมทิลออเรนจ์.....	9
2.3.3 การวัดสี.....	9
2.4 วิธีการกำจัดสีย้อม.....	10
2.4.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี.....	10
2.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา.....	10
2.4.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	11
2.4.4 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น.....	11
2.5 ปฏิกริยาโฟโตเฟนตัน.....	12
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 ปฏิกริยาเอกพันธ์.....	13
2.6.2 ปฏิกริยาวิวิธพันธ์.....	13
2.3.3 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	14
2.7 ไททาเนียมไดออกไซด์.....	15
2.7.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂).....	15
2.7.2 การทำให้เกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์.....	17
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านต่างๆ.....	18
2.8 การออกแบบการทดลอง.....	20
2.8.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ.....	20
2.8.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง.....	20
2.8.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง.....	21
2.8.4 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลอง.....	21
2.8.4.1 การวางแผน.....	21
2.8.4.2 การคัดกรอง.....	22
2.8.4.3 การหาค่าที่เหมาะสม.....	22
2.8.4.4 การทวนสอบ.....	22
2.8.5 ประเภทของแบบการทดลอง.....	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีกรดำเนินงานวิจัย	27
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	27
3.2 สารเคมี.....	28
3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	28
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD).....	28
3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF).....	29
3.5 การทดสอบการสลายสีย้อม.....	29
3.5.1 การเตรียมชุดอุปกรณ์ทดลอง.....	29
3.5.2 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลออเรนจ์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3 การทดสอบการการสลายสีย้อม.....	29
3.6 การทดสอบผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อม เมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	30
3.7 การทดสอบผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อม เมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	30
3.8 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.....	30
3.8.1 การคัดกรองปัจจัย.....	30
3.8.2 การหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ.....	32
3.8.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	32
3.8.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลอง.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	35
4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยา โฟโตเพนตัน.....	35
4.2 ผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	36
4.3 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2	37
4.3.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค XRD	37
4.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF	38
4.4 การคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยา โฟโตเพนตัน.....	38
4.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design.....	38
4.4.2 Normal plot of the standardized effects	40
4.4.3 Pareto chart of the effects	40
4.4.4 Main effects plots	41
4.4.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง.....	42
4.5 การหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลาย สีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	42
4.5.1 การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken.....	42
4.5.2 แบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม.....	44
4.5.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.4 สภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน.....	45
4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวม.....	50
4.7 การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	51
4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	68
ประวัติผู้เขียน	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของสีย้อมเมทิลออเรนจ์.....	9
2.2 สรุปวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ.....	24
2.3 ตารางสุรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design.....	30
3.2 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design	31
3.3 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	32
3.4 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Box Benken	33
4.1 ตารางแสดงปริมาณธาตุหลักที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	38
4.2 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design และประสิทธิภาพการสลาย สีย้อมเมทิลออเรนจ์.....	39
4.4 การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken และประสิทธิภาพการสลาย.....	43
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อม.....	44
4.6 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมที่สภาวะที่เหมาะสม.....	49
4.7 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่สภาวะอื่นๆ.....	49

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเมทิลลอเรนจ์.....	9
2.2 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) และการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข)	13
2.3 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูไคต์.....	17
2.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาเทสและรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็นElectron sink (ข) แบบจำลองเกี่ยวกับเฟสรูไทล์.....	18
2.5 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต.....	20
3.1 การเติมเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ด้วยวิธี Dry impregnation	28
4.1 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน	36
4.2 ผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน	37
4.3 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ตัวรองรับ TiO_2 ก่อนเผา, (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 หลังเผา	38
4.4 Normal plot of the standardized effects	40
4.5 Pareto chart of the effects.....	40
4.6 Main effects plots.....	41
4.7 Residual plot	42
4.8 Residual plot	45
4.9 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2	46
4.10 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์.....	46
4.11 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และค่าพีเอช	47
4.12 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์	47
4.13 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 และค่าพีเอช	48

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม เมทิลออเรนจ์และค่าพีเอช	48
4.15 Optimization Plot	49
4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	50
4.17 การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	51
4.18 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO ₂	52



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอทำหน้าที่เปลี่ยนวัตถุดิบสิ่งทอจำพวกเส้นด้ายดิบและผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมชั้นปลายเพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าผลิตภัณฑ์สิ่งทอและลดการนำเข้าวัตถุดิบในการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมสิ่งทอและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ปัจจุบันโรงงานฟอกย้อมมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว การส่งออกสินค้าสิ่งทอ เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่มสามารถทำรายได้เข้าประเทศถึง 7,677 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ต่อปี [1] ขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของโรงงานฟอกย้อมก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตมีการใช้สารเคมีและสีย้อมที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลาง โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ส่งผลให้โรงงานฟอกย้อมมีน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่มีสีติดค้างและสารเคมีปนเปื้อน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยซึ่งไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด ส่งผลกระทบต่อปัญหามลพิษทางน้ำ นอกจากนี้ กลุ่มหัตถกรรมผ้าบาติกก็เป็นอีกกลุ่มที่มีการใช้สีย้อมในการย้อมผ้า การรวมกลุ่มผลิตสินค้า OTOP (One Tambol One Product) ทำให้สินค้าเป็นที่ยอมรับ มีการสั่งซื้อเพิ่มมากขึ้นและมียอดการผลิตสูง ส่งผลให้ปริมาณน้ำทิ้งสูงขึ้นเช่นกัน กลุ่มหัตถกรรมและโรงงานฟอกย้อมเหล่านี้ยังมีปัญหาในเรื่องขาดความรู้และเงินลงทุนในการบำบัดสีและสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากกระบวนการ ทำให้น้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะเกิดน้ำเน่าเสีย มีกลิ่นเหม็น และมีสีเป็นที่น่ารังเกียจ

สีย้อมผ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงงานฟอกย้อมมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่ ซับซ้อน และอาจเป็นสารที่มีพิษ โดยที่ส่วนประกอบที่ทำให้เกิดสี คือ กลุ่มเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้น การเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมาก ตัวอย่างสีย้อมในอุตสาหกรรม เช่น สีย้อม Azo dyes นี้ถือว่าเป็น Chromophore ยอดฮิตของสีย้อมทั้งทางด้านสิ่งทอและสีอื่นในวงการอื่นๆ ด้วยความที่ว่าเป็นกลุ่มที่สามารถให้ค่าความเข้มเชิงโมลสูงสังเคราะห์ง่าย และราคาสมเหตุผลซึ่งปกติแล้วหมู่ Azo ($-N=N-$) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์แล้วจะเกิดการ Reduction cleavage เกิดเป็นสารประกอบ Aromatic amine ชนิดต่างๆ อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่เป็นต้นเหตุของการกลายพันธุ์ได้ [2]

ผลกระทบของสีย้อมผ้าต่อสิ่งแวดล้อม คือ ทำให้เกิดมลพิษทางสายตา โดยทั่วไปสามารถมองเห็นการปนเปื้อนของสีได้ด้วยตาเปล่าในแหล่งน้ำที่ปริมาณ 0.1-200 มิลลิกรัมต่อลิตร [3] จากข้อมูลของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม พบว่า มีน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมสีของกลุ่มอาชีพและวิสาหกิจชุมชนที่ผลิตผ้าทอเป็นจำนวนมากได้ถูกปล่อยทิ้งสู่ธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัด ส่งผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมและระดับน้ำใต้ดินของชุมชน [4] เนื่องจากมาตรฐานการปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษกำหนดเพียงว่า สีของน้ำเสียก่อนปล่อยนั้นต้องเป็นสีที่ไม่พึงรังเกียจ ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมปล่อยน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ นอกจากนี้ น้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมยังมีกลิ่นเหม็น ทำให้ชาวบ้านไม่สามารถใช้น้ำในการอุปโภคบริโภคได้ สีย้อมที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอินทรีย์ย่อยสลายได้ จะทำให้ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง และความเข้มข้นของสียยังขัดขวางการเดินทางของแสงที่จะลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำหรืออาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำตามธรรมชาติในการอุปโภค บริโภค เช่น สีพวงโรธามีน บี (Rhodamine B) เอารามีน (Auramine) มาลาไคท์ กรีน (Malachite green) และไวโอเลท บี เอ็น พี (Violet BNP) อาจทำให้เกิดผื่นที่ผิวหนัง หน้าบวม อาเจียน ท้องเดิน อากาศหยาบ และอ่อนแรง สีบางอย่างอาจทำให้เกิดมะเร็งที่ต่อมน้ำเหลือง และอวัยวะอื่นๆ นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดมีการสลายตัวเป็นโลหะหนักต่างๆ เช่น โครเมียม แคดเมียม โปรท ตะกั่ว และพลวง เป็นต้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาในการย้อมไม่สมบูรณ์โลหะหนักเหล่านี้จะปนเปื้อนมาในน้ำเสียเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์แม้ได้รับเพียงปริมาณเล็กน้อย อาจอาจเป็นทั้งอย่างฉับพลันหรือเรื้อรัง เป็นอันตรายแก่ชีวิตได้

โดยทั่วไปการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมมีหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) [5] การดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon adsorption) [6] การบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) [7] และเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane technology) [8] อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวข้างต้นนี้มีข้อเสีย คือ สารอินทรีย์เหล่านั้นยังคงสภาพเดิมเพียงแต่ถูกดูดซับไว้ภายในโครงสร้างของตัวดูดซับหรือเพียงแค่ถูกแยกออกมาเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถนำตัวดูดซับเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากกระบวนการต่าง ๆ ข้างต้นแล้วยัง นิยมนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOPS) [9] มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีเจือปน โดยเฉพาะกระบวนการเพนตัน (Fenton process) และเมื่อใช้กระบวนการเพนตันร่วมกับ แสงอัลตราไวโอเลต หรือ กระบวนการโฟโตเพนตัน (Photo-Fenton process) [10] จะยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}^\bullet$) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงโดยจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เช่น โมเลกุลของสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย นำไปสู่การสลายสารเหล่านี้ทำให้ความเป็นพิษลดลง

ไททาเนียมไดออกไซด์จัดได้ว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมกับเป็นสารกึ่งตัวนำนั้น จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว ไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบ ได้แก่ รูไทล์ อะนาเทส และบรูไคต์ อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็วกว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ [11] การเพิ่มประสิทธิภาพของไททาเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การเติมโลหะลงบนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมโลหะ เมื่ออิเล็กตรอนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไททาเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นจนข้ามช่องว่างไปสู่แถบการนำไฟฟ้า แต่มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้อีก แต่เมื่อมีโลหะอยู่ด้วย โลหะบนไททาเนียมไดออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) สามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว ส่งผลให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [12]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมเหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ด้วยวิธี Dry impregnation เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยเติมเหล็กที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักตัวรองรับ จากนั้นวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และหาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design ซึ่งตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ค่าพีเอช ความเร็วรอบการปั่นกววน และความเข้มแสงยูวี พร้อมทั้งใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

1.2.2 เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

1.2.3 เพื่อหาสภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction : XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

1.3.2 ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลกระทบต่อสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

1.3.3 ศึกษาผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO₂ ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

1.3.4 หาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design ซึ่งตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ค่าพีเอช ความเร็วรอบการปั่นกววน และความเข้มแสงยูวี

1.3.5 หาสภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ และค่าพีเอช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ที่สภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลอร์เรนจ์ได้มากที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 สามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 สำหรับสลายสีย้อมเมทิลอร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันได้

1.4.2 สามารถหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลอร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ Fe/TiO_2 ได้

1.4.3 สามารถหาภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลอร์เรนจ์ได้มากที่สุดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ Fe/TiO_2 ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดและประเภทของน้ำเสียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีกระบวนการฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและใช้สีย้อมเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนี้มีการใช้น้ำในปริมาณมากในกระบวนการผลิต นอกจากนี้การใช้สารเคมีต่างๆ เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม เป็นต้น ซึ่งจะเหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการฟอกย้อม และจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะเพื่อป้องกันการเกิดปัญหามลพิษน้ำและมลพิษสิ่งแวดล้อม

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อมจะขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการ เช่น กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ และกระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก ซึ่งแต่ละกระบวนการจะมีขั้นตอนการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และสีย้อมที่ต่างกัน

2.1.1 แหล่งกำเนิดของน้ำเสีย

แหล่งที่มาของน้ำเสียฟอกย้อมนอกจากที่เกิดจากสารเคมีแล้ว ยังรวมถึงสิ่งอื่นๆที่ปะปนมากับเส้นใย เช่น น้ำมันและไขมัน เป็นต้น น้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีที่มาจากแหล่งต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้ [13]

1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใยก่อนย้อม น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ และน้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้าง แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต กระบวนการที่ทำให้เกิดน้ำเสียนั้น ได้แก่ กระบวนการลอกแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสีและการตกแต่ง และกระบวนการพิมพ์ผ้า น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะมีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกค่อนข้างสูง มีลักษณะที่แตกต่างกันตามลักษณะของเส้นใย และกระบวนการฟอกย้อมที่ใช้

2) น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อม หรือพิมพ์นั้นมักจะมีการใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อน้ำจะได้น้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรงจะเป็นการไปเพิ่มปริมาณน้ำย้อม และเป็นน้ำเสียในที่สุด

3) น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการฟอกย้อมนั้นจำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิของน้ำย้อมให้ลดลงให้รวดเร็วโดยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4) น้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างเครื่องจักรและการทำความสะอาดโรงงาน น้ำในส่วนนี้เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ ในบางกรณีน้ำเสียชนิดนี้อาจมีความสกปรกและมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆสูง เช่น น้ำที่ใช้ล้างสกรีนที่ใช้ในการพิมพ์ผ้า หรือน้ำจากการล้างถังเตรียมสี เป็นต้น

5) น้ำจากแหล่งอื่นๆ อาจจะเป็นน้ำใช้จากการอุปโภคบริโภคของคนงาน เช่น น้ำจากโรงอาหารและน้ำจากห้องน้ำภายในโรงงาน เป็นต้น

2.1.2 ประเภทของสิ่งสกปรกในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

1) สีย้อม ในการย้อมสี เส้นใยจะดูดซึมสีเพียงบางส่วนเท่านั้น ที่เหลือยังคงอยู่ในน้ำย้อม และถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียของโรงงานในที่สุด สำหรับในการพิมพ์ก็เช่นเดียวกันกับสีที่พิมพ์ไปบนผ้าจะไม่ถูกดูดซึมหมด และส่วนที่ไม่ถูกดูดซึมจะถูกชะล้างออกภายหลังการพิมพ์

2) สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีอยู่มากมายหลายชนิด สารเคมีเหล่านี้คงเหลืออยู่ในน้ำย้อมหรือน้ำชะล้าง ซึ่งจะถูปล่อยออกมากับน้ำเสียของโรงงาน

3) สิ่งสกปรกที่เจือปนมากับน้ำเสีย โดยเฉพาะเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเหล่านี้มีทั้งที่เป็นไขมัน สารขี้ผึ้ง โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ในการผลิตยังมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น สารหล่อลื่น แป้งมัน สิ่งสกปรกเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากเส้นใยในกระบวนการเตรียมก่อนการย้อมหรือพิมพ์ และหลุดออกมากับน้ำเสียของโรงงานในขั้นตอนการเตรียมการฟอกย้อมหรือพิมพ์

2.1.3 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสันทสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อมและให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้อาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอนอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่างๆ ในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิตและการเลือกใช้สารเคมี กระบวนการฟอกย้อมผ้าเป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญทั้งในขั้นตอนการซักล้าง ฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างผ้าทอกับผ้าถักก็คือ การฟอกย้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ดังนั้นกระบวนการเตรียมผ้าถักที่สำคัญ คือ การซักล้างทำความสะอาดก่อนทำขั้นตอนต่อไป โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม

2.2 องค์ประกอบและลักษณะน้ำเสียสีย้อม

น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้ามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าโดยทั่วไปจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง ความเป็นด่างสูง อุณหภูมิสูง ความเข้มข้นสูง ค่าของแข็งละลายสูง และมีโลหะเจือปน ซึ่งโรงงานฟอกย้อมและพิมพ์ผ้าแต่ละประเภทมีสมบัติน้ำเสียแตกต่างกัน [14]

2.2.1 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

1) มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดี

ประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

2) มีค่าความเป็นกรดและด่าง(pH) และค่าสภาพด่าง(alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูน/ลิตร สารที่ทำให้น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน(scouring)

3) มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมาไปกับน้ำเสีย ในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

4) มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

5) มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

2.3 สีย้อม

สีย้อม (Dye) คือ สียชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดสามารถละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำได้แต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้น มีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน ซึ่งสายตาสารสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน ซึ่งแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสารออกมาต่างกันไป [15]

2.3.1 ประเภทของสีย้อม

ปัจจุบันสามารถแบ่งสีย้อมออกได้หลายประเภท เพื่อให้เหมาะกับเส้นใยแต่ละชนิดและกระบวนการย้อมซึ่งมีลักษณะต่างกัน โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน เพราะสีย้อมผ้าที่มีคุณภาพต้องมีความคงทนต่อการซัก แสง และความร้อน ซึ่งกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งสีย้อมตามวิธีใช้เป็น 11 ประเภท ได้แก่

1. สีดิสเพอร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) และนำมาย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ได้ด้วย เนื่องจากเส้นใยทั้งสองประเภทสามารถดูดน้ำได้น้อย สีดิสเพอร์สมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีซีดง่ายหากถูกควั่นหรือก้ำขางชนิด สีประเภทนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสมสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สิริแอทฟ (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นเบส สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นเบส กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สิริแอทฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70 - 75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สิริแอทฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

3. สีเบสิก (Basic Dyes) เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) บางครั้งเรียกสีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (Mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง

4. สีแอซิด (Acid Dyes) คือ ตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์กรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยพอลิเอมิด (Polyamide) เป็นต้น

5. สีมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetallized Dyes) เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) กับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่า โครงสร้างของเส้นใยจะสามารถรวมตัวกับไอออนของโลหะ ก่อรูปเป็นสารประกอบภายในทำให้สีมีความคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่า สีไดเรกต์ ส่วนที่เรียกว่า สีมอร์แดนท์ต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะเส้นใยโปรตีน

6. สีไดเรกต์ (Direct Dyes) เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งเรียกสีย้อมฝ้าย ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (AZO) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

7. สีอะโซอิก (Azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

8. สีแวต (Vat Dyes) เป็นสีที่มีความคงทนดีที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ อย่างไรก็ตามไม่ใช่สีว่าทุกตัวจะมีความคงทนเหมือนกัน นอกจากนี้สีแวตสามารถใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ด้วย

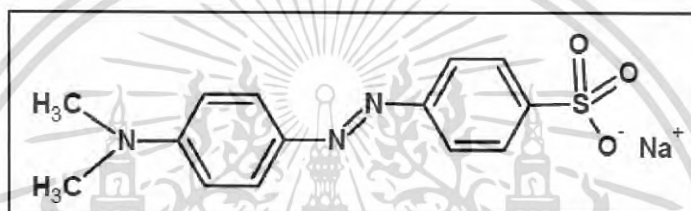
9. สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

10. สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorants) เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้ในงานในอุตสาหกรรม

11. สีมินเนอรัล (Mineral Colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำหลายชนิด นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

2.3.2 เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทิลออเรนจ์เป็นตัวแทนของสีย้อมในการสร้างแบบจำลองน้ำเสีย ซึ่งสีย้อมเมทิลออเรนจ์จัดอยู่ในสีย้อมประเภทสีไคเรกต์ (Direct Dyes) มีหมู่ Azo ถือว่าเป็น Chromophore ที่นิยมของสีย้อมทั้งทางด้านการสังเคราะห์และสีในวงการอื่นๆ ด้วยความที่ว่าเป็นกลุ่มที่สามารถให้ค่าความเข้มเชิงโมเลกุลสูง สังเคราะห์ง่าย และราคาสมเหตุผล แต่เมทิลออเรนจ์เป็นสีย้อมที่มีหมู่ Azo ($-N=N-$) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์แล้วจะเกิดการ Reduction cleavage เกิดเป็นสารประกอบ Aromatic amine ชนิดต่างๆ อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งหรือสารที่เป็นต้นเหตุของการกลายพันธุ์ได้ [16] ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของสีย้อมเมทิลออเรนจ์

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

2.3.3 การวัดสี

1. วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐาน (Platinum cobalt standard) วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลทินัมโคบอลต์มาตรฐานจะเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานสีเหลืองๆ คล้ายน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard color comparison tubes) หรือที่เรียกว่า หลอดเนสเลอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสีมานานแล้ว ข้อดีคือ ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ จะต้องมีการเตรียมมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าสีของน้ำตัวอย่าง ในรูปการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยมีหลักการที่ว่า สีเข้มจะดูดกลืนแสงมาก หรืออัตราการทะลุผ่าน ของแสงน้อย สำหรับการอ่านค่าความเข้มข้นของสีอ่านได้จากกราฟมาตรฐาน ที่ทำขึ้นมา

2.4 วิธีการกำจัดสีย้อม

สิ่งเจือปนในน้ำทั้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนวิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้ [17]

2.4.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้รวมกับการปรับค่าความเป็นกรด ต่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์ริคคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีย้อม สีย้อมฟอสฟอรัส การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1) ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

2) ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ดัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50

2.4.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้นต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอชก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

2.4.4 เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมสีดิสเพอร์สที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมสีเซลเฟอร์ สีแสด และสีอะซิติกที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับใช้กำจัดออสโมซิสย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ขั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

3. ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลิลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

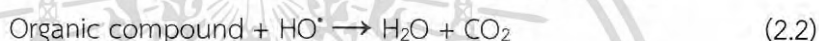
4. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีย้อมสีรีแอคทีฟที่ใช้ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีย้อมรีแอคทีฟต้องใช้สาร อิเลคโตรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเลคโตรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

2.5 ปฏิกริยาโฟโตเฟนตัน [18]

ปฏิกริยาเฟนตันนั้นเป็นปฏิกริยาเคมีระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับเหล็กไอออน (เฟอร์รัสไอออน, Fe^{2+}) โดยจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl Radical, $\text{OH}^\bullet$) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูง ซึ่งความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงของไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ได้จากสารละลายเฟนตัน ทำให้มีการนำสารละลายเฟนตันไปใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล พอร์มัลดีไฮด์ สารประกอบอะโรมาติก เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และสารเคมีต่างๆ ที่ได้จากวัสดุสีย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสียตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อนโดยมีผลดังนี้ คือ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ลดค่าบีโอดี (BOD) และซีโอดี (COD) ลดกลิ่นและสี สรุปลงในการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกริยาโฟโตเฟนตันได้ดังนี้คือ การทำปฏิกริยาระหว่าง เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะสร้างไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการที่ 2.1



ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลนี้จะทำให้เกิดปฏิกริยาออกซิเดชันในสารอินทรีย์ดังสมการที่ 2.2

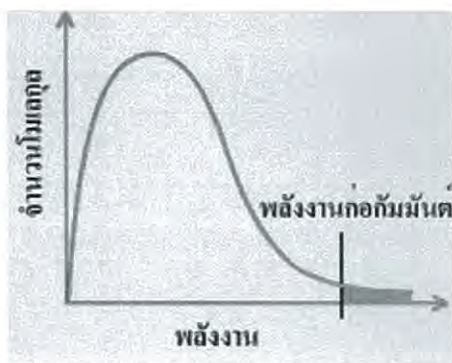


เมื่อเกิดอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์แล้วก็จะเกิดการเหนี่ยวนำต่อไปเรื่อยๆ เป็นปฏิกริยาลูกโซ่ ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลง ความเป็นพิษลดลงหรือหมดไปแต่ในสภาวะที่ไม่มีแสงมากกระตุ้นในระหว่างที่เกิดปฏิกริยา เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในระบบจะสะสมเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หมดลง ปฏิกริยาก็จะหยุด แต่เราสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกริยาขึ้นได้อีกด้วยการฉายรังสี UV หรือ การฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible light) ซึ่งแสงจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกริยาโฟโตรีดักชันของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ทำให้ได้ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ดังสมการที่ 2.3

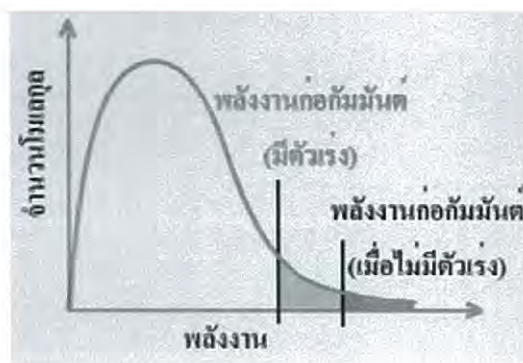


2.6 ตัวเร่งปฏิกริยา

ตัวเร่งปฏิกริยา (Catalyst) คือ สิ่งที่เพิ่มเข้าไปในปฏิกริยาแล้วทำให้ปฏิกริยาเกิดเร็วขึ้น แต่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดปฏิกริยาเช่น การใส่ยีสต์ในการหมักเหล้าเพื่อเร่งปฏิกริยา มีทั้งตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมี เช่น โลหะและตัวเร่งปฏิกริยาทางชีวภาพ เช่น เอนไซม์ การอธิบายว่าตัวเร่งปฏิกริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา ก็ยังคงต้องใช้ทฤษฎีการชน และกราฟการกระจายอนุภาคของแมกซ์เวล-โบลซ์มันน์ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [19] ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 การแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) และการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) [20]

จากรูปที่ 2.6 ภาพ (ก) เป็นกราฟการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนภาพ (ข) เป็นกราฟการแจกแจงพลังงานของอนุภาคเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา จะสังเกตได้ว่า ตำแหน่งของพลังงานก่อกัมมันต์เลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น จำนวนอนุภาคทางขวาของพลังงานก่อกัมมันต์มีมากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

2.6.1 ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous reaction)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในเฟสเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากมีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูง และมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากสามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่าย

2.6.2 ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic reaction)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปมีสถานะเป็นของแข็ง ใช้เร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือแก๊ส เพราะมีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นได้ง่าย ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบว่องไวเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยา (Active component) และตัวรองรับ (Support) หรือตัวพา (Carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อให้เกิดความง่ายในการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว สารว่องไวแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามหน้าที่หลักได้แก่

1. โลหะ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างคือ นิกเกิล แพลเลเดียม ทองแดงและเงิน การที่โลหะเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนได้ เป็นเพราะโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนถูกดูดซับแตกตัวบนโลหะเหล่านี้ได้และเกิดปฏิกิริยาได้ทันที และโดยทั่วไปจะไม่สามารถนำโลหะบริสุทธิ์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เนื่องจากโลหะมักเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรสูงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โลหะออกไซด์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ เช่น ออกไซด์ของโลหะผสม ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบไอออนิก มีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอน สามารถเคลื่อนย้ายออกจากโครงผลึกได้ อีกกลุ่มตัวอย่าง คือ กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาที่เร่งปฏิกิริยาการดั่งไฮโดรเจนออก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ออกซิเจนสามารถจับอยู่กับโลหะอย่างแข็งแรงและจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์โดยไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นตัวเร่งที่ดีสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะไม่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับปฏิกิริยาที่เร่งปฏิกิริยาการดั่งไฮโดรเจนออก

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด สามารถเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด ซึ่งประกอบด้วยธาตุสองชนิดขึ้นไปเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงด้วยอะตอมของออกซิเจน เช่น ซิลิกา-อลูมินา และซีโอไลต์ เตรียมโดยการจับไอออนของธาตุแอโลหะเข้าไว้ในโครงสร้างของอลูมินา ชนิดของกรดอาจเป็นแบบลิวอิสหรือบรอน-สเตด

4. โลหะและกรด อาจเรียกว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่สองอย่าง (Bifunction catalyst) ตัวเร่งประเภทนี้ประกอบด้วยโลหะและองค์ประกอบที่เป็นกรด ทั้งสององค์ประกอบต่างก็เร่งขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาแต่อาจเร่งในขั้นตอนที่ต่างกันตัวรองรับหรือตัวพา ควรมีพื้นที่ผิวหน้าสูงสำหรับสารกัมมันต์ แม้บางครั้งอาจทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยก็ตาม เช่น ซิลิกา อลูมินา ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์

2.6.3 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยารวบรวม

กลไกการถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา มี 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (External diffusion) เป็นความสามารถของสารขณะไหลผ่านผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2. การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (Internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นเช่นกัน

3. การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการดูดซับซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) หลังจากเกิดการดูดซับแล้ว สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์

5. การคาย (Desorption) เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นตอนสุดท้าย การคายออกถือว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับในระบบปิดจะมีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคาย

6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เสมือนเป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 2 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น อย่างไรก็ตามถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ก็จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เป็นเสมือนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 1 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกไปเป็นสารผลิตภัณฑ์และอาจมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกันในกรณีที่ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

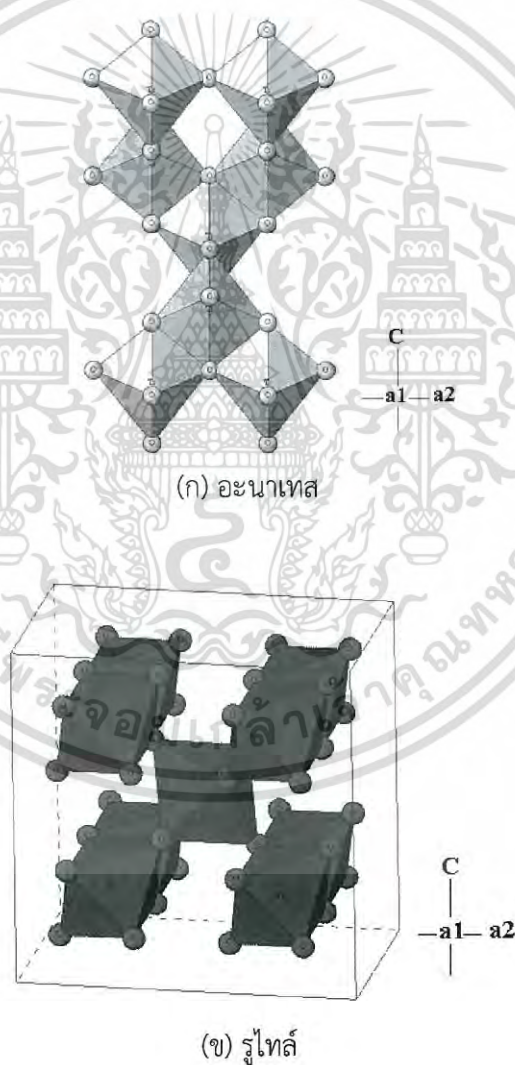
2.7.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น [21] เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมมีค่าการดูดกลืนแสงสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางด้านการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้การที่ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสง) ได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Promoter) และตัวรองรับ (Support) คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมเนื่องจากไทเทเนียมมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียมจึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของพลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบเวเลนซ์ (Valence band) จะเป็นระดับพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยหลุมประจุบวก (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้าง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 2.3 คือ รูไทล์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal อะนาเทสมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal และบรูไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic อะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.22 eV ซึ่งมากกว่ารูไทล์ (3.02 eV) อะนาเทสจึงมีสมบัติเป็นโฟโตคะตะลิสต์ที่สูงกว่ารูไทล์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของผลึกรูไทล์จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกเร็วมากและเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่ากรณีของอะนาเทส จึงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปเฟสอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ [22] ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์คืออัตราส่วนพื้นที่ผิวสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก จะให้ผลปฏิกิริยาดีมากขึ้นเมื่อใช้วัสดุที่มีสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำเป็นคู่กัน เช่นในระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ จากการศึกษาของ Yang และคณะ(2002) พบว่าระบบของ $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ เป็นตัวโฟโตคะตะลิสต์ที่ดีเนื่องจาก High quantum yield สูง ความแตกต่างของแถบการนำใน TiO_2 และ SnO_2 ส่งผลให้มีการแยกของ Photoinduce e^- hole pair และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ SnO_2 ให้มากขึ้นทำให้เฟสอะนาเทสเสถียรขึ้น ซึ่ง SnO_2 จะไปป้องกันการรวมตัวกลับกันอีกครั้งระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวกที่ทำให้ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในที่สุดก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ดีขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

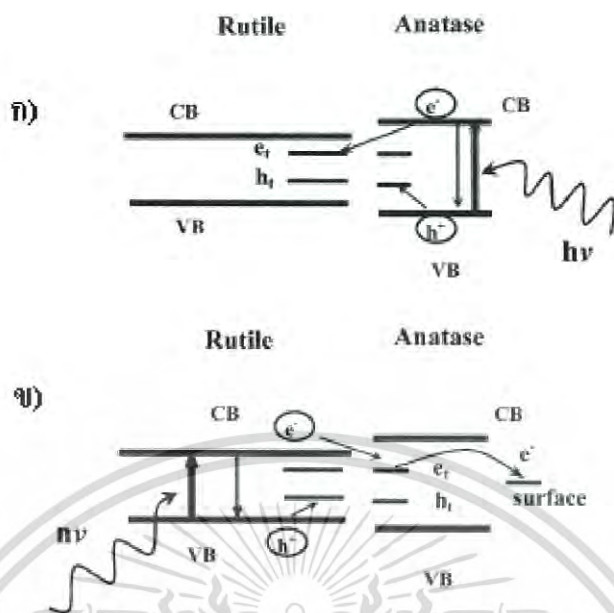


(ค) บรูไคต์

รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ (ค) บรูไคต์ [23]

2.7.2 การทำให้เกิดเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์

การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกวิธีหนึ่ง ก็คือ การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเฟสผสม ระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างอะนาเทสต่อรูไทล์เท่ากับ 75 : 25 ซึ่งผลิตโดยวิธีไฮโดรไลซิส Tetra-isopropyl-orthotitanate ต่อด้วยวิธีการทำให้ขึ้นงานแน่นขึ้น (Densification) ภายใต้ความดัน 1500 - 4000 kPa [24] จากเดิมเรารู้ว่าเฟสอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุดแต่จากการศึกษาและทดลองจากงานวิจัยหลายๆชิ้น พบว่าเฟสผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้สูงเช่นกัน กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเฟสผสม อาจเกิดจากเมื่ออิเล็กตรอนของเฟสอะนาเทสถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นจนข้ามช่องว่างไปสู่แถบการนำไฟฟ้า แต่มีโอกาที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้อีก แต่เมื่อมีเฟสรูไทล์อยู่ด้วย รูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) [25] สามารถป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว ซึ่งแสดงกลไกดังในรูปที่ 2.4 ก หรืออาจพิจารณากลับกันตามรูปที่ 2.4 ข โดยเมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.02 eV ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทส (3.20 eV) แต่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำไฟฟ้าแล้วกลับมารวมกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีเฟสอะนาเทสผสมอยู่ด้วย อะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้ และในที่สุดอิเล็กตรอนปรากฏตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นของเฟสอะนาไทต์และรูไทล์ (ก) แบบจำลองแบบเก่าของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีรูไทล์ทำหน้าที่เป็น Electron sink (ข) แบบจำลองเกี่ยวกับเฟสรูไทล์ [26]

2.7.3 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่นทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย อากาศเสีย และด้านอื่นๆ อีกหลายด้านกำลังได้รับการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายดังนี้

1. ด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้น ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่จุดเริ่มในปี 1970 จนถึงปัจจุบัน จำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1000 ชนิด ได้ถูกนำมาทดสอบและพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ BTEX (เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซิล และไซลีน) ซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมัน ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน คลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนัก

2. ด้านการแยกน้ำและการบำบัดน้ำเสีย การนำเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ อาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปี หลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตคะตะไลซิสเริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ ซึ่งแวนดลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่หลุดไปและหลุมประจุบวก (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกันหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่นๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^{2-}) ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ หลังจากปฏิกิริยาผ่านไปหลายขั้นตอน ในอีกทางหนึ่งอิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ด้วยได้

3. ด้านการฆ่าเชื้อโรค ผลจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกสามารถนำไปฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อราได้ เช่นการศึกษาปฏิกิริยาต่อต้านแบคทีเรีย *Escherichia coli* K-12 ของ Fe^{3+} -doped nanostructured TiO_2 thin films ที่เคลือบบนกระจก Soda-lime-silica ซึ่งเตรียมจากวิธี โซล - เจล ความเข้มข้นสูงสุดของ Iron ion (ประมาณ 0.5 mol%) หลังฉายรังสี 120 นาที สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ถึง 95 % เนื่องจากทำให้ Cell wall เกิดความเสียหาย [27] นักวิจัยบางท่านได้ทำการศึกษา Antifungal activity ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในรูปของผงไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบนฟิล์มพลาสติกที่ต่อต้าน *Penicillium expansum* ของผลไม้ หลังจากนั้นไม่กี่ปีก็ได้มีการพัฒนาโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 degussa) ได้ด้วย Ag มาทำการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ และเมื่อใช้เวลามากขึ้นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน โฟโตคะตะไลซิส ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศและพื้นผิวที่ทำความสะอาดตัวเอง เช่นใช้ในโรงพยาบาลหรือขั้นตอนการเตรียมอาหาร [28] นอกจากนี้ยังมีการศึกษา ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีโซล - เจล พบว่ากลไกการฆ่าเชื้อโรคที่สำคัญมาจากปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$ radical)

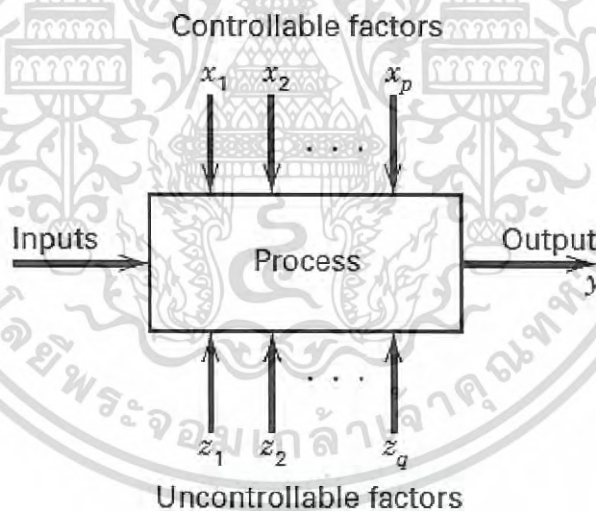
4. ด้านโซลาร์เซลล์ ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในโซลาร์เซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ราคาของโซลาร์เซลล์ค่อนข้างแพง เพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นมีการวิจัยและพัฒนาการทำงานของโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่นการนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อทำเป็น Quantum dot โซลาร์เซลล์ การนำซิลิกาและไทเทเนียมไดออกไซด์ เคลือบบน Si โซลาร์เซลล์ เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆให้ดีขึ้น นอกจากนี้การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วยวิธี Rf sputtering ดังรูปที่ 1.11 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ได้เช่นกัน โดยเพิ่ม Electron lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า [29] ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

2.8 การออกแบบการทดลอง

2.8.1 การออกแบบการทดลองทางสถิติ

การออกแบบการทดลองทางสถิติ หมายถึง กระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องและข้อสรุปที่สมเหตุสมผล โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output หรือ Response) โดยตัวแปรนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable) และตัวแปรหรือปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) แสดงดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองจึงมีดังนี้ [30]

1. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุด
2. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ
3. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ตัวแปรตอบสนองมีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาตัวแปรที่ควบคุมได้ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำให้ผลกระทบของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.3 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการผลิต [30]

2.8.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

1. การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การจัดสรรวัสดุในการทดลองและลำดับของการทดสอบแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะมีกระจายได้อย่างอิสระ การทำการทดลองแบบสุ่มจะช่วยลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดจากการทดลองได้และถ้าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยของประชากร การทดลองซ้ำจะช่วยให้การประมาณค่าเฉลี่ยมีความแม่นยำมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยที่แท้จริงที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง การทำการทดลองซ้ำจะทำให้ประมาณค่าได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

3. การทำการทดลองแบบบล็อก เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในการทดลอง หรือลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.8.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไข เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะได้กำหนดปัญหาในการทดลองได้อย่างชัดเจนและเพื่อระบุวัตถุประสงค์ของการทดลองให้มีความสมเหตุสมผล

2. การเลือกตัวแปรตอบสนอง โดยเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษา

3. การเลือกปัจจัยและการกำหนดระดับของปัจจัย ต้องเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอย่างแท้จริง

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

2.8.4 ขั้นตอนดำเนินการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการออกแบบการทดลองส่วนมากจะมี 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน (Planning) การคัดกรอง (Screening) การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) [31]

2.8.4.1 การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยลดปัญหาระหว่างทำการทดลอง เช่น คน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เงินทุน และวิธีการทดลอง ควรมีการวางแผนและจัดสรรทรัพยากรให้ดี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัญหา (Define the problem) การกำหนดปัญหาที่มีขอบเขตที่ชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรถูกต้อง และสามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ

2. กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) การกำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะดำเนินการนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และข้อมูลที่ได้นั้นใช้ได้จริง

3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต

4. กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยหลักการทางควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control : SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิมรวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจจะไม่มีประโยชน์มากนัก

2.8.4.2 การคัดกรอง

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

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

2.8.4.3 การหาค่าที่เหมาะสม

หลังจากที่มีการคัดกรองตัวแปร ขั้นตอนถัดมาจะทำการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรเหล่านี้โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) โดยใช้การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ของ Central Composite Design และ Box-Behnken Design ในกรณีที่ค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Responses) สามารถใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งมีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ในการหาค่าที่เหมาะสม

2.8.4.4 การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบว่าค่าที่วิเคราะห์มาได้จากโปรแกรม Minitab นั้นเป็นค่าที่เหมาะสมและสามารถให้ผลลัพธ์ได้จริง โดยทำการทดลองที่สภาวะตามค่าที่หามาจากค่าที่เหมาะสม

2.8.5 ประเภทของแบบการทดลอง

1. การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ทั้งผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา หรือ Interaction Factor) จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (ไม่รวมการทดลองซ้ำ) เท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับการทดลองของแต่ละปัจจัย k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน (No Aliased Structure) และศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ส่วนข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองแปรผันตามจำนวนระดับของปัจจัยและจำนวนปัจจัย

2. การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) นิยมใช้กับการทดลองที่มีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่จำกัด โดยทั่วไปนิยมศึกษาที่ 2 ระดับ จำนวนการทดลองเท่ากับ 2^{k-p} ข้อดีของการทำการทดลองแบบนี้ คือ ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองน้อย ส่วนข้อเสีย คือ การตีความผลจะซับซ้อนเนื่องจากในการทดลองมีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อนของผลกระทบ

3. การทดลองแบบ Plackett-Burman (Plackett-Burman Design) ใช้ในการคัดกรองปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน จำนวนการทดลอง (n) โดยที่ไม่ทำการทดลองซ้ำเท่ากับ 2^p หรือ 3^p เมื่อ p เท่ากับ 0, 1, 2, ..., 6 ข้อดี คือ การกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยได้จำนวนมากพร้อมๆ กัน ข้อเสีย คือ จำนวนปัจจัยหลักที่ศึกษาได้สูงสุดไม่เกิน $n-1$ เสมอ และเนื่องจากแบบการทดลองนี้มี Resolution III จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญสูง

4. การทดลองแบบ Box-Behnken (Box-Behnken Design) เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพ และนิยมใช้ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ใช้หลักการของ การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปที่ผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป การทดลองแบบ Box-Behnken สามารถประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ แต่ใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย ข้อดี คือ สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effect) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Interaction) แต่มีข้อเสีย คือ จำนวนครั้งที่ทดลองมากและไม่สามารถลดจำนวนได้ และยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบ Central Composite เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

5. การทดลองแบบ Central Composite (Central Composite Design : CCD) เหมาะสำหรับในการศึกษาหรือสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสอง (Second-order or Quadratic Model) การทดลองแบบ CCD มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองพหุนามอันดับสอง ข้อดีของการทดลองแบบ CCD คือ 1) เหมาะสำหรับการศึกษาสมการพหุนามอันดับสองมากที่สุด ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) 2) ความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครอบคลุมทุกค่า รวมทั้งเลือกใช้ได้ทั้งการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ และการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 3) โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับ 2^{k-p} การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 4) สามารถแยกการทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial Portion) เพื่อสร้างสมการเชิงเส้นในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับและคาดการณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Point) ถ้าสมการเชิงเส้นไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของคุณค่าแกน (Axial Point) จะได้สมการพหุนามอันดับสอง ข้อเสียของการทดลองแบบ CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Factor) กรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย โดยทำการเปรียบเทียบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน การทดลองแบบ Box-Behnken และการทดลองแบบ CCD แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 สรุปวัตถุประสงค์ในการใช้แผนการทดลอง 3 ระดับ

แบบการทดลอง	วัตถุประสงค์ในการทดลอง
3^k Full Factorial	- ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ - ประเมินค่าผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วมได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ แต่ใช้งบประมาณมาก
3^{k-p}	- เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีน้อย และไม่เหมาะในการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณทั้งหมด - ประเมินค่าผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองได้ทั้งหมด ในกรณีที่ Resolution ที่ใช้มีค่ามาก สามารถประมาณผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้
Box-Behnken	- ใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณเท่านั้น - ประเมินค่าผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบกำลังสอง และผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ทุกค่า
CCD	- เหมาะสำหรับศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่ถ้ามีปัจจัยเชิงคุณภาพเพียง 1 ปัจจัย ยังคงใช้ CCD ได้ - ประเมินค่าผลกระทบเชิงเส้นได้ทุกค่า และสามารถเลือกศึกษาผลกระทบกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยได้ตามระบุ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hassan และคณะ ได้ศึกษาการใช้เหล็กบนตัวรองรับบอลเคลย์ (Fe-ball clay) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อกำจัดสีย้อมแอซิดเรด (Acid Red, AR₁) ชนิดอะโซ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตันเพื่อกำจัดสีย้อมแอซิดเรด เช่น ปริมาณเหล็กเริ่มต้นที่เติมลงบนตัวรองรับบอลเคลย์ (Ball Clay, BC) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของ AR₁ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และค่าพีเอช พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสี AR₁ คือ การเติมเหล็ก 1.0 % โดยน้ำหนักบนตัวรองรับบอลเคลย์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5.0 กรัมต่อลิตร พีเอช 2.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RB4 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสี AR₁ 99 % ภายในเวลา 180 นาที ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า Fe-ball clay สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์ได้ [32]

Zhihui Xu และคณะ ได้ศึกษาการใช้เหล็กบนตัวรองรับแอมโมเนียมและไฮโดรเนียมจาโรไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันเพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันในการกำจัดสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอช พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสีเมทิลออร์เรนจ์ คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช 4.5 ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ 99 % ภายในเวลา 90 นาที และพบว่าไฮโดรเนียมจาโรไซด์ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า แอมโมเนียมจาโรไซด์ อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองต่างมีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโต และเหล็กหลุดจากตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย และต้นทุนต่ำ [33]

Nemanja Banic และคณะ ได้ศึกษาการใช้เหล็กบนตัวรองรับไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันเพื่อกำจัดไทโคพริด (Thiacloprid) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันในการกำจัดสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ พบว่า การเติมเหล็ก 7.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนตัวรองรับไททาเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดไทโคพริด คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร พีเอช 2.8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 45 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไทโคพริด 0.06 มิลลิโมลาร์ ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ให้ประสิทธิภาพของการกำจัดไทโคพริดได้มากกว่า 90 % ที่เวลา 15 นาทีเป็นต้นไป [34]

ณัฐวรราช ธนประดิษฐ์กุล และคณะ ได้ศึกษาการสลายสีย้อมสีเหลืองชนิดแอซิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al₂O₃ ปฏิกิริยาถูกทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม คือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายสี พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง จะสามารถสลายสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al₂O₃ เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 180 นาที ที่ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 4 จากการทดสอบปฏิกิริยาจริงจำนวน 10 ครั้ง พบว่า สามารถสลายสีย้อมได้ 95±2 % และไม่พบการละลายของเหล็กจากตัวเร่งปฏิกิริยา [35]

Jinzhu Ma และคณะ ในการศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาผลของการย่อยสลายกรดอะคริลิกพอลิเมอร์ในสารละลายโดยวิธีโฟโตเพนตัน ทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะเพื่อศึกษาหาจุดที่ดีที่สุดในการกำจัดสารดังกล่าว โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษาคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดอะคริลิกพอลิเมอร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งแต่ละตัวแปรเป็นอิสระต่อกันในการทดลองนี้ มีระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาแบบจำลองของสมการที่ให้ค่าจุดที่ดีที่สุด พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าการย่อยสลายกรดอะคริลิกพอลิเมอร์คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดอะคริลิกพอลิเมอร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยค่าการย่อยสลายที่สูงที่สุดเท่ากับ 92.44 % ขึ้นกับค่าตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดอะคริลิกพอลิเมอร์ 23 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก 7 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1300 มิลลิกรัมต่อลิตร สุดท้ายนี้ได้ทำการคำนวณค่าที่ได้จากแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ผลยืนยันได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวให้ค่าการย่อยสลายกรดอะคริลิกพอลิเมอร์ที่สูงที่สุดและเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองสมการที่ได้ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง [36]

N. Barka และคณะ ศึกษาการออกแบบทดลองแบบ Full factorial design เพื่อหาตัวแปรที่มีนัยสำคัญในการสลายกรดออกซาลิก ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 โดยตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้ คือ ความเร็วรอบปั่นกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดออกซาลิก ปริมาตรสารละลาย และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวแปรที่มีนัยสำคัญคือ ปริมาตรสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดออกซาลิก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเร็วรอบปั่นกวน ตามลำดับ โดยที่ความเร็วรอบปั่นกวน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลไปด้านบวก คือยิ่งมากยิ่งขึ้น แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นกรดออกซาลิก และปริมาตรสารละลาย ส่งผลไปด้านลบคือ ยิ่งน้อยยิ่งดี และผลของตัวแปรที่มีปฏิสัมพันธ์กันส่งผลน้อยมากต่อปฏิกิริยา [37]

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สารที่กำลังจัด	ตัวเร่งที่ใช้	ภาวะที่ดีที่สุด			
			$[\text{H}_2\text{O}_2]$	[Cat.]	[สารที่กำลังจัด]	pH
Hassan	Acid Red	Fe-ball clay	12 mM	5.0 g/L	50 ppm	2.5
Zhihui	Methyl Orange	แอมโมเนียมจาโรไซด์	600 ppm	200 ppm	160 ppm	4.5
		ไฮโดรเนียมจาโรไซด์	600 ppm	200 ppm	160 ppm	4.5
Nemanja	Thiacloprid	Fe/TiO_2	45 mM	0.5 g/L	0.06 mM	2.8
ณัฐวรรธ	Acid Orange	$\text{Fe/Al}_2\text{O}_3$	500 ppm	300 ppm	50 ppm	4
Jinzhu	Acrylic acid	FeCl_3	1300 ppm	7 ppm	23 ppm	-

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

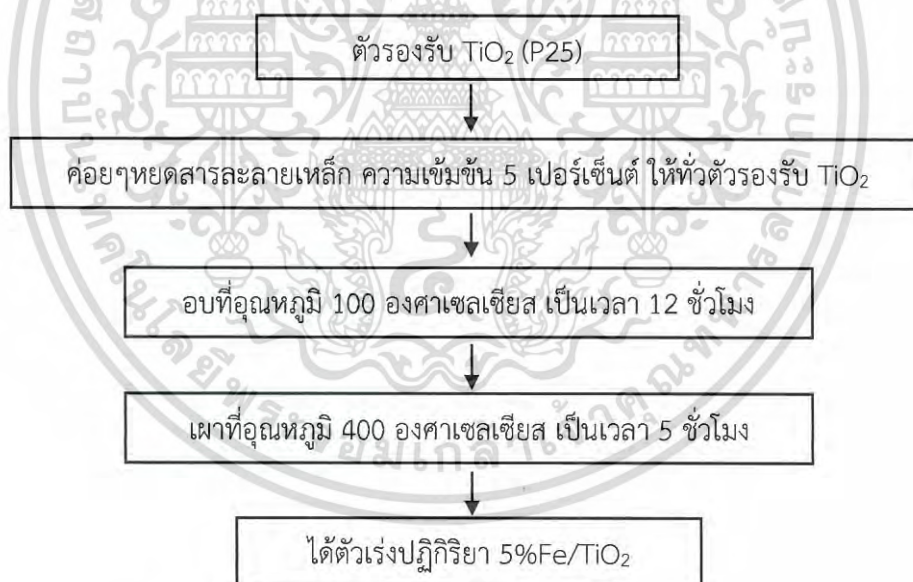
1. ปีกเกอร์ ขนาด 50, 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร
2. ปีเปต ขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
3. ไมโครปีเปต
4. ตูยวี่
5. กระบอกตวง
6. ขวดวัดปริมาตร
7. หลอดหยด
8. ซ้อนตักสาร
9. กระจกนาฬิกา
10. กระดาษกรอง
11. กระบอกน้ำกลั่น
12. แท่งกวนแม่เหล็ก
13. เครื่องให้ความร้อนพร้อมปั่นกวน
14. อลูมิเนียมฟอยด์
15. เครื่องวัด pH
16. เครื่องปั่นเหวี่ยง
17. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
18. เครื่องชั่งสาร
19. เตาเผา
20. ตู้อบ
21. ตู้แช่เย็น
22. เครื่อง Visible Spectrophotometer

3.2 สารเคมี

1. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ บริษัท Carlo Erba
2. TiO_2 (P-25)
3. Methyl Orange บริษัท Carlo Erba
4. Hydrogen peroxide 30% บริษัท Merck
5. Hydrochloric acid เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie

3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ด้วยวิธี Dry impregnation [38] เริ่มโดยนำสารละลายเหล็กความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวรองรับ TiO₂ หยดให้ทั่วตัวรองรับ TiO₂ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Fe/TiO₂ แสดงดังแผนการทดลองในรูปที่ 3.1 และเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ดังขั้นตอนที่กล่าวมา แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเหล็กเป็น 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวรองรับ TiO₂ จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Fe/TiO₂ และ 15%Fe/TiO₂ จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)



รูปที่ 3.1 การเติมเหล็กบนตัวรองรับ TiO₂ ด้วยวิธี Dry impregnation

3.4 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้ม ใช้รังสีเอกซ์ ในช่วง 20 - 80 องศา

3.4.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหลักบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) วิเคราะห์หาปริมาณธาตุหลักบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์ แล้วคายพลังงานออกมาโดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่งนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่า ในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง

3.5 การทดสอบการสลายสีย้อม

3.5.1 การเตรียมชุดอุปกรณ์ทดลอง

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

3.5.2 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเมทิลออเรนจ์

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งเมทิลออเรนจ์ 0.01 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์ เข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออเรนจ์ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร
4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลออเรนจ์กับค่าการดูดกลืนแสง

3.5.3 การทดสอบการสลายสีย้อม

1. เตรียมสารละลายเมทิลออเรนจ์ตามความเข้มข้นที่ต้องการปริมาตร 500 มิลลิลิตร เทใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก
2. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายเมทิลออเรนจ์ตามความเข้มข้นที่ต้องการ
3. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ตามปริมาณที่ต้องการ
4. นำสารละลายในข้อ 1 ใส่ตู้ยวี่พร้อมปั่นกวน จากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา
5. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ปิดไฟแล้วนำสารละลายไปเหยึ่งแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออก
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวดูดซับด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer
7. คำนวณหาประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ จากสมการที่ (3.1)

$$\%Efficiency = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดสอบผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

ทำการทดลองเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ FeSO_4 และ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ Fe/TiO_2 และ TiO_2 โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเหล็ก 53 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3

3.7 การทดสอบผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณเหล็กบนตัวรองรับร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักตัวรองรับ TiO_2 โดยดำเนินการทดลองที่สภาวะความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 530 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3

3.8 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

3.8.1 การคัดกรองปัจจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยศึกษาที่ 2 ระดับ ปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 6 ปัจจัย คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ค่าพีเอช ความเร็วรอบปั่นกววนและความเข้มแสง โดยขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับ	
			สูง(1)	ต่ำ(-1)
ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2	X_1	ppm	500	300
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	X_2	ppm	200	60
ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์	X_3	ppm	250	200
พีเอช	X_4	-	3	7
ความเร็วรอบปั่นกววน	X_5	rpm	500	250
ความเข้มแสง	X_6	W	108	54

เมื่อทำการกำหนดขอบเขตของปัจจัยเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะใช้โปรแกรม Minitab สร้างตารางการออกแบบการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบ Fractional factorial design เพราะจำนวนตัวแปรที่ศึกษามีหลายตัวแปร จึงจำเป็นต้องลดจำนวนการทดลองลง เพื่อประหยัดงบประมาณ ทรัพยากร และเวลา แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

Std Order	Run Order	Factor						Response
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
15	1	-1	1	1	1	-1	1	%Efficiency
11	2	-1	1	-1	1	-1	-1	
17	3	-1	-1	-1	-1	1	1	
26	4	1	-1	-1	1	1	1	
20	5	1	1	-1	-1	1	1	
9	6	-1	-1	-1	1	-1	1	
23	7	-1	1	1	-1	1	1	
32	8	1	1	1	1	1	1	
8	9	1	1	1	-1	-1	1	
22	10	1	-1	1	-1	1	1	
12	11	1	1	-1	1	-1	1	
16	12	1	1	1	1	-1	-1	
25	13	-1	-1	-1	1	1	-1	
7	14	-1	1	1	-1	-1	-1	
29	15	-1	-1	1	1	1	1	
27	16	-1	1	-1	1	1	1	
18	17	1	-1	-1	-1	1	-1	
10	18	1	-1	-1	1	-1	-1	
13	19	-1	-1	1	1	-1	-1	
3	20	-1	1	-1	-1	-1	1	
6	21	1	-1	1	-1	-1	-1	
1	22	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
14	23	1	-1	1	1	-1	1	
19	24	-1	1	-1	-1	1	-1	
2	25	1	-1	-1	-1	-1	1	
5	26	-1	-1	1	-1	-1	1	
30	27	1	-1	1	1	1	-1	
24	28	1	1	1	-1	1	-1	
31	29	-1	1	1	1	1	-1	
28	30	1	1	-1	1	1	-1	
4	31	1	1	-1	-1	-1	-1	
21	32	-1	-1	1	-1	1	-1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 การหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

3.8.2.1 การออกแบบการทดลอง

ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุด โดยปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองมี 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ และค่าพีเอช โดยขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับ		
			ต่ำ(-1)	กลาง(0)	สูง(1)
ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	X_1	ppm	80	160	240
ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2	X_2	ppm	300	450	600
ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์	X_3	ppm	150	200	250
พีเอช	X_4	-	3	5	7

เมื่อทำการกำหนดขอบเขตของปัจจัยเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะใช้โปรแกรม Minitab สร้างตารางการออกแบบการทดลอง ในงานวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบ Box Benken เพราะตัวแปรที่ศึกษาเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ สามารถประมาณผลกระทบในรูปของพหุนามอันดับสอง และผลกระทบรวม 2 ปัจจัยได้ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Box Benken

StdOrder	RunOrder	Factors				Response
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
23	1	0	-1	0	1	%Efficiency
22	2	0	1	0	-1	
7	3	0	0	-1	1	
6	4	0	0	1	-1	
26	5	0	0	0	0	
16	6	0	1	1	0	
15	7	0	-1	1	0	
19	8	-1	0	1	0	
14	9	0	1	-1	0	
9	10	-1	0	0	-1	
18	11	1	0	-1	0	
5	12	0	0	-1	-1	
13	13	0	-1	-1	0	
20	14	1	0	1	0	
3	15	-1	1	0	0	
10	16	1	0	0	-1	
11	17	-1	0	0	1	
27	18	0	0	0	0	
12	19	1	0	0	1	
24	20	0	1	0	1	
17	21	-1	0	-1	0	
4	22	1	1	0	0	
8	23	0	0	1	1	
1	24	-1	-1	0	0	
25	25	0	0	0	0	
21	26	0	-1	0	-1	
2	27	1	-1	0	0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบจำลอง

สำหรับการคัดกรองปัจจัยจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบฟังก์ชัน First-order Response ดังสมการที่ 3.2

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

เมื่อ β_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่จุดตัด

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น

β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วม

x_i และ x_j คือ ตัวแปรอิสระใน Coded Units

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

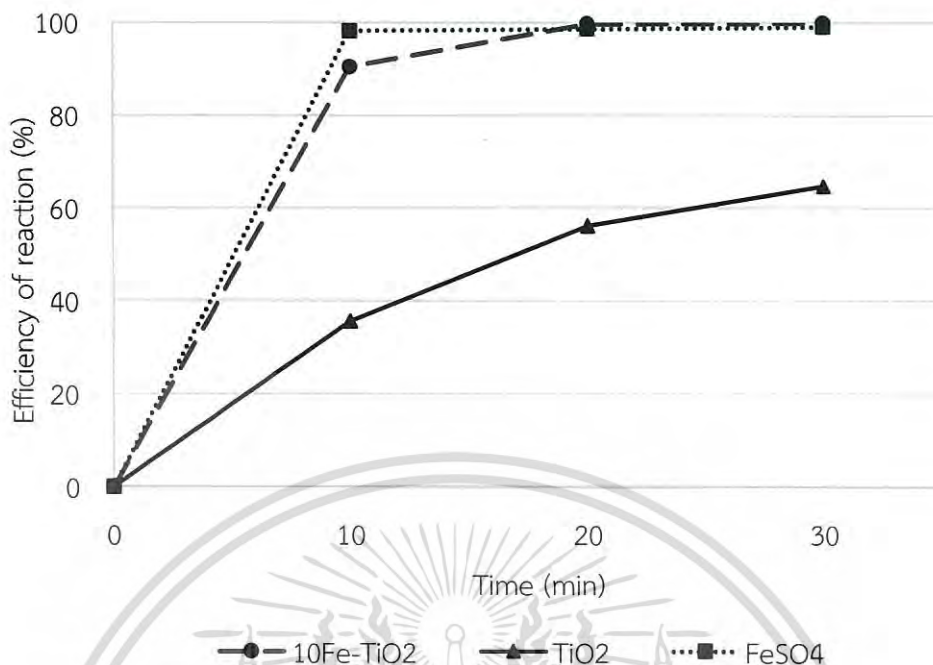


บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ไม่เติมเหล็ก TiO_2 ที่เติมเหล็ก (Fe/TiO_2) และ FeSO_4 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเหล็ก 53 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา FeSO_4 สามารถสลายสีย้อมได้ถึง 99% และ TiO_2 ที่ไม่ผ่านการเติมเหล็ก มีประสิทธิภาพต่ำสุดสามารถสลายสีย้อมได้ 65% และพบว่าในช่วงแรกที่เวลา 10 นาทีตัวเร่งปฏิกิริยา FeSO_4 สามารถสลายสีย้อมได้ถึง 98 % มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 และ TiO_2 เพราะ FeSO_4 เป็นสารละลายอยู่ในสถานะเดียวกับสารละลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ไวกว่า Fe/TiO_2 และ TiO_2 ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็ง ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด เพราะตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ไม่มีเหล็กอยู่ในโครงสร้างทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันได้ทันที ต้องใช้พลังงานจากแสงยูวีกระตุ้นให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์การแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลซิลแลดดิคอล ($\text{OH}^\cdot$) ซึ่ง $\text{OH}^\cdot$ จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์สลายสีย้อม ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา FeSO_4 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่หลังทำปฏิกิริยาพบว่ามีเหล็กตกค้างในสารละลาย ทำให้ต้องมีการตกตะกอนแยกเหล็กออกก่อน ทำให้เกิดความยุ่งยาก สิ้นเปลืองเวลาและสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง

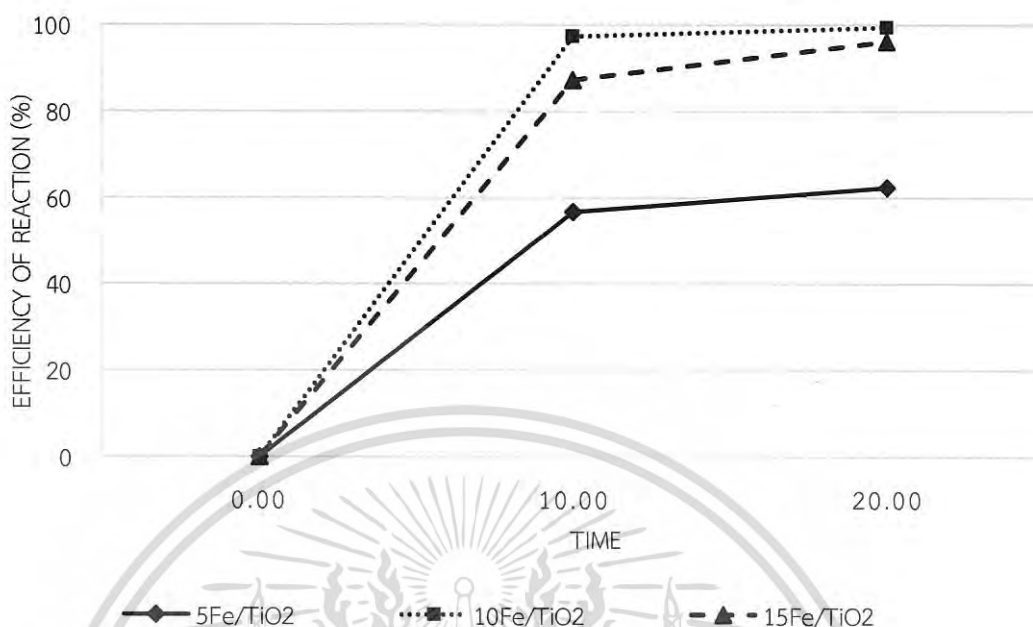


รูปที่ 4.1 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน ภาวะที่ทดสอบคือ ความเข้มข้นเหล็ก 53 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นสีของเมทิลออร์เรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3

4.2 ผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

ศึกษาผลของการเติมเหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยเติมเหล็กที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ของน้ำหนักตัวรองรับ ดำเนินการทดลองที่ภาวะความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 530 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีของเมทิลออร์เรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3 แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่ปริมาณเหล็กร้อยละ 10 ของน้ำหนักตัวรองรับมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือร้อยละ 15 และ 5 ตามลำดับ ปริมาณเหล็กที่มากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลซิลแลคคอลล ($\text{OH}^{\cdot}$) เป็น เฟอร์ริก (Fe^{3+}) และ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการ 4.1 ทำให้ $\text{OH}^{\cdot}$ ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ลดลงตามไปด้วย



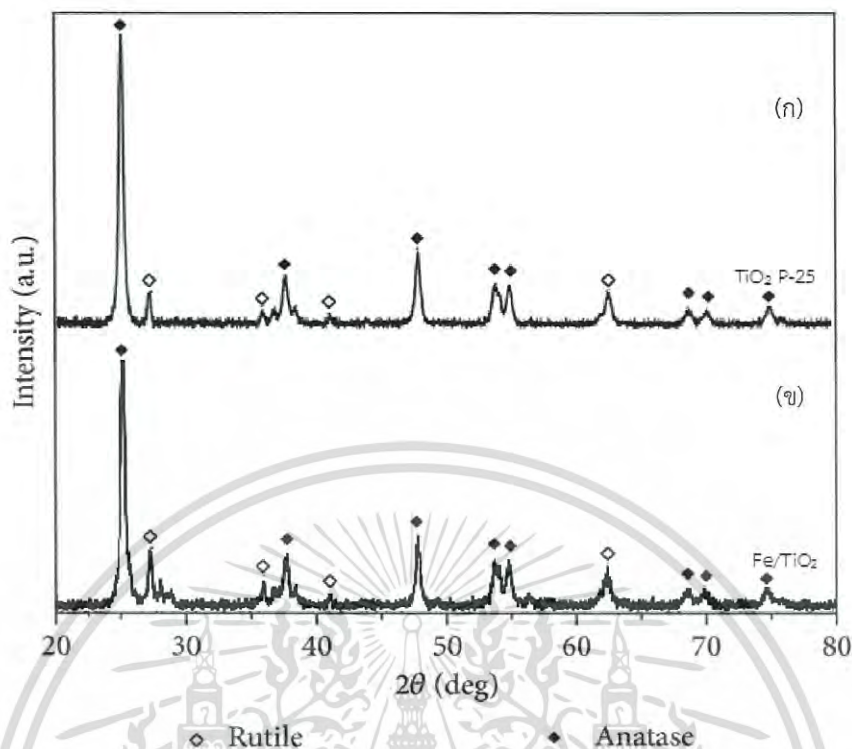


รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณเหล็กบนตัวรองรับ TiO_2 ต่อการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน ภาวะที่ทดสอบคือ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 530 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอช 3

4.3 ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2

4.3.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค XRD

วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูป 4.3 (a) ตัวรองรับ TiO_2 เกิดพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 27, 36, 41 และ 63 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ Rutile และที่ตำแหน่ง 2θ ที่ 25, 38, 48, 54, 55, 69 และ 70 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ Anatase แสดงว่า TiO_2 ที่ใช้เป็นตัวรองรับมีโครงสร้างผลึกแบบ Rutile และ Anatase เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ที่ความเข้มข้นเหล็กร้อยละ 10 ของน้ำหนักตัวรองรับ TiO_2 และเผาอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากนั้นวิเคราะห์ความเป็นผลึก แสดงดังรูปที่ 4.3 (b) พบว่าเกิดพีคขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับรูป 4.3 (a) แสดงให้เห็นว่าการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.3 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ตัวรองรับ TiO_2 ก่อนเผา, (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 หลังเผา

4.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหลักบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF

จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหลักที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ที่ผ่านการเติมเหล็กที่มีความเข้มข้น 10 % ของน้ำหนักตัวรองรับ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมสูงสุดสุด จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณเหล็กที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยามีอยู่ 9.41 % แสดงให้เห็นว่าปริมาณเหล็กหายไปขณะเตรียม 0.59 % อาจมีสาเหตุมาจากเหล็กติดไปกับภาชนะที่ใช้เตรียม

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณธาตุหลักที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา 10 Fe/TiO_2

ธาตุ	Fe	Ti	O	S
%	9.41	44.30	40.71	5.58

4.4 การคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

4.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการย่อยสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน 6 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ ค่าพีเอช ความเร็วรอบการปั่นกววน และความเข้มแสงยูวี โดยทำการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

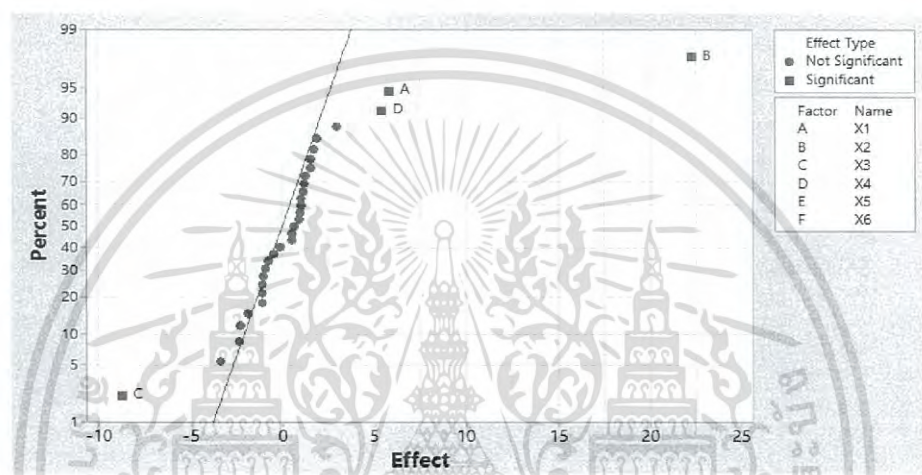
ตารางที่ 4.2 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design และประสิทธิภาพการ
สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์

Std Order	Run Order	Factor						%Efficiency
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
15	1	-1	1	1	1	-1	1	85.40
11	2	-1	1	-1	1	-1	-1	90.77
17	3	-1	-1	-1	-1	1	1	68.19
26	4	1	-1	-1	1	1	1	68.54
20	5	1	1	-1	-1	1	1	94.53
9	6	-1	-1	-1	1	-1	1	70.33
23	7	-1	1	1	-1	1	1	70.54
32	8	1	1	1	1	1	1	90.82
8	9	1	1	1	-1	-1	1	89.34
22	10	1	-1	1	-1	1	1	60.54
12	11	1	1	-1	1	-1	1	96.14
16	12	1	1	1	1	-1	-1	90.31
25	13	-1	-1	-1	1	1	-1	70.33
7	14	-1	1	1	-1	-1	-1	71.40
29	15	-1	-1	1	1	1	1	61.97
27	16	-1	1	-1	1	1	1	94.40
18	17	1	-1	-1	-1	1	-1	68.54
10	18	1	-1	-1	1	-1	-1	85.68
13	19	-1	-1	1	1	-1	-1	62.26
3	20	-1	1	-1	-1	-1	1	84.63
6	21	1	-1	1	-1	-1	-1	60.54
1	22	-1	-1	-1	-1	-1	-1	69.25
14	23	1	-1	1	1	-1	1	62.84
19	24	-1	1	-1	-1	1	-1	84.97
2	25	1	-1	-1	-1	-1	1	69.25
5	26	-1	-1	1	-1	-1	1	58.54
30	27	1	-1	1	1	1	-1	63.68
24	28	1	1	1	-1	1	-1	91.29
31	29	-1	1	1	1	1	-1	89.48
28	30	1	1	-1	1	1	-1	95.16
4	31	1	1	-1	-1	-1	-1	93.96
21	32	-1	-1	1	-1	1	-1	55.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 Normal plot of the standardized effects

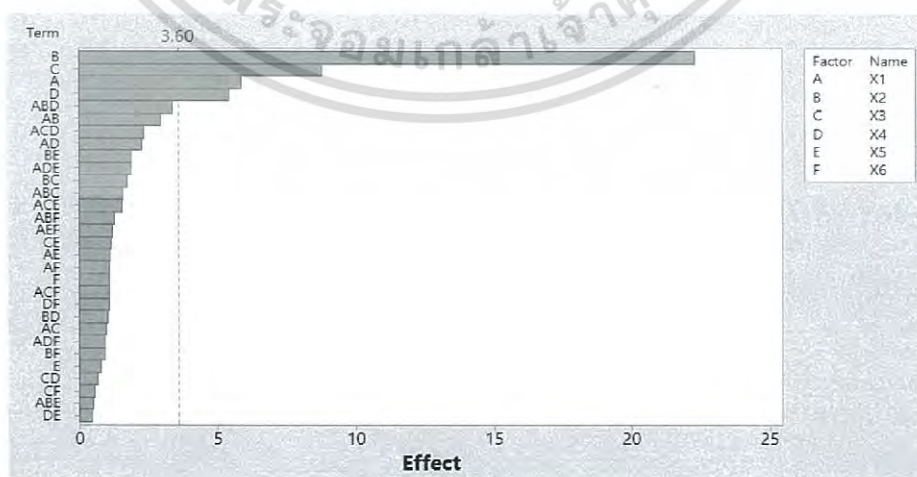
ผลกระทบของปัจจัยแสดงในรูปที่ 4.4 กราฟ Normal probability plot of effects ผลกระทบที่มีนัยสำคัญจะมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ห่างจากเส้นตรง ผลกระทบที่มีนัยสำคัญมากจะอยู่ห่างออกจากเส้นตรงมาก จากการวิเคราะห์ผลกระทบที่มีนัยสำคัญพบว่าผลกระทบหลัก คือ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 (X_1) ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X_2) ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (X_3) ค่าพีเอช (X_4) พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่า %Efficiency เรียงตามลำดับความสำคัญ คือ X_2 , X_3 , X_1 และ X_4 ส่วน X_5 และ X_6 เส้นกราฟมีลักษณะราบเรียบแสดงว่าเป็นผลกระทบที่ไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.4 Normal plot of the standardized effects

4.4.3 Pareto chart of the effects

จากรูปที่ 4.5 ผลกระทบใดๆ ที่เกินเส้นแนวตั้งซึ่งบ่งชี้ผลกระทบที่มีนัยสำคัญทางสถิติต่ำที่สุดจะถือว่ามีความสำคัญ ลำดับผลกระทบที่มีนัยสำคัญพบว่า X_2 , X_3 , X_1 , และ X_4 มีความสำคัญตามลำดับ



รูปที่ 4.5 Pareto chart of the effects

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 Main effects plots

ผลกระทบหลักแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเส้นกราฟของ X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 มีลักษณะสูงขึ้นแสดงว่าเป็นผลกระทบที่มีนัยสำคัญคือ ผลของความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ (X_1) ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH[•]) ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัลจะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์สลายสีย้อม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์การแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นมากเกินไป เฟอร์รัสไอออน (Fe²⁺) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลแรดิคัลลดลงดังสมการ 4.2



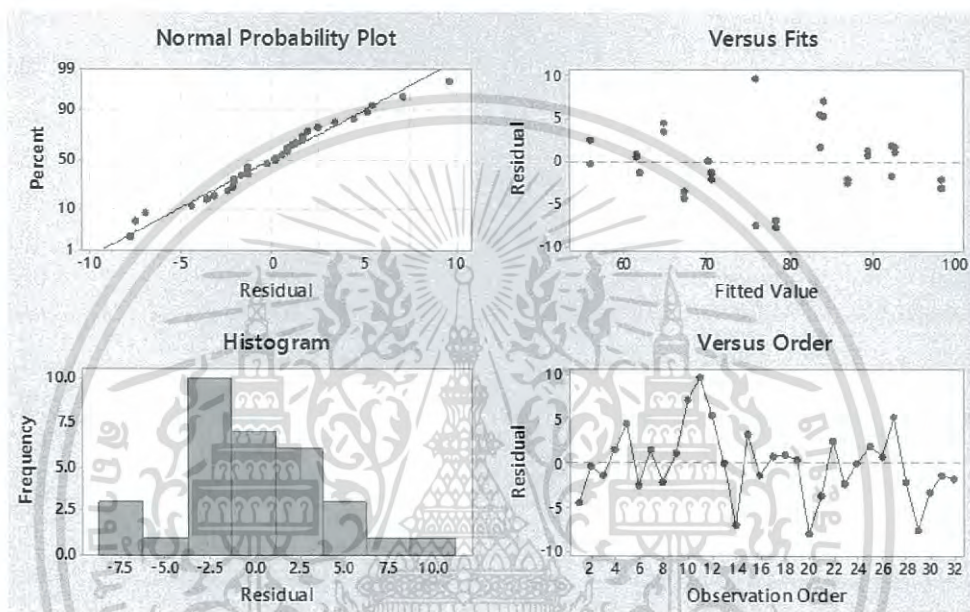
ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X_2) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มขึ้น เมื่อให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการสลายสีย้อมจึงสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของความเข้มข้นสีย้อมเมทิลอเรนจ์ (X_3) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในสารละลายจึงเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดลองที่ภาวะเดิมเวลาเท่าเดิม จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมลดลง และผลของค่าพีเอช (X_4) ค่าพีเอชต่ำจะเกิดปฏิกิริยาได้ไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคัล (HO₂[•]) แสดงดังสมการที่ 4.3 ซึ่งไฮโดรเปอร์ออกซิลแรดิคัลสามารถออกซิไดส์สลายสีย้อมได้เช่นเดียวกับไฮดรอกซิลแรดิคัล มีผลทำให้ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเพิ่มขึ้น และที่ค่าพีเอชสูงเหล็กอาจทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 4.6 Main effects plots

4.4.6 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองพหุนามอันดับสองจากกราฟ Residual plot แสดงดังรูปที่ 4.7 จากกราฟ Normal probability plot พบว่าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากกราฟ Residual กับ Fitted value ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวมีลักษณะเป็นแนวโน้ม แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual กับ Order พบการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.7 Residual plot

4.5 การหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

4.5.1 การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken

ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken เพื่อหาภาวะที่สลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ได้มากที่สุด โดยปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X_1) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 (X_2) ความเข้มข้นเริ่มต้นสีของเมทิลออร์เรนจ์ (X_3) และค่าพีเอช (X_4) โดยทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken และประสิทธิภาพการสลาย
สีย้อมเมทิลออเรนจ์

StdOrder	RunOrder	Factors				%efficiency
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
23	1	0	-1	0	1	75.18
22	2	0	1	0	-1	94.11
7	3	0	0	-1	1	95.65
6	4	0	0	1	-1	88.26
26	5	0	0	0	0	91.81
16	6	0	1	1	0	85.86
15	7	0	-1	1	0	73.97
19	8	-1	0	1	0	73.69
14	9	0	1	-1	0	96.09
9	10	-1	0	0	-1	78.54
18	11	1	0	-1	0	99.41
5	12	0	0	-1	-1	97.49
13	13	0	-1	-1	0	94.63
20	14	1	0	1	0	95.09
3	15	-1	1	0	0	79.61
10	16	1	0	0	-1	97.48
11	17	-1	0	0	1	75.18
27	18	0	0	0	0	92.30
12	19	1	0	0	1	94.79
24	20	0	1	0	1	90.18
17	21	-1	0	-1	0	84.15
4	22	1	1	0	0	97.28
8	23	0	0	1	1	85.54
1	24	-1	-1	0	0	74.97
25	25	0	0	0	0	92.21
21	26	0	-1	0	-1	85.15
2	27	1	-1	0	0	90.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 แบบจำลองการถดถอยของค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม

ตารางที่ 4.5 แสดงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Coef) พร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SEcoef) สำหรับแบบจำลองการถดถอยใน Coded units ระหว่างค่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อมกับตัวแปรแต่ละตัว แสดงดังสมการที่ 4.3

$$\begin{aligned} \% \text{Efficiency} = & 92.11 + 9.009 X_1 + 4.086 X_2 - 5.417 X_3 - 2.042 X_4 - 3.61 X_1 X_1 \\ & - 4.00 X_2 X_2 + 0.07 X_3 X_3 - 1.46 X_4 X_4 + 0.61 X_1 X_2 + 1.54 X_1 X_3 \\ & + 0.17 X_1 X_4 + 2.61 X_2 X_3 + 1.51 X_2 X_4 - 0.22 X_3 X_4 \end{aligned} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองการถดถอยของประสิทธิภาพการสลายสีย้อม

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		92.11	1.550	59.61	0.000
X1	18.018	9.009	0.773	11.66	0.000
X2	8.172	4.086	0.773	5.29	0.000
X3	-10.835	-5.417	0.773	-7.01	0.000
X4	-4.085	-2.042	0.773	-2.64	0.021
X1X1	-7.22	-3.610	1.160	-3.11	0.009
X2X2	-8.01	-4.000	1.160	-3.46	0.005
X3X3	0.14	0.070	1.160	0.06	0.952
X4X4	-2.93	-1.460	1.160	-1.26	0.231
X1X2	1.22	0.610	1.340	0.46	0.657
X1X3	3.07	1.540	1.340	1.15	0.274
X1X4	0.34	0.170	1.340	0.13	0.902
X2X3	5.21	2.610	1.340	1.95	0.075
X2X4	3.02	1.510	1.340	1.13	0.281
X3X4	-0.44	-0.220	1.340	-0.16	0.872

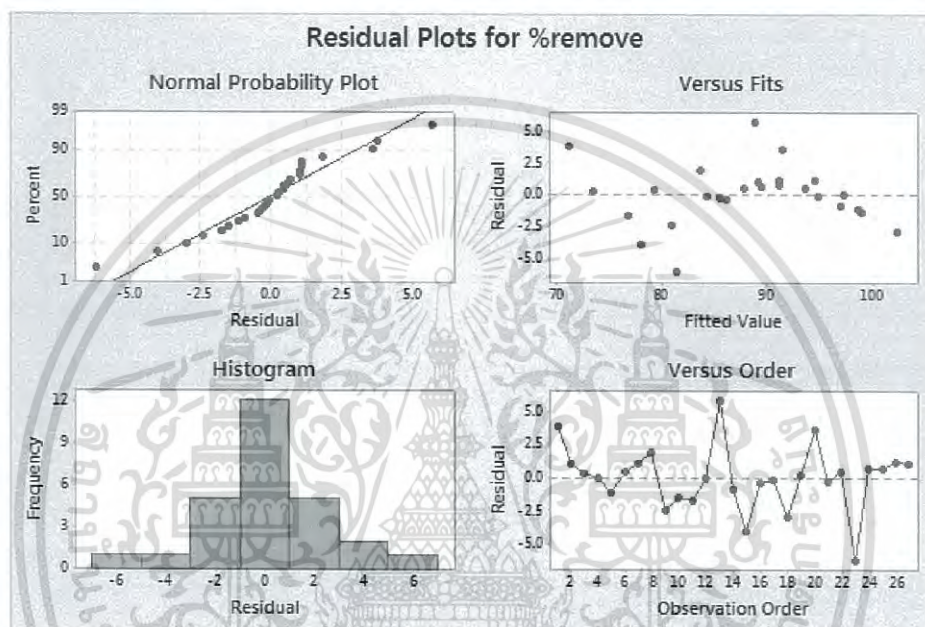
หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือตัวแปรที่มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ออกสามารถสร้างแบบจำลองที่ลดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 4.4

$$\begin{aligned} \% \text{Efficiency} = & 91.178 + 9.009 X_1 + 4.086 X_2 - 5.417 X_3 - 2.042 X_4 \\ & - 3.26 X_1 X_1 - 3.66 X_2 X_2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ซึ่งความเหมาะสมของแบบจำลองที่ลดรูปสำหรับค่า %Efficiency ในสมการ พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 92.07

4.5.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองพหุนามอันดับสองจากกราฟ Residual plot แสดงดังรูปที่ 4.8 จากกราฟ Normal probability plot พบว่าลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จากกราฟ Residual กับ Fitted value ไม่พบรูปแบบการกระจายตัวมีลักษณะเป็นแนวโน้ม แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน และตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ Residual กับ Order พบการกระจายแบบไม่มีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

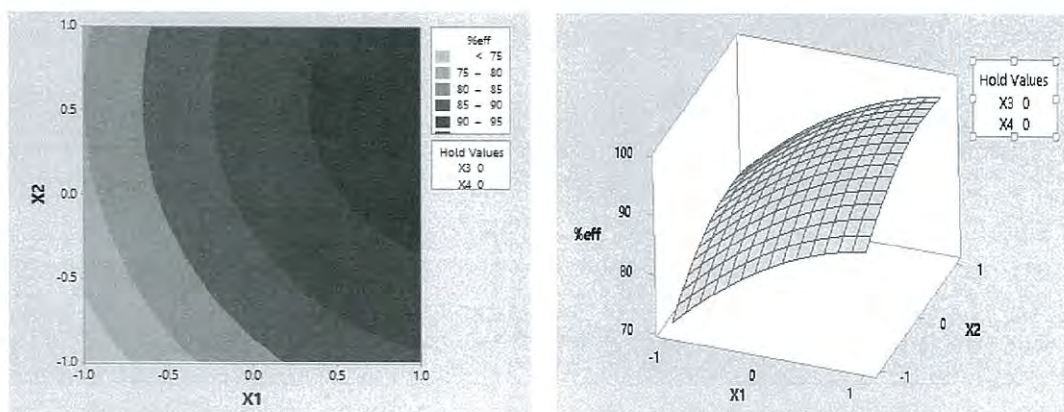


รูปที่ 4.8 Residual plot

4.5.4 ภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน

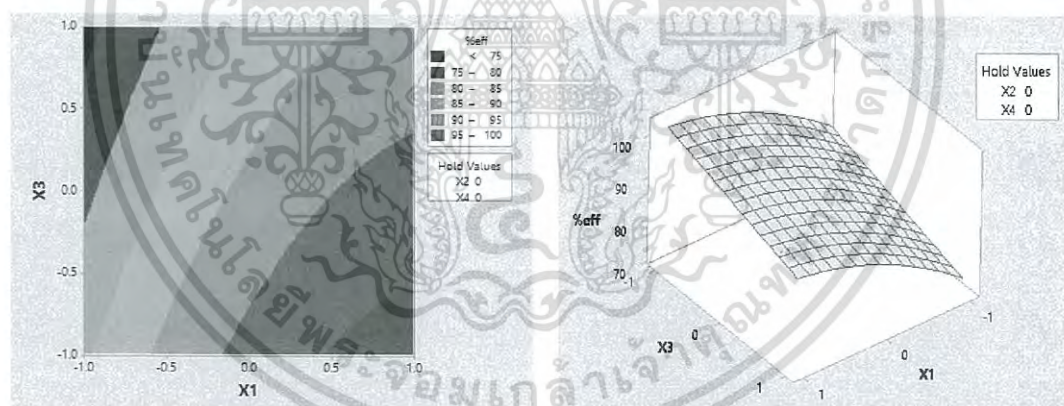
การหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์หาได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญซึ่งก็คือ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.14

ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวตอบสนองระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 190-240 ppm และความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ในช่วง 400-600 ppm มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์สูงที่สุด ในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์ 95-100 % แสดงดังรูปที่ 4.9



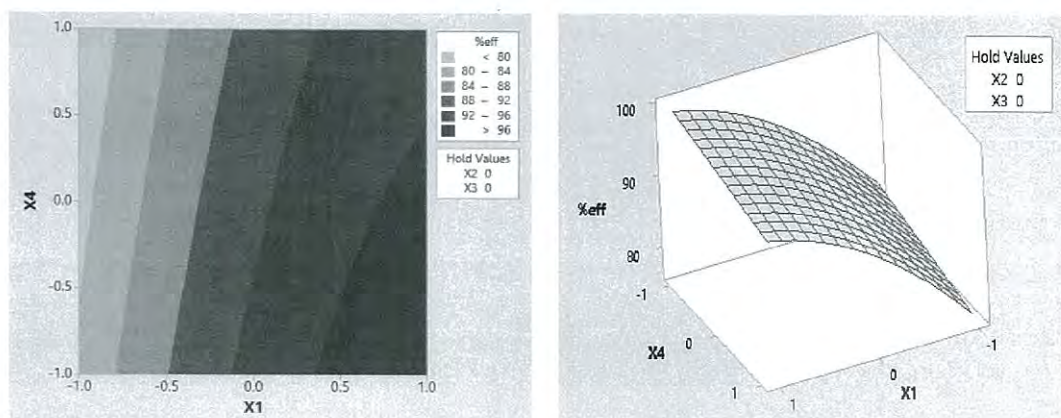
รูปที่ 4.9 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวดตอบสนองระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 190-240 ppm และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ในช่วง 150-170 ppm มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงที่สุดในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 100 % แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์

ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวดตอบสนองระหว่างความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่าพีเอช ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 185-240 ppm และค่าพีเอช ในช่วง 3-6 มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงที่สุดในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์มากกว่า 96 % แสดงดังรูปที่ 4.11



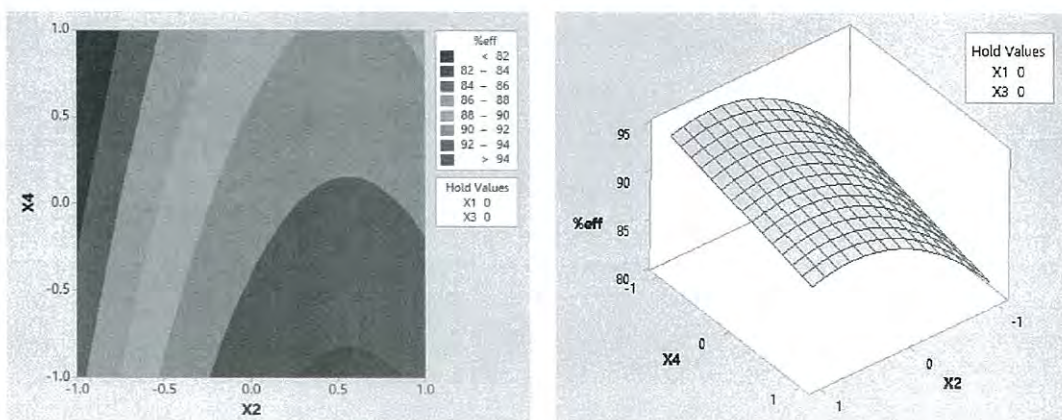
รูปที่ 4.11 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และค่าพีเอช

ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวดูตอบสนองระหว่างความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 กับความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ในช่วง 430-600 ppm และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ในช่วง 150-165 ppm มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงที่สุดในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์มากกว่า 96 % แสดงดังรูปที่ 4.12



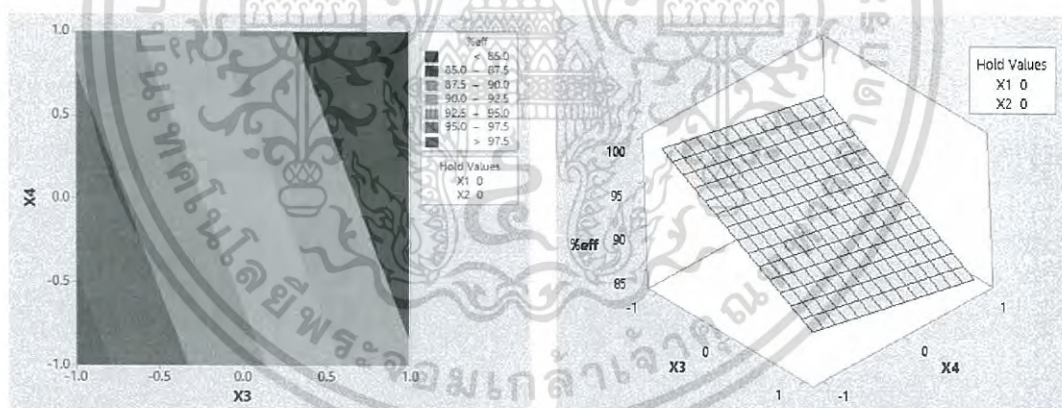
รูปที่ 4.12 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์

ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวดูตอบสนองระหว่างความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 กับค่าพีเอช ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ในช่วง 490-570 ppm และค่าพีเอช ในช่วง 3.0-3.3 มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงที่สุดในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์มากกว่า 94 % แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่าง ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ และค่าพีเอช

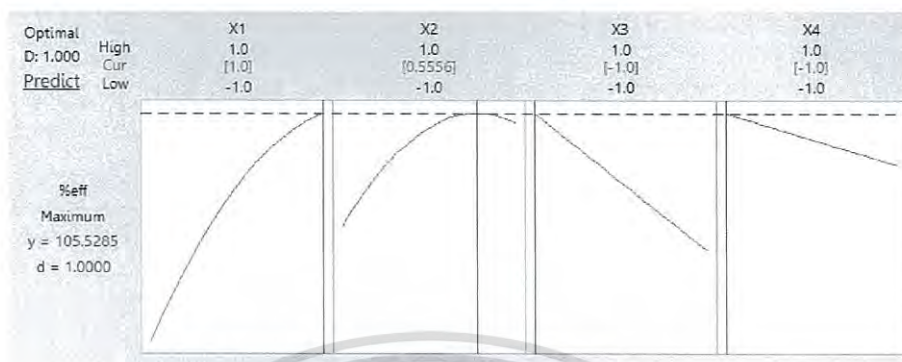
ความสัมพันธ์เชิงพื้นผิวตอบสนองระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์กับค่าพีเอช ของประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ในช่วง 150-160 ppm และค่าพีเอช ในช่วง 3.0-4.1 มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงที่สุด ในช่วงภาวะดังกล่าวให้ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์มากกว่า 97.5 % แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟ Contour plot และ Surface plot ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ และค่าพีเอช

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองสามารถระบุภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้แค่เป็นช่วง ดังนั้นเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ชัดเจนจึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ Response Optimization แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าถ้าต้องการให้สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้สูงที่สุด จะต้องเลือกใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (X_1) = 240 ppm ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ (X_2) = 530 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม

เมทิลลอเรนจ์ (X_3) = 150 ppm และ ค่าพีเอช (X_4) = 3 ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการการสลายสีของเมทิลลอเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตันได้สูงที่สุด คือ 100 %



รูปที่ 4.15 Optimization Plot

เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม Minitab โดยทำการทดลองที่ภาวะดังกล่าวสามารถสลายสีได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลลอเรนจ์ที่ภาวะที่เหมาะสม

Run No.	1	2	3	4	5
%Eff.	99.60	99.66	99.52	99.62	99.56

จากตารางที่ 4.5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 สามารถสลายสีได้เฉลี่ย 99.6 % คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.4 % เทียบกับแบบจำลอง ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก จากนั้นได้ทำการทดลองที่ภาวะอื่นเพื่อทดสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองจริง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลลอเรนจ์ที่ภาวะอื่นๆ

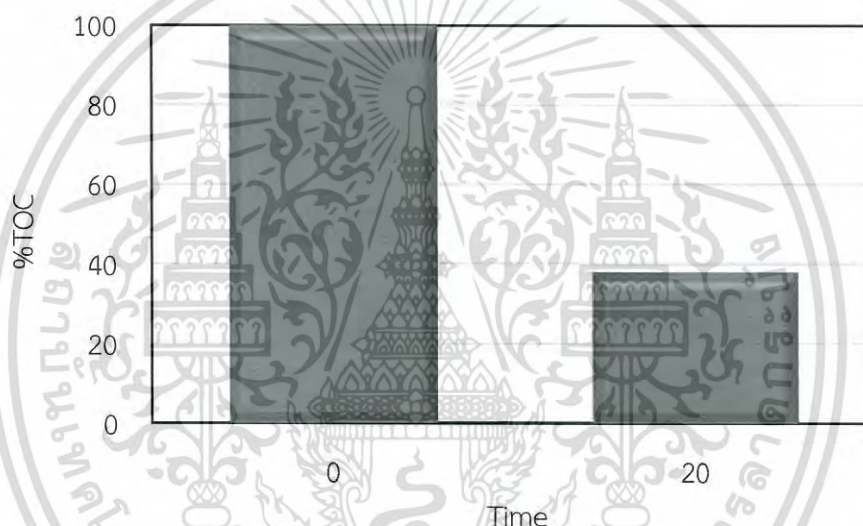
No.	Factor				%Efficiency (Model)	%Efficiency (Experiment)	Error
	[H ₂ O ₂]	[Fe/TiO ₂]	[MO]	pH			
1	80	300	200	5	71.6	73.5	2.2%
						72.9	
2	160	450	250	7	83.7	86.5	2.8%
						85.5	
3	160	450	150	3	98.6	97.5	1.4%
						96.9	

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยืนยันได้ว่าแบบจำลองการสลายสีของเมทิลลอเรนจ์สามารถนำไปใช้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวม

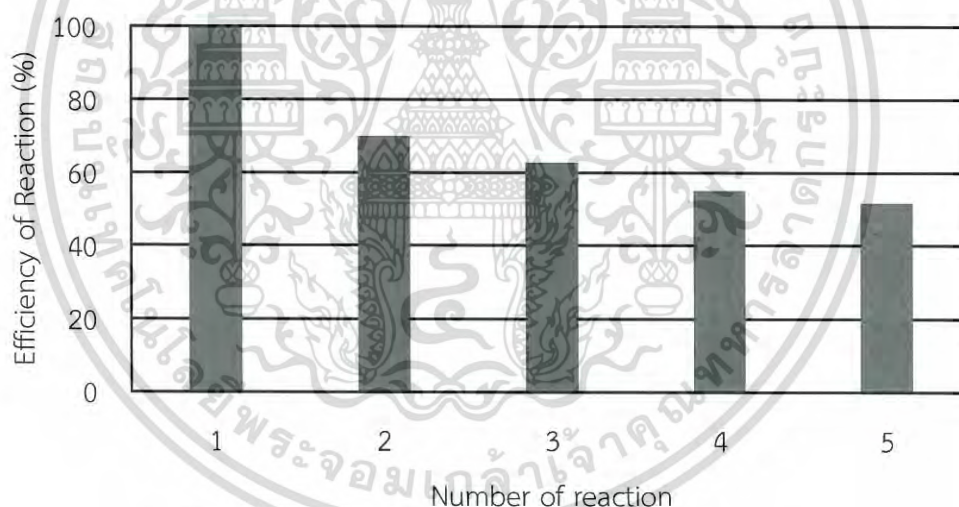
ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ศึกษาที่ภาวะที่ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมสูงสุด 99.6 % คือที่สภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ 530 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และ ค่าพีเอช 3 เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที นำสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันมาวิเคราะห์หาค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมด้วยเครื่อง Total Organic Carbon (TOC) แสดงดังรูป 4.16 พบว่าค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมของสารละลายก่อนทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 100 % ต่อมานำสารละลายที่ผ่านการสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันมีค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม 38 % แสดงว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ สูงถึง 62 %



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

4.7 การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

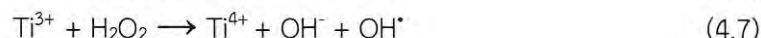
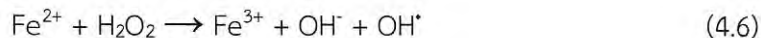
ในการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ โดยศึกษาภาวะที่ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมสูงสุด คือที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 ppm ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ 530 ppm ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และ ค่าพีเอช 3 ที่เวลา 20 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ในครั้งที่ 1 (ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน) เท่ากับ 99.6 % จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำโดยทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันที่ภาวะเดิม แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ในครั้งที่ 2 3 4 และ 5 ลดลง โดยมีประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเท่ากับ 70.0% 62.9% 55.1% และ 51.7% ตามลำดับ ปฏิกิริยาในครั้งที่ 1 มีประสิทธิภาพการสลายสีย้อมสูงถึง 99.6% มีค่าสูง อาจเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาเอกพจน์และวิวิธพจน์ร่วมกัน ในส่วนของปฏิกิริยาเอกพจน์เกิดจากปริมาณเหล็กที่หลุดออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตรวจวัดได้ที่ความเข้มข้น 1 ppm ในส่วนของปฏิกิริยาครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการสลายสีย้อมต่ำลงเท่ากับ 70% วิเคราะห์ปริมาณเหล็กในสารละลายหลังเกิดปฏิกิริยาครั้งที่ 2 พบว่ามีเหล็กปนอยู่ 0.8 ppm ปริมาณเหล็กที่หลุดมีแนวโน้มลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาในครั้งที่ 3 4 และ 5 มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.17 การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

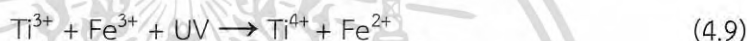
กลไกในการสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่าง เพอร์ร็อกไซด์ไอออน (Fe²⁺) และไทเทเนียมไอออน (Ti³⁺) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะได้ไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH[•]) ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6



และสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้อีกด้วยการฉายรังสี UV ซึ่งแสงจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันของเพอร์ริกไอออน (Fe³⁺) ทำให้ได้ เพอร์ร็อกไซด์ไอออน (Fe²⁺) หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ดังสมการที่ 4.7



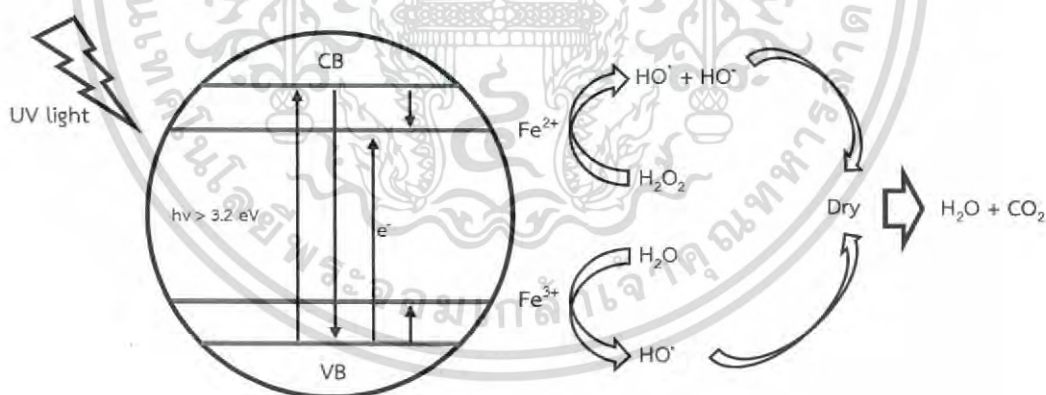
ไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV อิเล็กตรอนจากชั้น Valence bande จะถูกกระตุ้นไปยังชั้น Conduction bande เมื่อตกกลับลงมา เหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอนไว้ (Electron sink) ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวกได้เร็ว และสามารถเปลี่ยนเพอร์ริกไอออน (Fe³⁺) กลายเป็นเพอร์ร็อกไซด์ไอออน (Fe²⁺) ได้ ดังสมการที่ 4.8



ซึ่งไฮดรอกซิลแรดิคัล จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ดังสมการที่ 4.9



โดยสามารถสรุปกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้หาภาวะเหมาะสมของการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์บนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยเริ่มต้นศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดดังนี้ TiO₂, Fe/TiO₂ และ FeSO₄ ซึ่ง FeSO₄ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา FeSO₄ สามารถสลายสีย้อมได้ถึง 99% และ TiO₂ ที่ไม่ผ่านการเติมเหล็ก มีประสิทธิภาพต่ำสุดสามารถสลายสีย้อมได้ 65% จากนั้นศึกษาผลของการเติมเหล็กบนตัวรองรับ TiO₂ ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %ของน้ำหนักตัวรองรับ พบว่าที่ความเข้มข้นเหล็ก 10 %ของน้ำหนักตัวรองรับมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ที่ความเข้มข้นเหล็ก 10 %ของน้ำหนักตัวรองรับศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน โดยปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 6 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ ค่าพีเอช ความเร็วรอบการปั่นกววน และความเข้มแสงยูวี โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial design พบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน คือ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเมทิลออเรนจ์ ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ และ ค่าพีเอช ตามลำดับ และศึกษาหาภาวะที่สลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box Benken สามารถสร้างสร้างแบบจำลองพหุนามอันดับสองได้ดังนี้ %Efficiency = 91.178 + 9.009X₁ + 4.086X₂ - 5.417X₃ - 2.042X₄ - 3.26X₁X₁ - 3.66X₂X₂ ซึ่งจากแบบจำลองในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน สามารถสลายสีย้อมได้ 100 % เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 240 ppm ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂ 530 ppm ความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์ 150 ppm และค่าพีเอชของสีย้อมเท่ากับ 3 ตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองโดยการทำการทดลองซ้ำที่ภาวะดังกล่าว 5 การทดลองพบว่า ที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถสลายสีได้เฉลี่ย 99.6 % คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.04 % เมื่อเทียบกับแบบจำลอง วิเคราะห์หาค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ของสารละลายหลังทำปฏิกิริยาที่สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวมเท่ากับ 62 % และจากการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ 5 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ลดลงเท่ากับ 99.6% 70.0% 62.9% 55.1% และ 51.7% ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการส่งออก กระทรวงพาณิชย์. “อุตสาหกรรมฟอกย้อม.” [Online]. Available: www2.moc.go.th.2553.
- [2] บุษรา ประชุมญาติ. “การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโนไฮไดรด์.” คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [3] วรณวิภา ผลาหาญ. “การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก.” สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [4] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- [5] Kai Yang, Xiang Zhang, Cong Chao, Bing Zhang and Jindun Liu. “In-situ preparation of NaA zeolite/chitosan porous hybrid beads for removal of ammonium from aqueous solution” **Carbohydrate Polymers**. Vol.107, 2014. pp. 103–109.
- [6] Tung Xuan Bui, Seo-Young Kang, Sang-Hyup Lee and Heechul Choi. “Organically functionalized mesoporous SBA-15 as sorbents for removal of selected pharmaceuticals from water” **Journal of Hazardous Materials**. Vol.193, 2011. pp. 156–163
- [7] Annachhatre A.P. and Gheewala S.H. “Biodegradation of Chlorinated Phenolic Compounds” **Biotechnol Adv.** Vol.14, 1996. pp. 35–56.
- [8] Rzesutek K. and Chow A. “Extraction of phenols using polyurethane membrane” **Talanta**. Vol.46, 1998. pp. 507–519.
- [9] Bae S., Kim D. and Lee W. “Degradation of diclofenac by pyrite catalyzed Fenton oxidation” **Environ.** Vol.134, 2013. pp. 93–102.
- [10] 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.
- [11] Jiraporn Damchan. “The Development of Nano Coating Material of $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2/\text{X}$.” A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Materials Engineering, Prince of Songkla University. 2551.
- [12] K. Umar, M.M. Haque, M. Muneer, T. Harada and M. Matsumura. “Mo, Mn and La doped TiO_2 : Synthesis, characterization and photocatalytic activity for the decolourization of three different chromophoric dyes” **Journal of Alloys and Compounds**. Vol.578, 2013. pp. 431–438.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Copyright. “Thai Waste Exchange.” [Online]. Available: http://www.thaiwasteexchange.net/detail_knowledge.php?kid=37. 2009.
- [14] กัณทริย์ ศรีพงศ์พันธุ์. “มลพิษทางน้ำ.” [Online]. Available: http://cyberlab.lh1.ku.ac.th/elearn/faculty/fisher/fi16/page_9.htm. 2540.
- [15] ขนิษฐา. “สีย้อม.” [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=3&read=true&count=true. 2007.
- [16] Copyright. “เมทิลออเรนจ์” [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/2556>.
- [17] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. “คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.” [Online]. Available: <http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/index.php/en/2014-10-09-08-12-02/article-1/101-2016-11-15-07-10-54>. 2556.
- [18] Jeerawan Phijarn, Wasana Punchon, Miki Kanna, Sarawut Somnam and Sumpun Wongnawa. “การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลินบลู และเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. Vol.20, 2558. pp. 174-185.
- [19] Copyright. “Catalysis.” [Online]. Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/apchemistry2/kinetics/catalyst.htm>. 2010.
- [20] Copyright. “ตัวเร่งปฏิกิริยา.” [Online]. Available: <http://www.google.co.th/search?q=%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%A1%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B9%8C&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEWiDxK-I->. 2017.
- [21] Siamchemi. “ไททาเนียมไดออกไซด์/TiO₂.” [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B9%80%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1%E0%B9%84%E0%B8%94%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%8B%E0%B8%94%E0%B9%8C/>. 2017.
- [22] Yang J, Li D, Wang X, Yang X, and Lu L. “Rapid synthesis of nanocrystalline TiO₂/SnO₂ binary oxides and their photoinduced decomposition of methyl orange.” *Journal of Solid State Chemistry*. Vol.165, 2002. pp. 193-198.
- [23] Copyright. “ไททาเนียมไดออกไซด์.” [Online]. Available: <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>. 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] Zhao L., Han M. and Lian J. "Photocatalytic activity of TiO₂ films with mixed anatase and rutile structures prepared by pulsed laser deposition." **Catalysis Today**. Vol.91, 2007. pp. 101-102
- [25] Hong S. "Synthesis of nanosized TiO₂/SiO₂ particles in the microemulsion and their photocatalytic activity on the decomposition of *p*-nitrophenol." **Catalysis Today**. Vol.87, 2003. pp. 99-105.
- [26] Hou L.R., Yuan C.Z. and Peng Y. "Synthesis and photocatalytic property of SnO₂/TiO₂ nanotubes composites." **Journal of Hazardous Materials**. Vol.139, 2007. pp. 310-315.
- [27] Zheng J., Yu H., Li X. and Shang. "Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ nanostructured thin film with a silver hierarchical configuration." **Applied Surface Science**. Vol.254, 2007. pp. 1630-1635.
- [28] Evans P. and Sheel D.W. "Photoactive and antibacterial TiO₂ thin films on stainless steel." **Surface & coatings Technology**. Vol.201, 2007. pp. 9319-9324.
- [29] Gopal K., Shankar K., Paulose M., Oommen K., Varghese and Craig A. Grimes. "Use of highly-ordered TiO₂ nanotube arrays in dye-sensitized solar cells." **Nano Letters**. Vol.6, 2006. pp. 215-218.
- [30] Montgomery D.C. "Design and Analysis of Experiments." 8th ED. United States: John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [31] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. "การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง." กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 2551.
- [32] Hassan and Hameed. "Heterogeneous Fenton catalysts based on clays, silicas and zeolites" **Applied Catalysis B: Environmental**. Vol.99, 2010. pp. 1-26
- [33] Zhihui Xu, Jianru Liang and Lixiang Zhou. "Photo-Fenton-like degradation of azo dye methyl orange using synthetic ammonium and hydronium jarosite" **Journal of Alloys and Compounds**. Vol.546, 2013. pp. 112-118
- [34] Nemanja Banic, Biljana Abramovic, Jugoslav Krstic, Daniela Sojic, Davor Loncarevic, Zara Cherkezova-Zheleva and Valeria Guzsanyi. "Photodegradation of thiacloprid using Fe/TiO₂ as a heterogeneous photo-Fenton Catalyst" **Applied Catalysis B: Environmental**. Vol.107, 2011. pp. 363-370

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [35] ณัฐกวรรธ ชนประดิษฐ์กุล, วิมลพร เอี่ยมอมรพันธ์, กิติโรจน์ หวันตาหลา, สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์, และอาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์. “Optimization of Acid Dye Degradation by Photo-Fenton Reaction over Fe/Al₂O₃ Catalyst” **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol.29, 2012. pp. 42-47
- [36] Jinzhu Ma, Hong He and Fudong Liu. “A statistical experimental design approach for photochemical degradation of aqueous polyacrylic acid using photo-Fenton-like process” **Applied Catalysis B: Environmental**. Vol.179, 2015. pp. 21–28.
- [37] Barka N, Abdennouri M, Boussaoud A, Galadi A, Balala M, Bensitel M, Sahibed-Dine A, Nohair K, and Sadiq M. “Full factorial experimental design applied to oxalic acid photocatalytic degradation in TiO₂ aqueous suspension” **Arabian Journal of Chemistry**. Vol.7, 2014. pp. 752–757
- [38] ณัฐกวรรธ ชนประดิษฐ์กุล, วิมลพร เอี่ยมอมรพันธ์, กิติโรจน์ หวันตาหลา, สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์, และอาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์. “Optimization of Acid Dye Degradation by Photo-Fenton Reaction Over Fe/Al₂O₃ Catalyst” **Ladkrabang Engineering Journal**. Vol.29, 2012. pp. 42-47



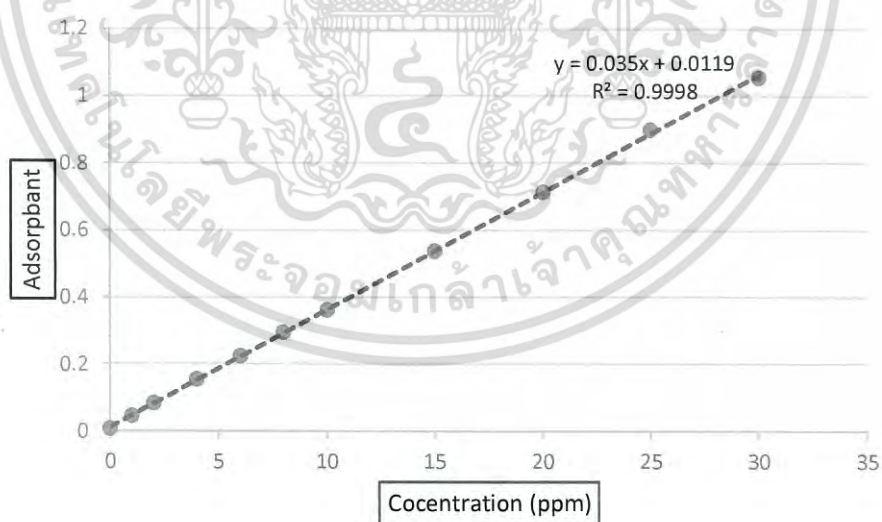
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลอร์เรนจ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน เมทิลอร์เรนจ์ (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.008
1	0.046
2	0.083
4	0.153
6	0.223
8	0.294
10	0.36
15	0.535
20	0.711
25	0.897
30	1.052



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลอร์เรนจ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออร์เรนจ์การออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design และประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์

Std Order	Run Order	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Abs	%Eff
15	1	-1	1	1	1	-1	1	0.063*	85.40
11	2	-1	1	-1	1	-1	-1	0.658	90.77
17	3	-1	-1	-1	-1	1	1	0.101*	68.19
26	4	1	-1	-1	1	1	1	0.100*	68.54
20	5	1	1	-1	-1	1	1	0.393	94.53
9	6	-1	-1	-1	1	-1	1	0.095*	70.33
23	7	-1	1	1	-1	1	1	0.115*	70.54
32	8	1	1	1	1	1	1	0.815	90.82
8	9	1	1	1	-1	-1	1	0.945	89.34
22	10	1	-1	1	-1	1	1	0.150*	60.54
12	11	1	1	-1	1	-1	1	0.282	96.14
16	12	1	1	1	1	-1	-1	0.860	90.31
25	13	-1	-1	-1	1	1	-1	0.095*	70.33
7	14	-1	1	1	-1	-1	-1	0.112*	71.40
29	15	-1	-1	1	1	1	1	0.145*	61.97
27	16	-1	1	-1	1	1	1	0.404	94.40
18	17	1	-1	-1	-1	1	-1	0.100*	68.54
10	18	1	-1	-1	1	-1	-1	0.052*	85.68
13	19	-1	-1	1	1	-1	-1	0.144*	62.26
3	20	-1	1	-1	-1	-1	1	0.055*	84.63
6	21	1	-1	1	-1	-1	-1	0.150*	60.54
1	22	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.098*	69.25
14	23	1	-1	1	1	-1	1	0.142*	62.84
19	24	-1	1	-1	-1	1	-1	0.054*	84.97
2	25	1	-1	-1	-1	-1	1	0.098*	69.25
5	26	-1	-1	1	-1	-1	1	0.157*	58.54
30	27	1	-1	1	1	1	-1	0.139*	63.68
24	28	1	1	1	-1	1	-1	0.774	91.29
31	29	-1	1	1	1	1	-1	0.932	89.48
28	30	1	1	-1	1	1	-1	0.351	95.16
4	31	1	1	-1	-1	-1	-1	0.435	93.96
21	32	-1	-1	1	-1	1	-1	0.167*	55.70

หมายเหตุ: * หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลออร์เรนจ์ที่เจือจาง 25 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออร์เรนจ์การออกแบบการทดลองแบบ Box- Benken และประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออร์เรนจ์

StdOrder	RunOrder	Factors				Abs	%efficiency
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
23	1	0	-1	0	1	0.072*	75.18
22	2	0	1	0	-1	0.629	94.11
7	3	0	0	-1	1	0.196	95.65
6	4	0	0	1	-1	1.015	88.26
26	5	0	0	0	0	0.581	91.87
16	6	0	1	1	0	1.265	85.68
15	7	0	-1	1	0	0.103*	73.97
19	8	-1	0	1	0	0.111*	73.69
14	9	0	1	-1	0	0.217	96.09
9	10	-1	0	0	-1	0.073*	78.54
18	11	1	0	-1	0	0.043	99.41
5	12	0	0	-1	-1	0.188	97.49
13	13	0	-1	-1	0	0.294	94.63
20	14	1	0	1	0	0.441	95.09
3	15	-1	1	0	0	0.083*	79.61
10	16	1	0	0	-1	0.167	97.48
11	17	-1	0	0	1	0.491	75.18
27	18	0	0	0	0	0.551	92.30
12	19	1	0	0	1	0.188	94.79
24	20	0	1	0	1	0.564	90.18
17	21	-1	0	-1	0	0.844	84.15
4	22	1	1	0	0	0.202	97.28
8	23	0	0	1	1	0.067*	85.54
1	24	-1	-1	0	0	0.068*	74.97
25	25	0	0	0	0	0.557	92.21
21	26	0	-1	0	-1	0.101*	85.15
2	27	1	-1	0	0	0.698	90.20

หมายเหตุ: * หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลออร์เรนจ์ที่เจือจาง 25 เท่า

ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออร์เรนจ์ และประสิทธิภาพการสลายสี
ย้อมที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

Run No.	1	2	3	4	5
Abs	0.033	0.030	0.037	0.032	0.035
%Eff.	99.60	99.66	99.52	99.62	99.56

ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออร์เรนจ์ และประสิทธิภาพการสลายสี
ย้อมที่สภาวะอื่นๆ

No.	Factor				%Efficiency (Model)	%Efficiency (Experiment)	Abs
	[H ₂ O ₂]	[Fe/TiO ₂]	[MO]	pH			
1	80	300	200	5	71.6	73.5	0.085*
						72.9	0.089*
2	160	450	250	7	83.7	86.5	0.062*
						85.5	0.066*
3	160	450	150	3	98.6	97.5	0.187
						96.9	0.190

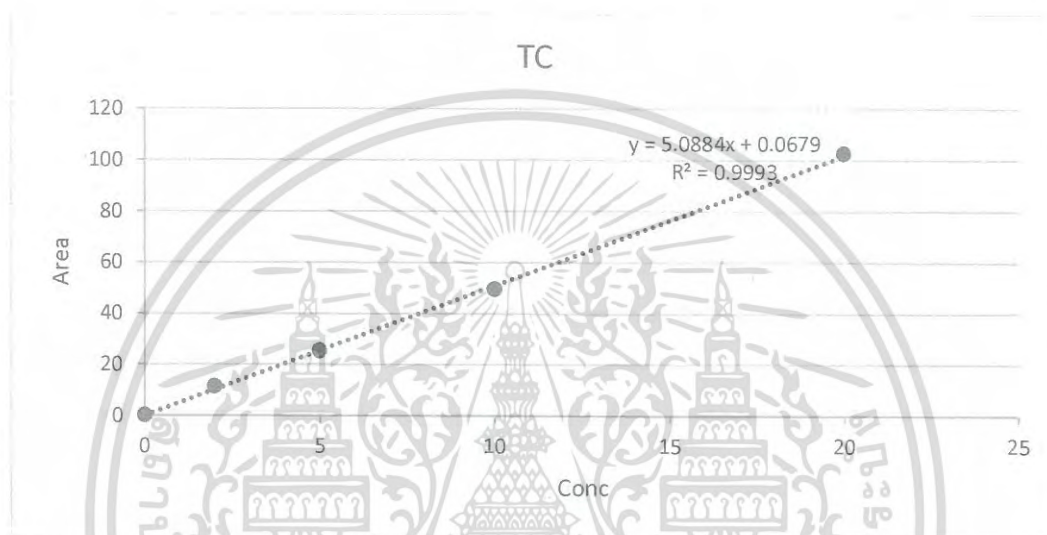
หมายเหตุ: * หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลออร์เรนจ์ที่เจือจาง 25 เท่า

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงปริมาณธาตุหลักที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา 10Fe/TiO₂

ธาตุ	Fe	Ti	O	S
%	9.41	44.30	40.71	5.58

ตารางที่ ก.7 ค่า TC ที่ความเข้มข้นต่างๆ

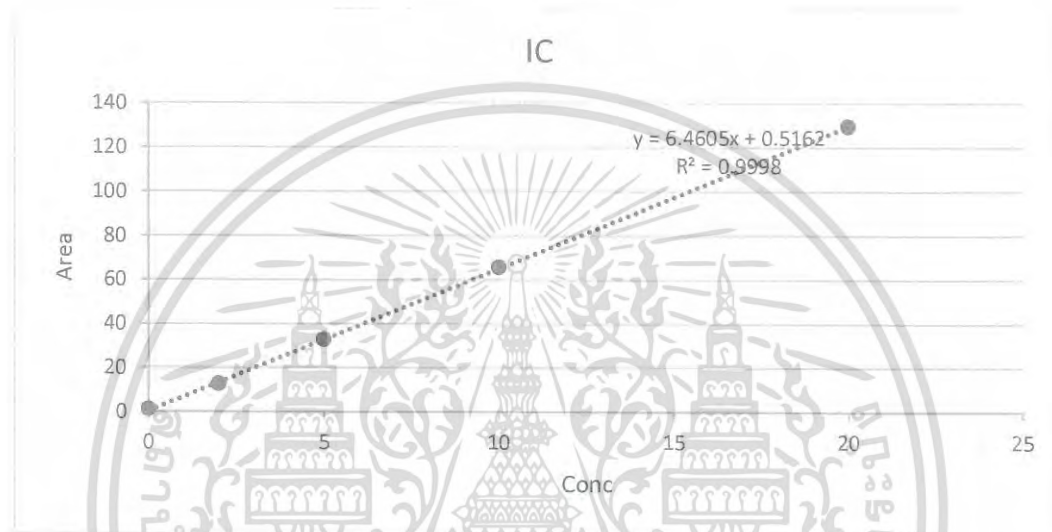
Conc	Area
0	0
2	11.41
5	25.31
10	49.29
20	102.6



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐาน TC ของสารละลายเมทิลอร์เรนจ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ก.8 ค่า IC ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Conc	Area
0	1.19
2	12.48
5	32.75
10	65.6
20	129.6



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐาน IC ของสารละลายเมทิลอร์เรนจ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ก.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์คาร์บอนรวม

No.	Sample	Result
1	Di water	TOC 0.827 mg/L
2	Di water	TOC 0.423 mg/L
3*	สารละลายเมทิลอร์เรนจ์ก่อนเกิดปฏิกิริยา	TOC 4.322 mg/L
4*	สารละลายเมทิลอร์เรนจ์ก่อนเกิดปฏิกิริยา	TOC 4.335 mg/L
5	Di water	TOC 0.894 mg/L
6	สารละลายเมทิลอร์เรนจ์หลังเกิดปฏิกิริยา	TOC 32.43 mg/L
7	สารละลายเมทิลอร์เรนจ์หลังเกิดปฏิกิริยา	TOC 32.84 mg/L
8	Di water	TOC 0.629 mg/L
9	Di water	TOC 0.461 mg/L

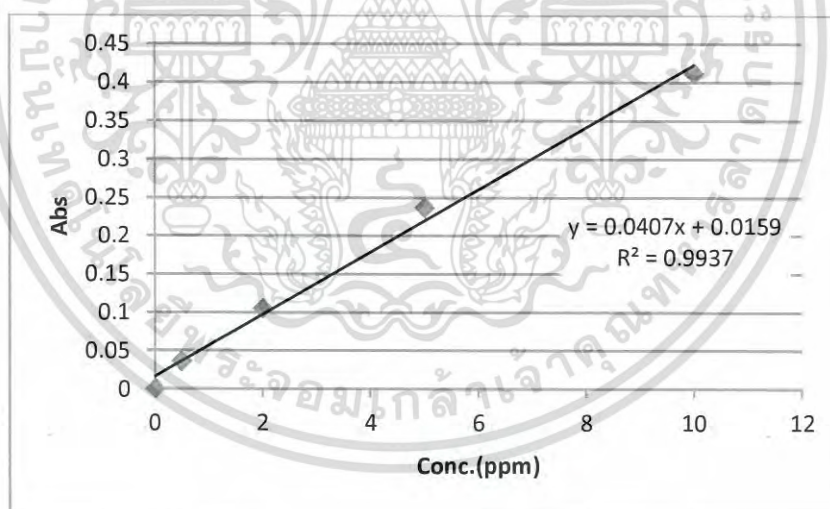
หมายเหตุ: * หมายถึง สารละลายเมทิลอร์เรนจ์ที่เจือจาง 20 เท่า

ตารางที่ ก.10 การนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO₂

Number of reaction	%removal
1	99.6
2	70.0
3	62.9
4	55.1
5	51.7

ตารางที่ ก.10 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็ก ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Fe Conc.(ppm)	Abs
0	0.001
0.5	0.036
2	0.105
5	0.237
10	0.412
15	0.487
20	0.534



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ ก.11 ค่าการดูดกลืนแสงของอะตอมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาในการสลายสีย้อมที่สถานะที่เหมาะสมที่สุด

Run No.	1	2
Abs	0.566	0.048
Fe Conc	1	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

ข.1 การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลออร์เรนจ์

การคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายเมทิลออร์เรนจ์ หาได้จากกราฟมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ ก.1 จากสมการเส้นตรงคือ

$$y = 0.035x + 0.0119$$

เมื่อ x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเมทิลออร์เรนจ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ข.2 คำนวณหาประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์

การคำนวณหาประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของเมทิลออร์เรนจ์เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_t คือ ความเข้มข้นของเมทิลออร์เรนจ์ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลออร์เรนจ์หลังเกิดปฏิกิริยาได้ 0.245 จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการ จะได้ $0.245 = 0.035x + 0.0119$ จะได้ x เท่ากับ 6.66 หมายความว่าสารละลายเมทิลออร์เรนจ์หลังเกิดปฏิกิริยามีความเข้มข้นเท่ากับ 6.66 ppm จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์ (สมมติความเข้มข้นของเมทิลออร์เรนจ์เริ่มต้น 200 ppm) จะได้ $\%Efficiency = (200 - 6.66 / 200) \times 100 = 96.67$
 ประสิทธิภาพการสลายสีของเมทิลออร์เรนจ์เท่ากับ 96.67 %

ข.3 คำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ต้องการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 240 ppm จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30%
ตัวอย่างการคำนวณ

240 ppm คือ มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 240 mg ในสารละลาย 1 L
Specific gravity ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.11 g/cm³

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1.11	g	มีอยู่ในสารละลาย 1	mL
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.24	g	จะมี	$(0.24 \times 1)/1.11 = 0.216$ mL
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	30	mL	มีอยู่ในสารละลาย 100	mL
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.216	mL	จะต้องปิเปต	$(0.216 \times 100)/30 = 0.72$ mL

ดังนั้น หากต้องการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 240 ppm จะต้องปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.72 mL จากขวดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% ลงในสารละลาย 1 L

ข.4 เตรียมสารละลายเหล็กความเข้มข้น 10 %ของน้ำหนักตัวรองรับ TiO₂ ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวรองรับ TiO₂ 10 กรัม จะต้องเติมเหล็ก 1 กรัม

มวลโมเลกุลเหล็ก 55.8 g/mol

มวลโมเลกุล FeSO₄ 7H₂O 278 g/mol

เหล็ก	55.8	g/mol	มีอยู่ใน FeSO ₄ 7H ₂ O	278	g/mol
ต้องการเหล็ก	1	g	ต้องตักจาก FeSO ₄ 7H ₂ O	$(278 \times 1)/55.8 = 4.98$	g

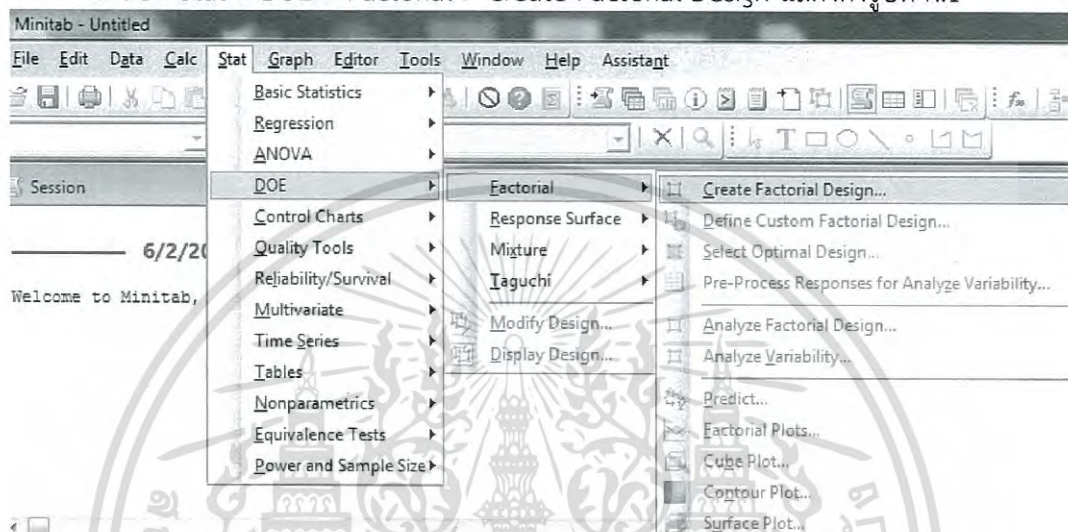
ดังนั้น ต้องตักสาร FeSO₄ 7H₂O 4.98 g ละลายในน้ำ แล้วค่อยๆหยดลงบนตัวรองรับ TiO₂ 10 กรัม

ภาคผนวก ค

การออกแบบการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab

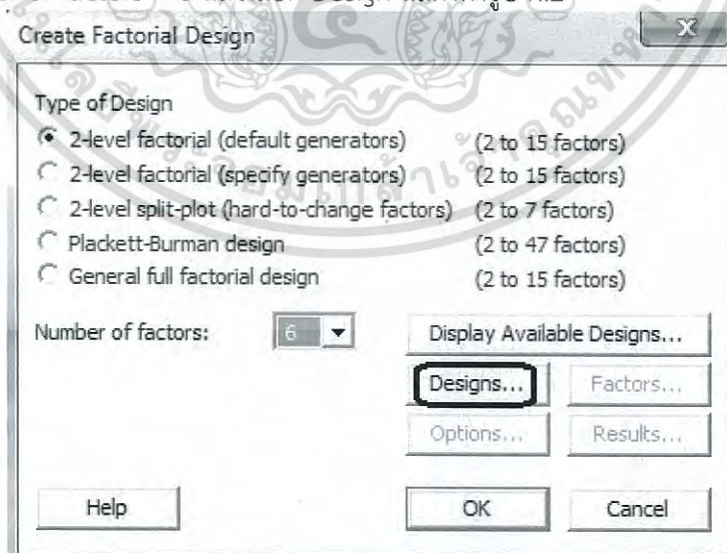
ค.1 การใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

1. เลือก Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

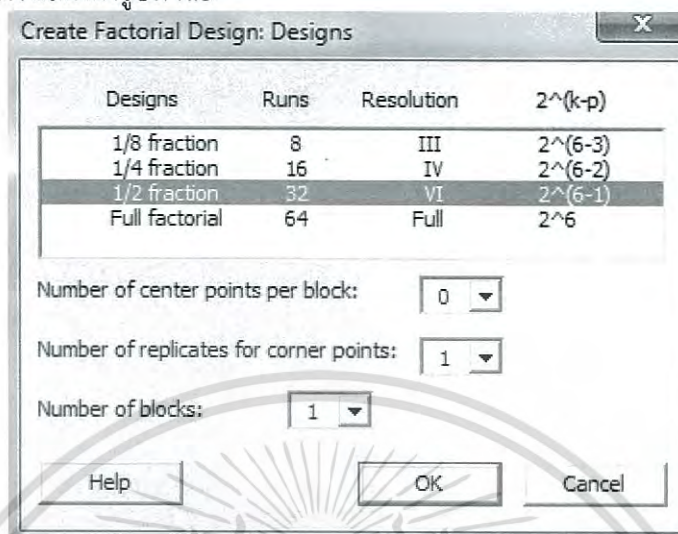
2. ที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก 2-level factorial (default generators) และใส่ Number of factors = 6 แล้วเลือก Design แสดงดังรูป ค.2



รูปที่ ค.2 การเลือกจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบแฟคทอเรียล

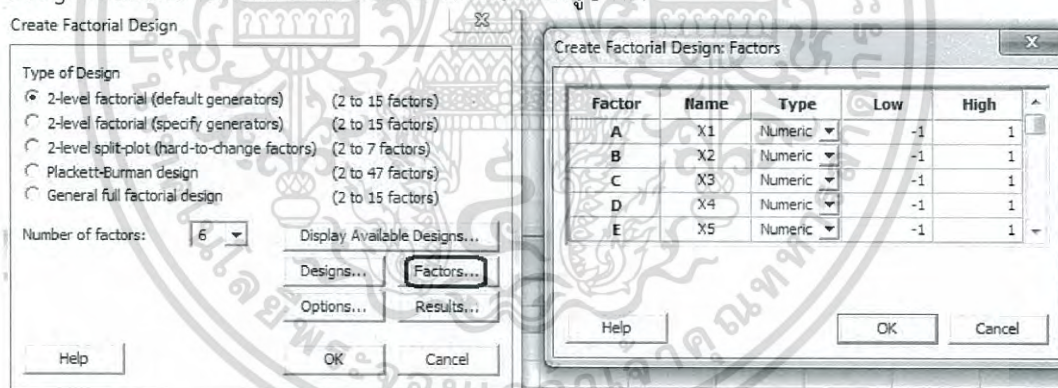
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Designs เลือก fraction และเลือกจำนวนครั้งการทดลอง แล้วกด OK แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

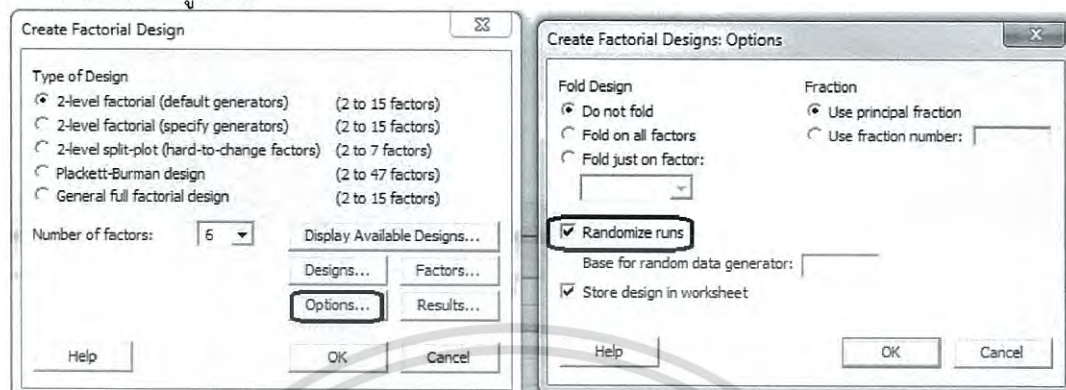
4. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก Factor ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Factors พิมพ์ชื่อปัจจัย แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.4



รูปที่ ค.4 การกำหนดชื่อปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก Options หน้าต่าง Create Factorial Design: Options เลือก Randomize runs เพื่อลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.5



รูปที่ ค.5 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

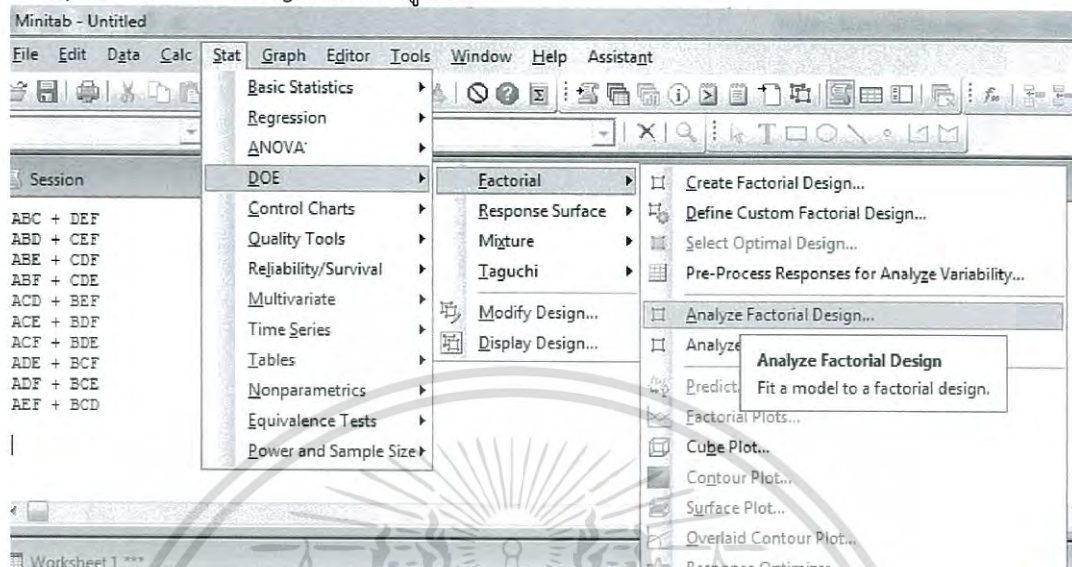
6. กลับมาที่หน้าต่าง Create Factorial Design เลือก OK เพื่อสร้างตารางการออกแบบการทดลอง จะได้ตารางการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นดำเนินการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมารอค่าใส่ตาราง แสดงดังรูป ค.6

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	X1	X2	X3	X4	X5	X6	%Efficiency
1	14	1	1	1	0.5	60	250	3	-1	1	62.84
2	21	2	1	1	0.3	60	250	7	1	-1	55.70
3	2	3	1	1	0.5	60	200	7	-1	1	69.25
4	20	4	1	1	0.5	200	200	7	1	1	94.53
5	1	5	1	1	0.3	60	200	7	-1	-1	69.25
6	3	6	1	1	0.3	200	200	7	-1	1	84.63
7	15	7	1	1	0.3	200	250	3	-1	1	85.40
8	18	8	1	1	0.5	60	200	7	1	-1	68.54
9	32	9	1	1	0.5	200	250	3	1	1	90.82
10	24	10	1	1	0.5	200	250	7	1	-1	91.29
11	10	11	1	1	0.5	60	200	3	-1	-1	85.68
12	31	12	1	1	0.3	200	250	3	1	-1	89.18
13	9	13	1	1	0.3	60	200	3	-1	1	70.33
14	7	14	1	1	0.3	200	250	7	-1	-1	71.40
15	17	15	1	1	0.3	60	200	7	1	1	68.19
16	22	16	1	1	0.5	60	250	7	1	1	60.54
17	13	17	1	1	0.3	60	250	3	-1	-1	62.26
18	4	18	1	1	0.5	200	200	7	-1	-1	93.96
19	29	19	1	1	0.3	60	250	3	1	1	61.97
20	23	20	1	1	0.3	200	250	7	1	1	70.54
21	30	21	1	1	0.5	60	250	3	1	-1	63.68
22	5	22	1	1	0.3	60	250	7	-1	1	58.54
23	12	23	1	1	0.5	200	200	3	-1	1	96.14

รูปที่ ค.6 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

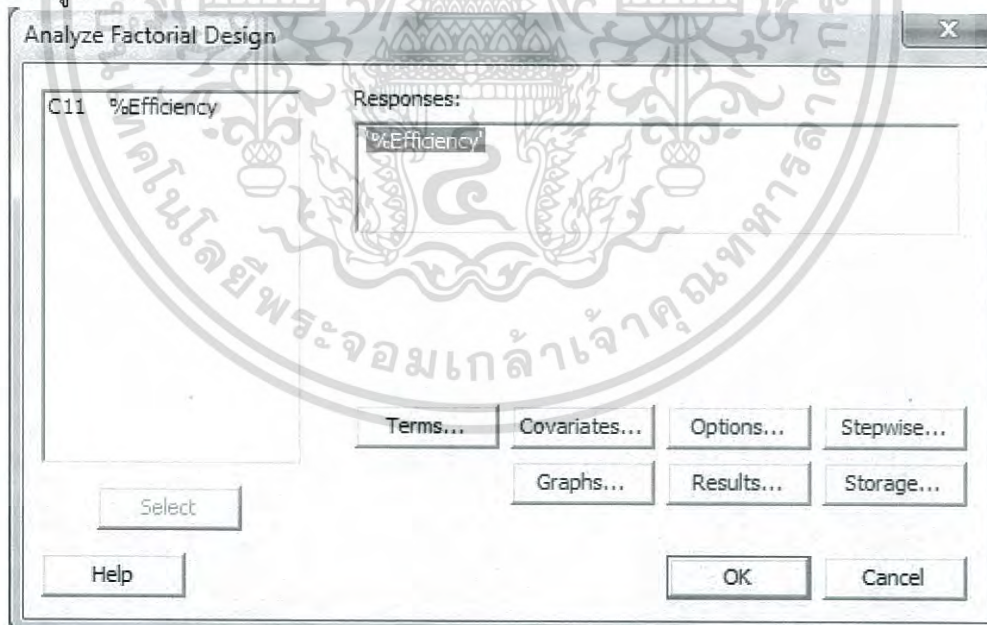
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Factorial > Analyze Factorial Design แสดงดังรูป ค.7



รูปที่ ค.7 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Fractional factorial design

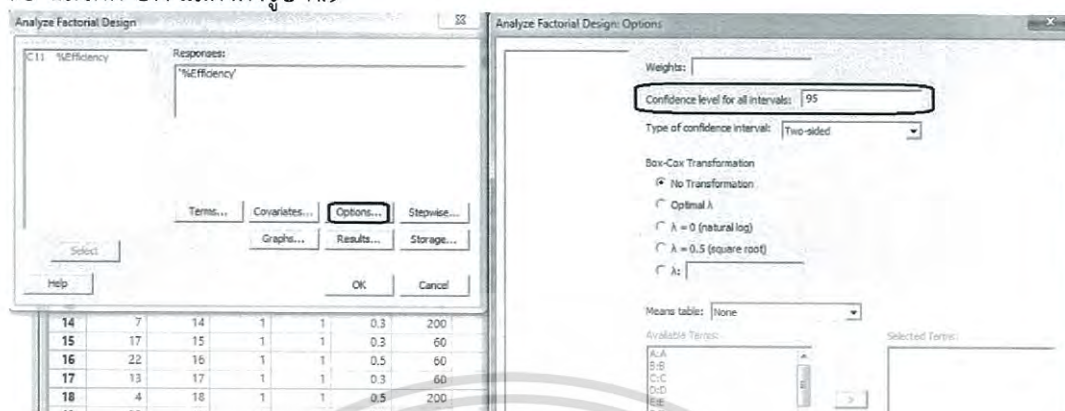
8. ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก Responses %efficiency แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.8



รูปที่ ค.8 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล

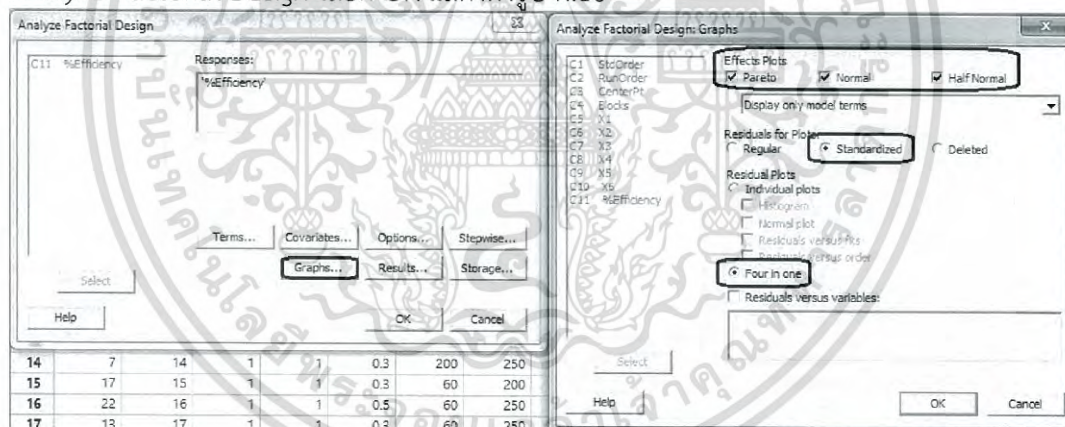
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ ค.9 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล

10. กลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก Graphs ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design: Graphs สำหรับ Effects Plots เลือกทั้ง Pareto, Normal และ Half Normal สำหรับ Residual Plot เลือก Standardized และ Four in one แล้วกด OK เมื่อกลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก OK แสดงดังรูป ค.10

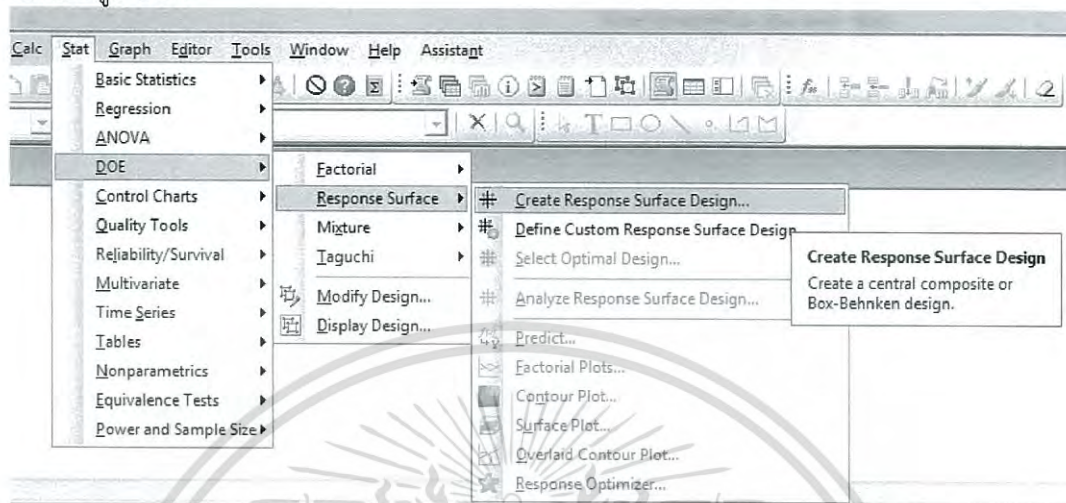


รูปที่ ค.10 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

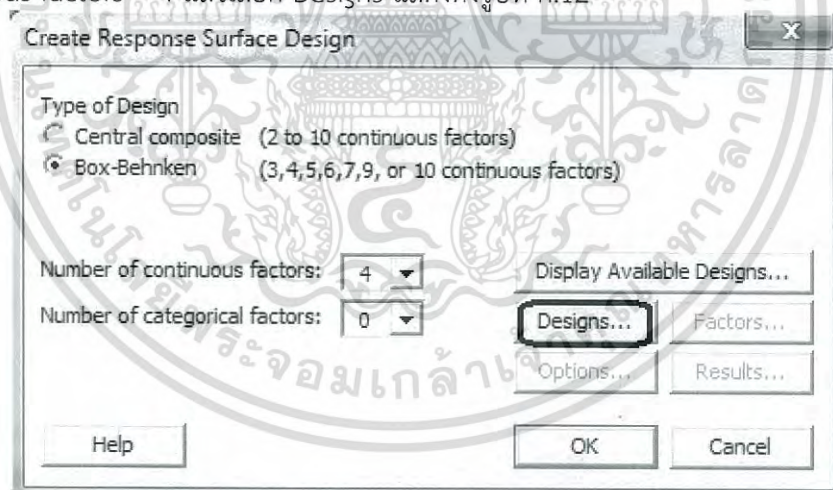
ค.2 การใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

1. เลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design แสดงดังรูป ค.11



รูปที่ ค.11 การสร้างแผนการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

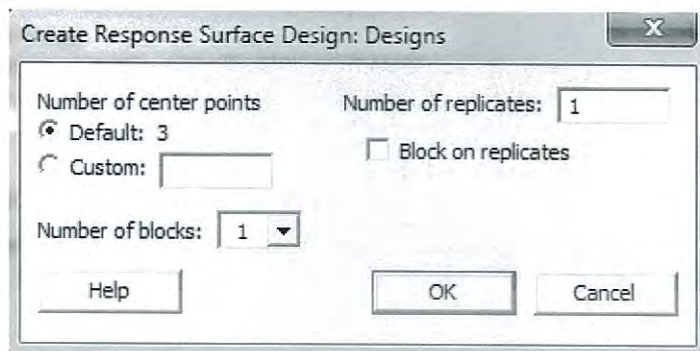
2. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Box-Behnken และใส่ Number of continuous factors = 4 แล้วเลือก Designs แสดงดังรูปที่ ค.12



รูปที่ ค.12 การเลือกการออกแบบการทดลองและจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

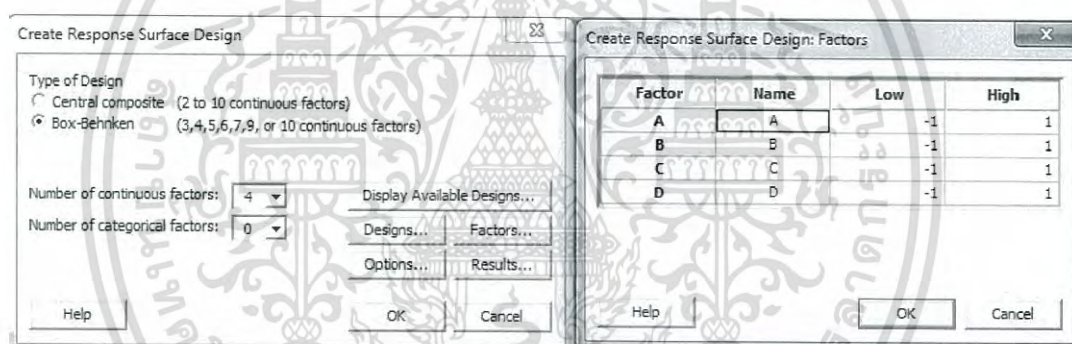
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่หน้าต่าง Create Response Surface Design: Design เลือก Default = 3 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.13



รูปที่ ค.13 การเลือกการทดลองแบบ Box-Behnken

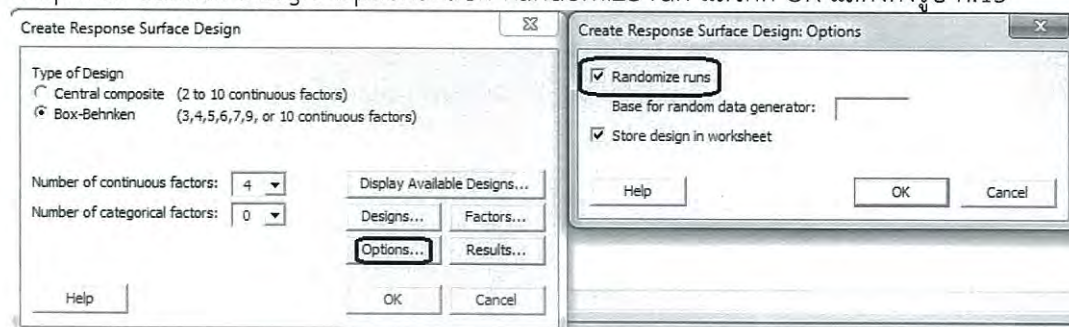
4. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก Factors ที่หน้าต่าง Create Factorial Design: Factors แล้วพิมพ์ชื่อปัจจัย แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.14



รูปที่ ค.14 การกำหนดชื่อปัจจัยที่ใช้ในการทำลองแบบ Box-Behnken

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.15



รูปที่ ค.15 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

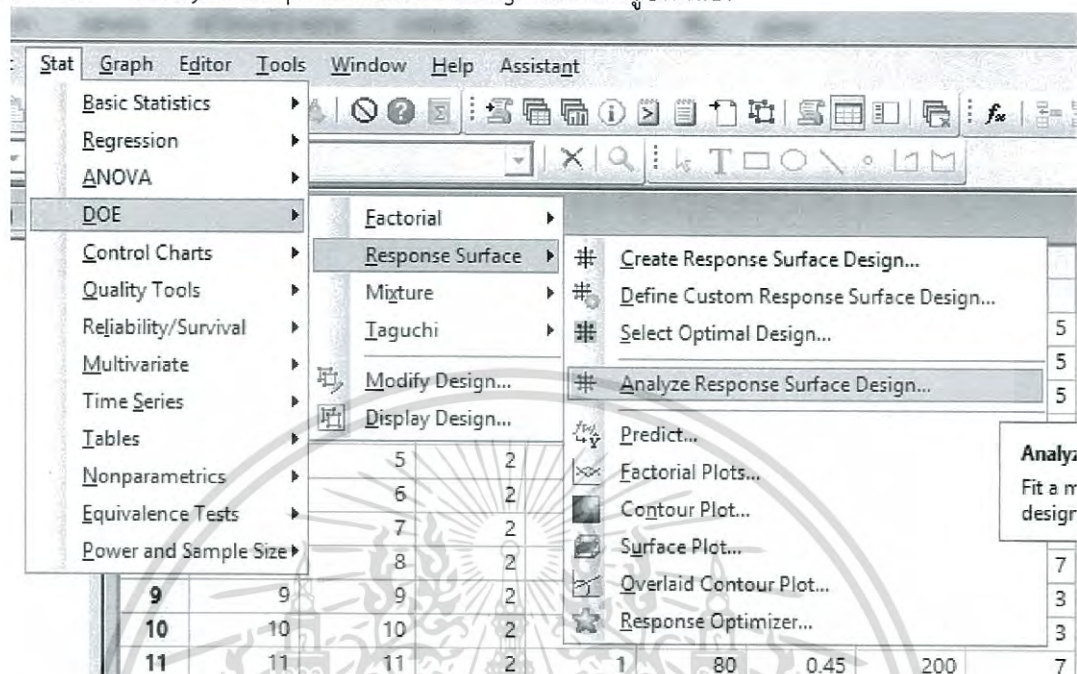
6. กลับมาที่หน้าต่าง Create Response Surface Design เลือก OK เพื่อสร้างตารางการออกแบบการทดลอง จะได้ตารางการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นดำเนินการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากรอกค่าลงในตาราง แสดงดังรูป ค.16

Worksheet3 ***									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	X1	X2	X3	X4	%remove
1	1	1	2	1	80	0.30	200	5	74.97
2	2	2	2	1	240	0.30	200	5	90.20
3	3	3	2	1	80	0.60	200	5	79.61
4	4	4	2	1	240	0.60	200	5	97.28
5	5	5	2	1	160	0.45	150	3	97.49
6	6	6	2	1	160	0.45	250	3	88.26
7	7	7	2	1	160	0.45	150	7	95.65
8	8	8	2	1	160	0.45	250	7	85.54
9	9	9	2	1	80	0.45	200	3	78.54
10	10	10	2	1	240	0.45	200	3	97.48
11	11	11	2	1	80	0.45	200	7	75.18
12	12	12	2	1	240	0.45	200	7	94.79
13	13	13	2	1	160	0.30	150	5	94.63
14	14	14	2	1	160	0.60	150	5	96.09
15	15	15	2	1	160	0.30	250	5	73.97
16	16	16	2	1	160	0.60	250	5	85.68
17	17	17	2	1	80	0.45	150	5	84.15
18	18	18	2	1	240	0.45	150	5	99.41
19	19	19	2	1	80	0.45	250	5	73.69
20	20	20	2	1	240	0.45	250	5	95.09
21	21	21	2	1	160	0.30	200	3	85.15
22	22	22	2	1	160	0.60	200	3	94.11
23	23	23	2	1	160	0.30	200	7	75.18

รูปที่ ค.16 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

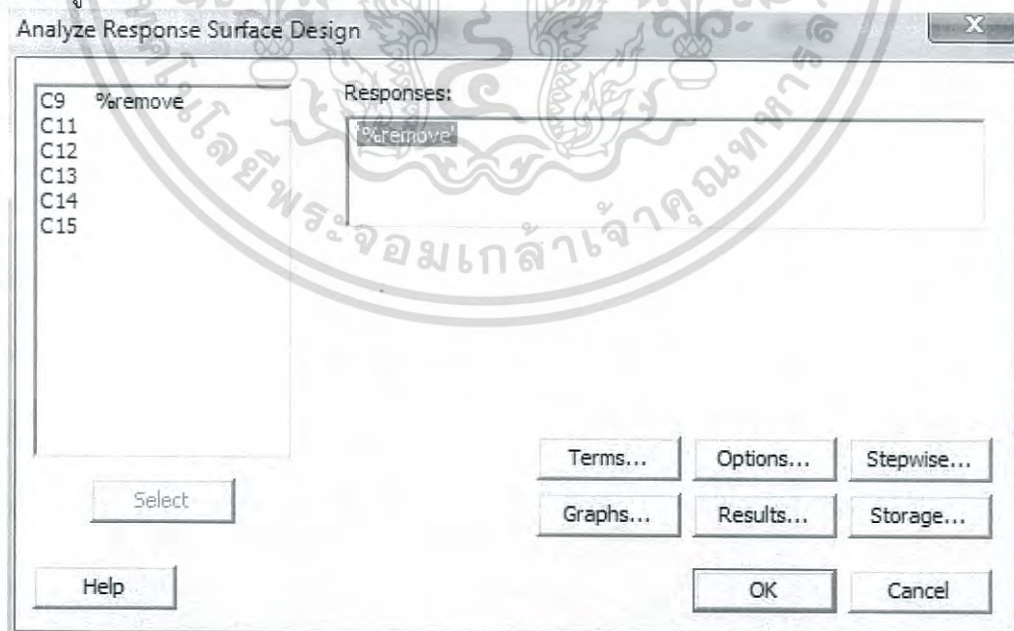
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface design แสดงดังรูปที่ ค.17



รูปที่ ค.17 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

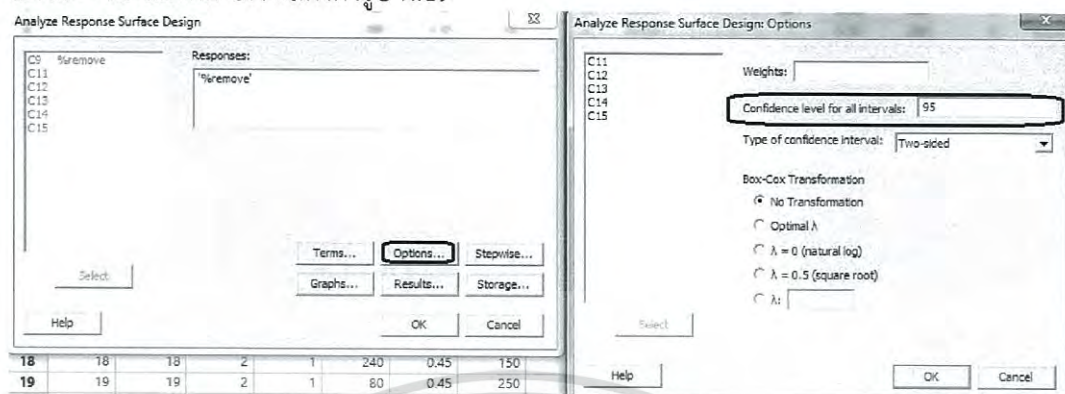
8. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Response %remove แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.18



รูปที่ ค.18 การเลือกตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ข้อมูล

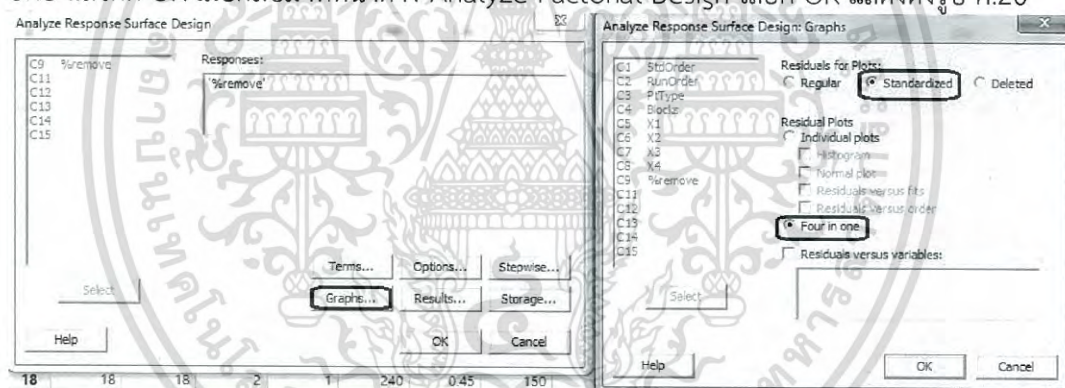
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Options แล้วเลือก Confidence level = 95 แล้วกด OK แสดงดังรูป ค.19



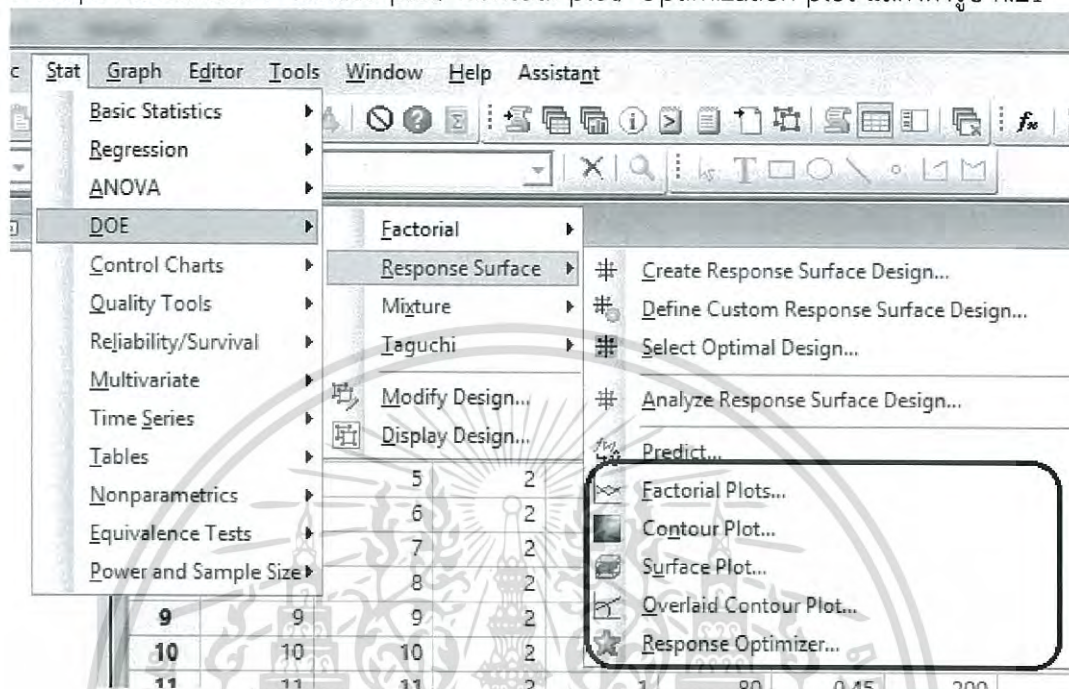
รูปที่ ค.19 การเลือกช่วงความเชื่อมั่นในการวิเคราะห์ข้อมูล

10. กลับมาที่หน้าต่าง Analyze Response Surface Design เลือก Graphs ที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design: Graphs สำหรับ Residual Plot เลือก Standardized และ Four in one แล้วกด OK เมื่อกลับมาที่หน้าต่าง Analyze Factorial Design เลือก OK แสดงดังรูป ค.20



รูปที่ ค.20 การเลือกกราฟเพื่อแสดงผลการวิเคราะห์

11. หาสมการที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยดูจากกราฟ Surface plot กราฟ Contour plot และ Optimization plot เลือกคำสั่งดังนี้ Stat > DOE > Response Surface > Surface plot/ Contour plot/ Optimization plot แสดงดังรูป ค.21



รูปที่ ค.21 การวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมของปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิทยา กรอบทอง
วัน เดือน ปีเกิด	27 พฤษภาคม 2534 ที่พระนครศรีอยุธยา
ที่อยู่	11/3 หมู่ 8 ตำบลบางซ้าย อำเภอบางซ้าย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13270
โทร.	0939639989
ประวัติการศึกษา	(พ.ศ. 2556) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.04 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) (พ.ศ. 2559) วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี เกรดเฉลี่ย 3.50 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
ผลงานทางวิชาการ	ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 2559. “สภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/TiO_2 ” 610-615



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้