

สารนำย้อมสีย้อม Direct Yellow 12 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก
ในช่วงแสงที่มองเห็น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

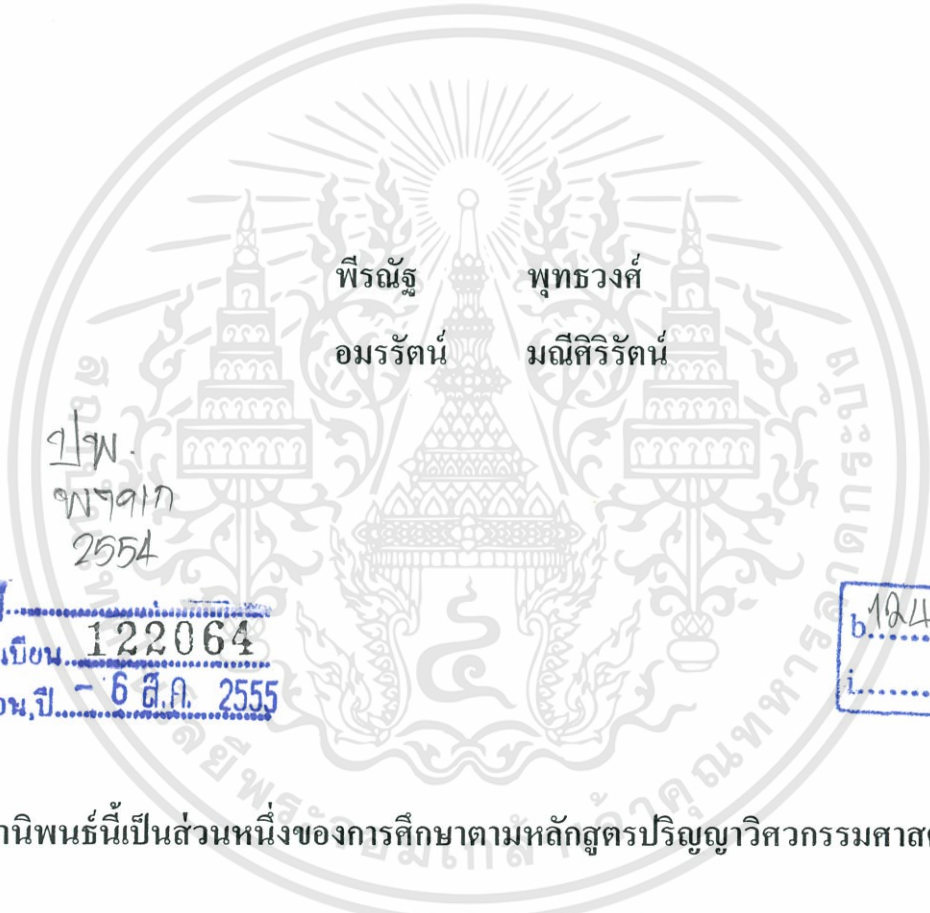
ปีการศึกษา 2554

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดสีย้อม Direct Yellow 12 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก
ในช่วงแสงที่มองเห็น



T122064



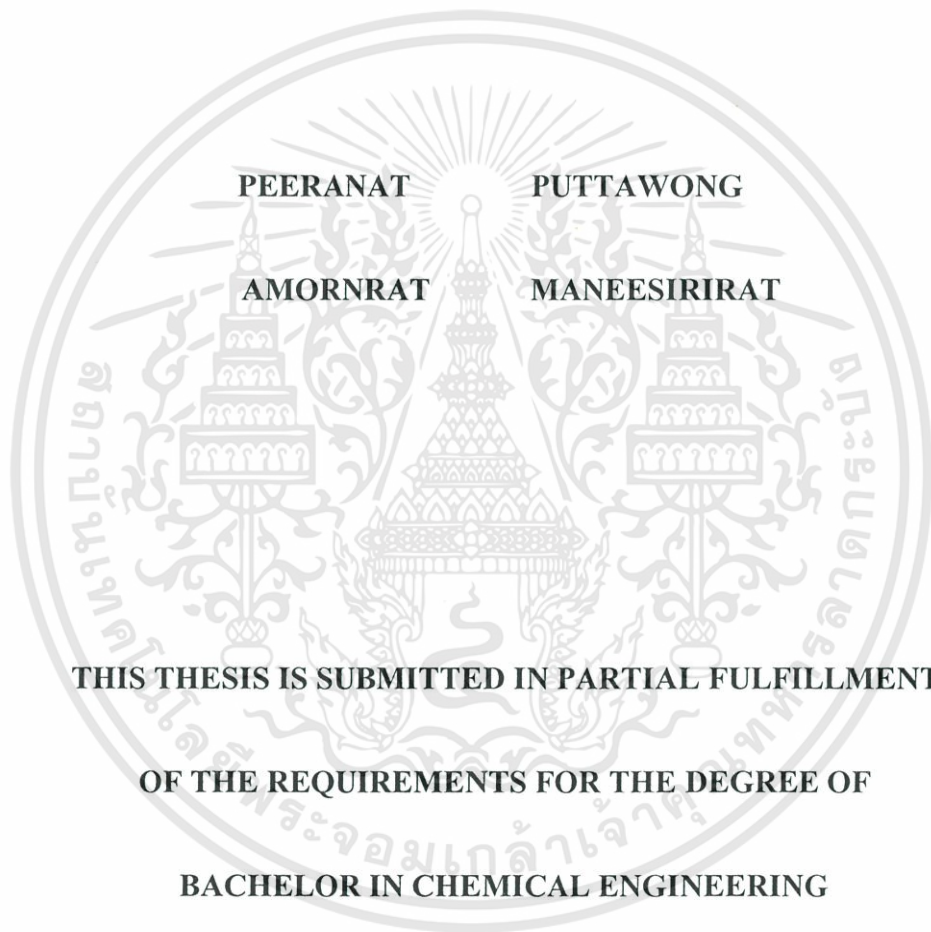
b. 12419035
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Photocatalytic for degrading Direct Yellow 12 dye
under Visible-light irradiation**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING**

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การกำจัดสีข้อม Direct Yellow 12 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงที่มองเห็น

โดย นายพีรณัฐ พุทธรังษี
นางสาวอมรรัตน์ มณีศิริรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



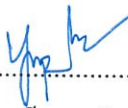
ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)



กรรมการ

(ดร.ชนวรรณ พิณรัตน์)



กรรมการ

(ดร.ญาณิพร พัชราร โชติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การกำจัดสีข้อม Direct Yellow 12 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ในช่วงแสงที่มองเห็น
โดย	นายพีรณัฐ พุทธวงศ์ นางสาวอมรรรัตน์ มณีศิริรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดในการกำจัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในช่วงแสงขาว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ นิกเกิลออกไซด์ – แคลเซียมออกไซด์ (NiO – CaO) ซีเรียมออกไซด์ (CeO₂) และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ (Cu₂O/CeO₂) สีข้อมที่ใช้ในการทดลอง คือ สีข้อมประเภทสียไคเร็กซ์ที่ศึกษา คือระยะเวลาการให้แสง การกำจัดสีข้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในช่วงแสงขาวใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 1 กรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายสีข้อมมาวัดค่าการดูดกลืนแสงทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พิจารณาเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีข้อมและระยะเวลาในการให้แสง ซึ่งจากการทดสอบปฏิกิริยาดังกล่าวพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสีข้อมประเภทสียไคเร็กซ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในช่วงแสงขาว คือ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ (Cu₂O/CeO₂) และระยะเวลาการให้แสงที่ให้ผลดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง ซึ่งในสภาวะดังกล่าวนี้จะสามารถกำจัดสีข้อมประเภทสียไคเร็กซ์ได้ 51.35 %

Report Title Photocatalytic for degrading Direct Yellow 12 dye under Visible-light irradiation.

By Mr. Peeranat Puttawong

Miss Amornrat Maneesirirat

Advisor Assoc. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong

Report for Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)

School of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This experiment studies the efficiency of catalyst affected to Photocatalytic for degrading Direct Yellow 12 dye under Visible-light irradiation. Photocatalysis using was NiO–CaO, CeO₂ and Cu₂O/CeO₂. Dye using was pill yellow Direct dye. Factor being studied was visible lighting time. Photocatalytic for degrading dye under visible-light irradiation used amount of photocatalysis 1 g/L and visible lighting time 6 hour. Took dye solution sample each 1 hour to measured absorbance. High efficiency photocatalyst was considered by percentage of degrading dye and visible lighting time. Results showed that high efficiency photocatalyst was and visible lighting time was Cu₂O/CeO₂. At 6 hour this condition, percentage of degrading dye was 51.35%.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีย้อม Direct Yellow 12 ของนิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ได้จัดทำขึ้นโดยตระหนักถึงปัญหาสภาพแวดล้อมในปัจจุบัน จึงได้จัดทำโครงการวิจัยนี้ขึ้น

โครงการวิจัยฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปมิได้ หากมิได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง และคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาคเคมี ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำที่มีประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ คุณพ่อคุณแม่ ของคณะผู้จัดทำที่ทำให้กำลังใจตลอด การศึกษาและการทำโครงการฉบับนี้

นายพีรณัฐ พุทรวงศ์

นางสาวอมรรัตน์ มณีศิริรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	v
สารบัญตาราง	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สีย้อม	3
2.2 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก	5
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 การวิจัย	12
3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	12
3.2 การศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสีย้อม Direct Yellow 12 ได้มากที่สุด	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	17
4.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อม Direct Yellow 12	17
4.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Direct Yellow 12 แต่ละชนิด	18
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	20
เอกสารอ้างอิง.....	21
ภาคผนวก	22
ภาคผนวก ก การสร้างกราฟมาตรฐาน	23
ภาคผนวก ข ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ	25

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1-1	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมDirect Yellow 12 4
2.2.4-1	กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส 7
2.2.5-1	ตารางแสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกในการบำบัด 8
2.3-1	รูปแสดงการลดลงของ Methyl Blue ภายใต้แสงที่มองเห็นสำหรับ นิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเผา 11
3.1-1	แสดงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา 13
3.2-1	ชุดทดลองปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส 16
4.1-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม Direct Yellow 12 17
4.2.1-1	กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลาต่างๆ..... 18
4.2.2-1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของสีย้อม 19
4.2.2-2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมกับเวลา 19
ก.1	แสดงกราฟระหว่าง ค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น..... 24

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1-1 สารเคมีและปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด	12
ก.1 ผลของการวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม Direct Yellow 12 ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	23
ข1. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของนิกเกิลออกไซด์/ แคลเซียมออกไซด์กับสีย้อม Direct Yellow 12	25
ข2. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของ ซีเรียมออกไซด์ กับสีย้อม Direct Yellow 12	25
ข3. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของคอปเปอร์ออกไซด์/ ซีเรียมออกไซด์กับสีย้อม Direct Yellow 12	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโรงงาน

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมให้มีการดำเนินกิจการประเภทอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และขนาดกลางเพิ่มมากขึ้น เพื่อผลประโยชน์ในด้านการส่งออก และจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ให้แก่ นักท่องเที่ยวทั้งชาวไทย และชาวต่างประเทศ ทำให้มีการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมขึ้นมา มากมาย อาทิ โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ นับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศได้อย่างมาก เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอขยายตัวอย่างรวดเร็ว แต่อุตสาหกรรมดังกล่าวได้มีการใช้น้ำใน กระบวนการผลิตค่อนข้างมาก ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการ ผลิต ทำให้มีปริมาณน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเพิ่มมากขึ้น และอุตสาหกรรมเหล่านี้ยังขาดการ จัดการที่ดีในเรื่องการบำบัดน้ำเสียที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดปัญหาตามมา โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งภายในและโดยรอบ โรงงาน ตลอดจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และชุมชนที่อยู่โดยรอบ

การฟอกย้อมในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้น้ำ และสารเคมีจำนวนมาก และมีการ ปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี สารแขวนลอย ความร้อน และอื่นๆ น้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี (dyeing) และการ ตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพ และทาง เคมีต่างๆไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้มีหลาย ชนิด เช่น สีย้อมที่ฟอสเฟต สีย้อมรีดิวซ์ สีย้อมรีดิวซ์ เป็นต้น ดังนั้นโรงงานจึงมีความจำเป็นต้องป้องกันปัญหา มลพิษที่แหล่งกำเนิด โดยมีการศึกษากระบวนการที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้ได้คุณภาพ น้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมมีทั้ง กระบวนการทางกายภาพ และเคมี ได้แก่ กระบวนการคูดซับ โอโซนเนชั่น ซึ่งวิธีการดังกล่าวมี ข้อจำกัดคือ กระบวนการคูดซับทำให้เกิดมลพิษทุติยภูมิ ซึ่งจะเป็นปัญหาในการกำจัดต่อไป ส่วนโอโซนเนชั่นเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นกระบวนการบำบัดเพียงขั้นตอนเดียวจึง ไม่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ จึงต้องหากระบวนการที่เหมาะสมใช้ควบคู่ในการ บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย ได้โดยส่วนมากนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวต้อง ใช้ความเข้มแสงในช่วงยูวี จึงจะสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ แต่แสงยูวีที่

อยู่ในแสงแคดมีปริมาณน้อย หากนำไปใช้ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกจะต้องใช้หลอดไฟยูวี เพื่อช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา

โครงการวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดสีข้อม โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงของแสงขาว เนื่องจากแสงขาวพบในแสงแดดมากกว่ายูวี นอกจากนี้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน กลายเป็นสารออกซิเดนต์ที่แรงมากเข้าไปทำลายพันธะของสีข้อม กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ทำให้การกำจัดสีข้อมด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น และยังสามารถพัฒนาให้ใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำมาใช้กำจัดสีข้อมไครเรทท์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว (Visible) ได้

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีข้อมไครเรทท์โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว (Visible)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ – แคลเซียมออกไซด์ ($\text{NiO} - \text{CaO}$) ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$) นำมาทดลองกำจัดสีข้อมไครเรทท์โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว (Visible) เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสีข้อมไครเรทท์ได้มีมากที่สุด

1.3.2 เมื่อได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการกำจัดสีข้อมไครเรทท์โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาวแล้ว ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว โดยทำการทดลองแบบเบซท์ โดยปัจจัยที่จะศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาที่ให้แสง และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำผลการทดลองนี้ไปใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาหาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว

1.4.2 นำไปใช้เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้จริง ในการบำบัดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมสีข้อม

1.4.3 นำไปใช้เป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ ในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์อื่นๆ โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อม (Dyestuff) คือสีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด การย้อมวัสดุสิ่งทอในโรงงานฟอกย้อมจะใช้สีย้อมที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด และสีย้อมจะมีอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ภายในโมเลกุล ทำให้เราสามารถมองเห็นสีของสีย้อม ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400–700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลแตกต่างกัน จะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน แสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาดูออกมาต่างกันไป ซึ่งความคงทนจะต่างกันออกไปตามแต่ละประเภท ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) และสีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs)

โดยทั่วไปโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอส่วนใหญ่ใช้สีย้อมสังเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ สีเอซิค สีไคเร็กท์ สีเบสิก สีคิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีอะโซอิก สีแวิ๊ด สีเมอร์แคนท์ และสีซัลเฟอร์ โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการย้อมสี เพราะวัตถุประสงค์ที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ ซึ่งในการฟอกย้อมที่ย้อมเส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไคเร็กท์ (Direct Dye) โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ย้อมติดง่าย ราคาถูก ปกติจะมีความคงทนของสีต่อแสง(light fastness) ได้ไม่ดี แต่ถ้ามีคอปเปอร์ (Copper) อยู่ในโครงสร้างก็จะมีผลเพิ่มความคงทนของสีต่อแสงดีขึ้น ความคงทนต่อการซัก (washing fastness) ต่ำ เนื่องจากพันธะที่ยึดระหว่างสีกับเส้นใยไม่แข็งแรง ดังนั้นจึงนิยมใช้ย้อมผ้าที่ไม่จำเป็นต้องซักบ่อย เช่น พรหม ผ้าปูเตียง ริบบิ้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในย้อมพวก non-textile เช่น กระดาษ แต่ก็ยังมีวิธีการปรับปรุงความคงทนต่อการซัก คือการทำตกแต่งหลังการซัก แต่อาจทำให้เจดสีเปลี่ยนไป

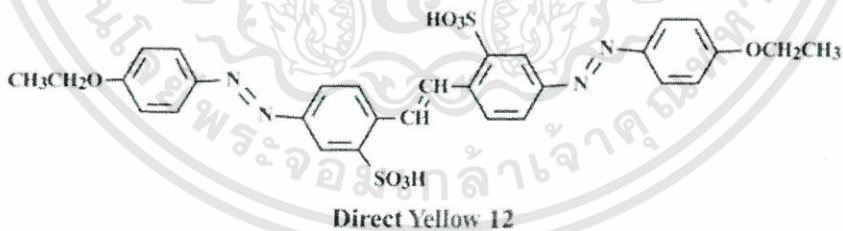
สีไคเร็กซ์ (Direct Dye) เป็น anionic soluble dyes เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ จึงละลายน้ำค่อนข้างยาก สภาพของสีในน้ำจะเป็นลักษณะคอลลอยด์ (colloid) โดยสีชนิดนี้มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ ซึ่งสีไคเร็กซ์สามารถแบ่งประเภทได้อีก โดยแบ่งเป็น

1. กลุ่ม A “Self Leveling Dye” เป็นสีประเภทย้อมสม่ำเสมอด้วยตัวเอง ดังนั้นสีกลุ่มนี้จะมีการเคลื่อนตัวสูง เพราะว่ามีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ากลุ่มอื่นๆ สีในกลุ่มนี้เป็นสีที่ย้อมง่ายที่สุด เพราะมีขนาดโมเลกุลเล็ก แต่มีต้นทุนที่สูงเพราะมีกระบวนการผลิตยาก ในกระบวนการย้อมสีไม่ต้องใช้ค่า

2. กลุ่ม B “Salt Controllable Dye” เป็นสีที่ต้องควบคุมด้วยการเติมเกลือเพื่อให้เกิดการย้อมที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดโมเลกุลปานกลาง

3. กลุ่ม C “Temperature Controllable Dye” เป็นสีประเภทย้อมสม่ำเสมอด้วยการควบคุมอุณหภูมิ เป็นสีที่มีการควบคุมทั้งเกลือและอุณหภูมิควบคู่กัน เพื่อก่อให้เกิดการย้อมที่สม่ำเสมอ ซึ่งสีในกลุ่มนี้จะมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ากลุ่ม A และ กลุ่ม B การใช้ต้องมีการควบคุมทั้งปริมาณเกลือและอุณหภูมิในการย้อม

โดยโครงการวิจัยนี้ได้ใช้สีย้อมไคเร็กซ์ สีเหลืองอ่อน ตราเทพพนม ซึ่งเป็นสีไคเร็กซ์ที่จัดอยู่ในกลุ่ม A “Self Leveling Dye” มีโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.1-1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไคเร็กซ์สีเหลืองอ่อน

2.2 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic)

2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap)

2.2.2 พลังงานแสง

การให้แสงในกระบวนการนั้น เป็นการให้พลังงานกับตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอจะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad (2.2.2.1)$$

เมื่อ	E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Contant) = 6.625×10^{-34} , จูล-วินาที
	ν	คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที ⁻¹
	λ	คือ ความยาวคลื่นแสง , นาโนเมตร
	c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , เมตร/วินาที

พบว่าแสงขาวมีพลังงานแบนด์แก๊ปอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่ใช้ นิกเกิลออกไซด์/เคลเซียมออกไซด์ ซีเรียออกไซด์และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียออกไซด์ มีพลังงานแบนด์แก๊ปอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700, >420, 425-437 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงขาวพอดี

2.2.3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

สารที่ใช้เป็นตัว catalyst ในปฏิกิริยา photocatalysis ได้แก่

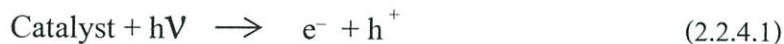
1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยัง คอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล($hole, h^+$) ซึ่งเป็นประจุบวกที่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจาก วาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮล ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะตัวนำ สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาสารกึ่งตัวนำ การรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน/โฮล แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ แยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจนกว่าวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในสภาวะปกติ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้เป็น Superoxide Radical ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงมากสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้

2.2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสกำจัดสีข้อม

แสงกระทบตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์เคลื่อนที่ไปยังยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิด e^-/h^+



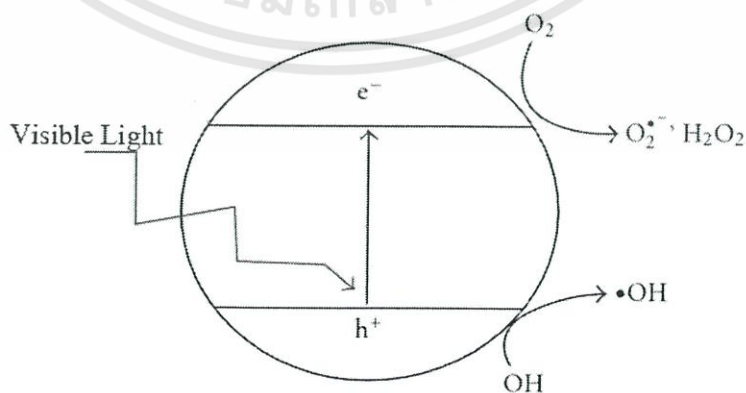
h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ซึ่งเป็นตัวหลักในการกำจัดสีข้อม ตามสมการที่ (2.2.4.2) และ (2.2.4.3)



ส่วน e^- จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลและเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล



เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ทำให้โมเลกุลของสีข้อมแตกตัวกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.2.4-1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติก

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการบำบัดมลพิษที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้บำบัดสำหรับมลพิษอันตราย จากอุตสาหกรรมต่างๆ

มลสารในสภาวะตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - การลดกลิ่น - การฆ่าเชื้อโรค - การย่อยสลายสารปราบศัตรูพืช - กำจัดมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ - กำจัดสารครึ่งกิว - นำโลหะกลับมาใช้ใหม่ - ย่อยสลายสี - สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิเดชันออกไซด์ของไนโตรเจน - ลดกลิ่นภายในอาคาร - ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> - บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร - ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

ที่มา : Hoffman *et al.* (1995)

รูปที่ 2.2.5-1 ตารางแสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกในการบำบัด

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

2.3.1 pH

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จะเปลี่ยนไปเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำ และมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น

2.3.2 ความเข้มข้นของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา

อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยา และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลาย ยึดเกาะ โดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลายสีย้อม ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตแคตาไลติกส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

2.3.3 อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจลศาสตร์ อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส ได้ดังนี้

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.3.3.1)$$

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาของ e^{-cb} และ h^{+vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^{-cb} และ h^{+vb}

2.3.4 ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และทำหน้าที่ยึดจับ e^{-cb} ที่คอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออนและจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^{+}) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สมการที่ (2.2.4.2) - (2.2.4.7)) ด้วยเหตุนี้ ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^{-cb} และ h^{+vb} นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

2.3.5 ความเข้มของแสง (Light intensity)

เนื่องจากความเข้มของแสง (คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ ν มีพลังงาน $E = h\nu$ คิดเป็น 1 ควอนตัม) ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงาน ของแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_r ดังนั้น

จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ = พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ

พลังงานของแสง 1 โฟตอน = $E_r / h\nu$

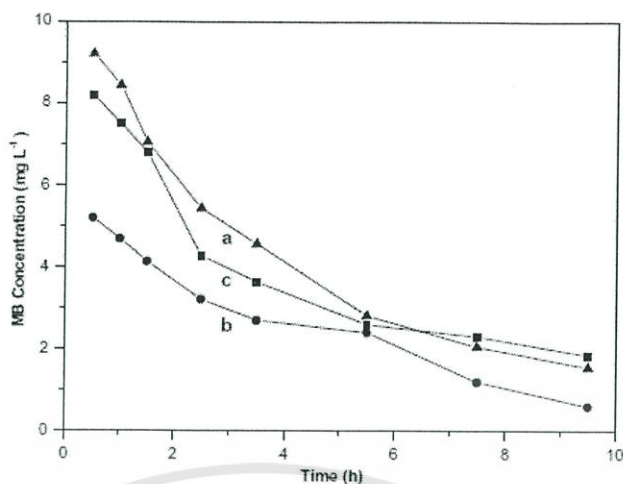
จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที = ความเข้มแสง / $h\nu$

ซึ่งมีสมมุติฐานว่า 1 โฟตอน จะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า
จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน = จำนวนโฟตอน = ความเข้มของแสง

การที่จะกระตุ้นไททานเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e_{cb} และ h_{vb}^+ ต้องใช้ความยาวคลื่นเท่ากับหรือมากกว่าความยาวคลื่นของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อยเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Limin Song และคณะ ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ในปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในการกำจัดสายอินทรีย์ภายใต้แสงขาว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีตกตะกอนแล้วไปเผาที่ 650 700 800 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปกำจัด Methyl Blue (MB) เข้มข้น 10 ppm ปริมาตร 300 ml และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 1.2 กรัม พบว่าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนขั้นตอนการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด Methyl Blue ได้มากที่สุด



รูปที่ 2.3-1 รูปแสดงการลดลงของ Methyl Blue ภายใต้แสงขาวสำหรับนิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ที่ถูกเผาที่ (a) 650 (b) 700 (c) 800 องศาเซลเซียส

Pengfei ji และคณะได้ทำการศึกษาการดูดซับและการกำจัด acid orange 7 บนผิวของซีเรียมออกไซด์ภายใต้แสงขาว โดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบคกตะกอน จากนั้นนำไปกำจัด acid orange ที่เข้มข้น 70 ppm ปริมาณ 50 ml และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 g พบว่า ซีเรียมออกไซด์สามารถกำจัด acid orange 7 ได้ดีกว่า Commercial titania

Shichao Hu และคณะได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมประเภท AZO คือ acid orange 7 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว โดยใช้ $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$ ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีเคลือบผงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้ CuCl_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.01 0.04 0.06 และ 0.08 ทำให้อัตราส่วนโมลของ $\text{Cu}_2\text{O} : \text{CeO}_2$ แตกต่างกันคือ 0.0012 0.0016 0.0029 และ 0.0032 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$ อัตราส่วนต่างๆ และ CeO_2 ไปทำทดลองกำจัดสีย้อม acid orange 7 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 1 g/L พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$ ที่อัตราส่วน 0.0029 สามารถกำจัดสีย้อมได้ 96.2 % โดยมีระยะเวลาการให้แสง 4 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าการใช้ CeO_2 เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถกำจัดได้ 77.6 %

บทที่ 3

การวิจัย

โครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการทดลอง 2 ส่วน คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว และการหาความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ในการทดลองนี้ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นมาทั้งหมด 3 ตัว เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ได้มีมากที่สุด

สารเคมี

1. นิกเกิลไนเตรท ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
2. แคลเซียมไนเตรท $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
3. ซีเรียมไนเตรท $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
4. คอปเปอร์ไนเตรท $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$
5. สารละลายแอมโมเนีย (28 wt% NH_3)
6. น้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ 3.1-1 สารเคมีและปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

การทดลองที่	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์	สารตั้งต้น		ปริมาณสาร (กรัม)
1	นิกเกิลออกไซด์ – แคลเซียมออกไซด์ (NiO – CaO)	A	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.24
		B	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.82
2	ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)	A	$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.53
3	คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$)	A	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$	0.74
		B	$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

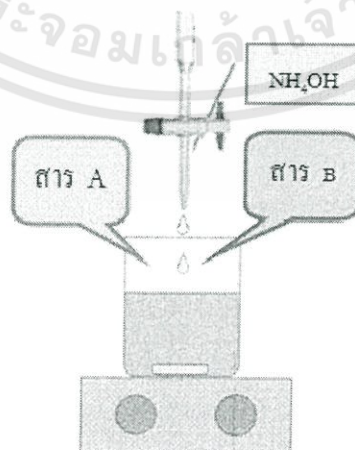
อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
2. บีกเกอร์ขนาด 100 ml
3. บิวเรต
4. เครื่องเซนทรีฟิวจ์
5. เตาอบ
6. เตาเผาอุณหภูมิสูง

วิธีการทดลอง

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เตรียมสารละลายโดยเติม A และ B ในอัตราส่วน 1:1 โมลาร์
2. ชั่งสาร A กรัม ชั่งสาร B กรัม นำสาร A และ B มาผสมกันลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 40 มิลลิลิตร
3. นำสารละลาย A+B ที่อยู่ในบีกเกอร์ไปตั้งบนเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก และเติมสารละลาย (28%/wt) NH_4OH ลงไปช้าๆ จนกระทั่งเห็นตะกอนเกิดขึ้นอย่างชัดเจน จึงหยุดเติม (28%/wt) NH_4OH แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที
4. นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเซนทรีฟิวจ์
5. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. เผาตะกอนที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1-1 แสดงการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสีข้อมไคเร็กที่ได้มากที่สุด

การหาความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดสีข้อมไคเร็กที่โดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก ซึ่งการทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ตัวคือ นิกเกิลออกไซด์ – แคลเซียมออกไซด์ (NiO – CaO) ซีเรียมออกไซด์ (CeO₂) และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ (Cu₂O/CeO₂) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีข้อมไคเร็กที่ได้มากที่สุด

สารเคมี

1. สีข้อมไคเร็กที สีเหลืองอ่อน ตราเทพพนม
2. นิกเกิลออกไซด์ – แคลเซียมออกไซด์ (NiO – CaO)
3. ซีเรียมออกไซด์ (CeO₂)
4. คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ (Cu₂O/CeO₂)

อุปกรณ์

1. ชุดทดลองปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ประกอบด้วย กล้องทึบแสง และหลอดฟลูออเรสเซนต์แสงเคย์ไลท์ 18 W 2 หลอด
2. กล้องทึบแสง
3. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Jasco model 7800
4. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
5. เครื่องแก้ว
 - บีกเกอร์ขนาด 250 mL
 - ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL และ 100 mL
 - ปิเปตขนาด 5 mL
 - หลอดทดลอง
 - แท่งแก้วคนสาร
6. Syring แก้ว

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 สร้างกราฟมาตรฐานสีโคเร็กซ์ที่สีเหลืองอ่อน ตราเทพพนม

- 1.1 เตรียมสารละลายสีข้อมที่มีความเข้มข้น 1000 ppm โดยชั่งสีข้อม 0.5000 g
- 1.2 ละลายสีข้อม 0.5000 g ในบีกเกอร์ขนาด 100 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 mL
- 1.3 เทสารละลายสีข้อมลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ครบ 500 mL จะได้สารละลายสีข้อมที่มีความเข้มข้น 1000 ppm
- 1.4 นำสารละลายสีข้อมที่มีความเข้มข้น 1000 ppm มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 10 20 30 40 50 60 70 80 90 และ 100 ppm
- 1.5 นำไปตรวจวัดค่าดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Jasco model 7800 แล้วบันทึกผล
- 1.6 นำค่าที่ได้จากการบันทึกมาสร้างกราฟมาตรฐาน

ตอนที่ 2 ทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดสีข้อมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งหมด เพียงแต่เปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$) ตามลำดับ

- 2.1 เตรียมสารละลายสีข้อมเข้มข้น 20 ppm ปริมาตร 500 ml
- 2.2 จากนั้นแบ่งสารละลายสีข้อมลงในบีกเกอร์ทั้ง 3 ใบ อย่างละ 100 mL โดยชุดการทดลองที่ 2 และ 3 จะเป็นชุดทดลองควบคุม
- 2.3 เติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์ – แกลซีเรียมออกไซด์ ($\text{NiO} - \text{CaO}$) ลงในบีกเกอร์ของชุดทดลองที่ 1 และ 3 อย่างละ 0.1 g
- 2.4 นำชุดทดลองที่ 1 และ 2 ไปใส่ในกล่องจำลองการให้แสงขาว ส่วนชุดการทดลองที่ 3 นำไปใส่ในกล่องมืด
- 2.5 ใช้ Syring แก้วเก็บตัวอย่างสารละลายสีข้อมปริมาตร 4 mL จากบีกเกอร์ทั้ง 3 ใบ ทุกๆ 1 ชั่วโมง
- 2.6 นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องเซนทริฟิวจ์เป็นเวลา 10 นาที จนสารละลายแยกชั้นตกตะกอน เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารละลาย
- 2.7 นำส่วนที่เป็นสารละลายใส ไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Jasco model 7800 บันทึกข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2-1 ชุดทดลองปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

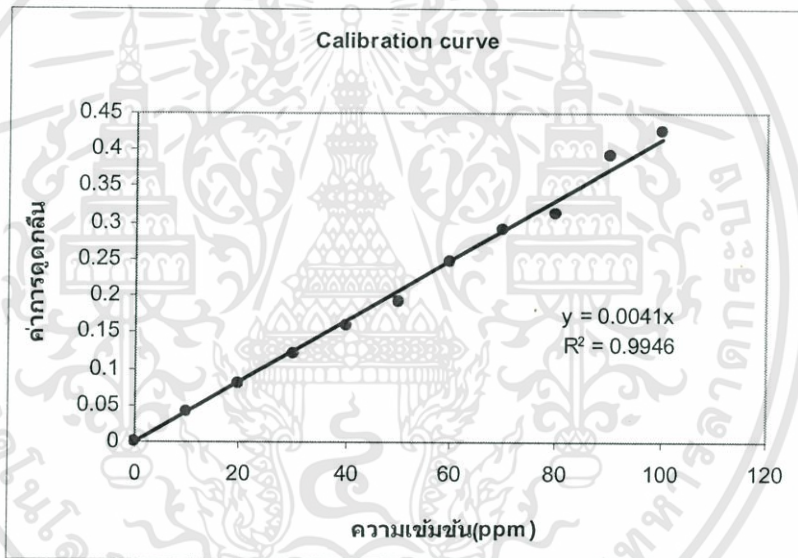
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 การทำกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อม (calibration curve)

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมสามารถวิเคราะห์ได้ จากการทำกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 463 นาโนเมตร แล้วนำผลที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์แสดงให้เห็นดังนี้



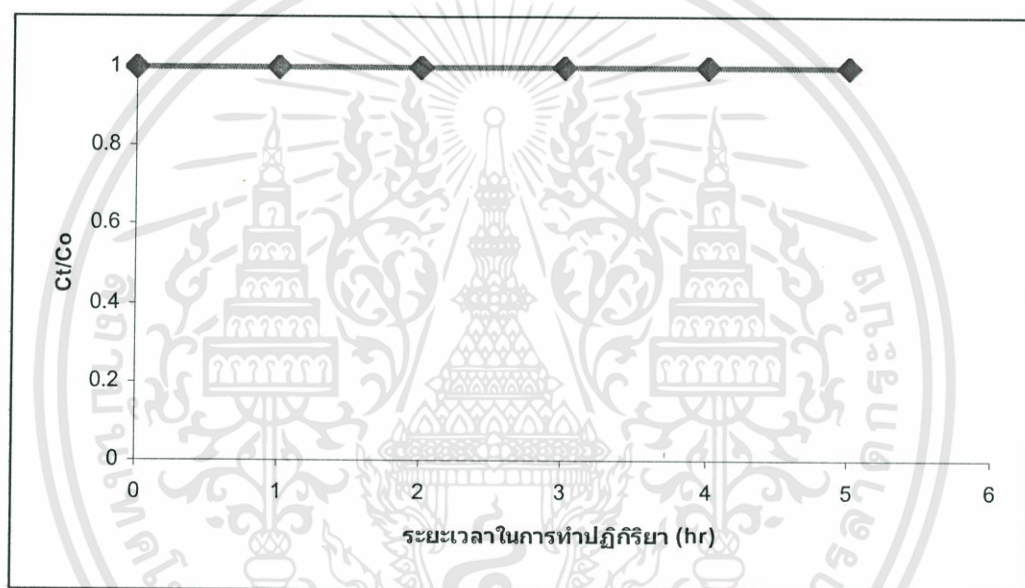
รูปที่ 4.1-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อม

พบว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 ถึง 100 ppm เป็นกราฟเส้นตรง บ่งบอกถึงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย มีความสัมพันธ์เชิงสมการ เป็นสมการเส้นตรงที่มีจุดตัดแกน ที่ $y = 0.0041X$ และ มีค่า $R^2 = 0.9946$ ซึ่งเป็นค่าบอกรอบเขตความแม่นยำ สำหรับการใช้ในการหาค่าสารละลาย

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมแต่ละชนิด

4.2.1 การศึกษาผลกระทบจากการดูดซับสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาหาผลกระทบจากการดูดซับสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาว จะทำการศึกษาโดยนำบีกเกอร์ที่บรรจุสีย้อมไคเร็กซ์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 18.29 ppm ไปไว้ในกล่องที่บดแสง จากนั้นเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ปริมาณ 1 กรัม/ลิตร เก็บตัวอย่างสีย้อมไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ผลการทดลองเป็นดังรูป 4.2.1-1

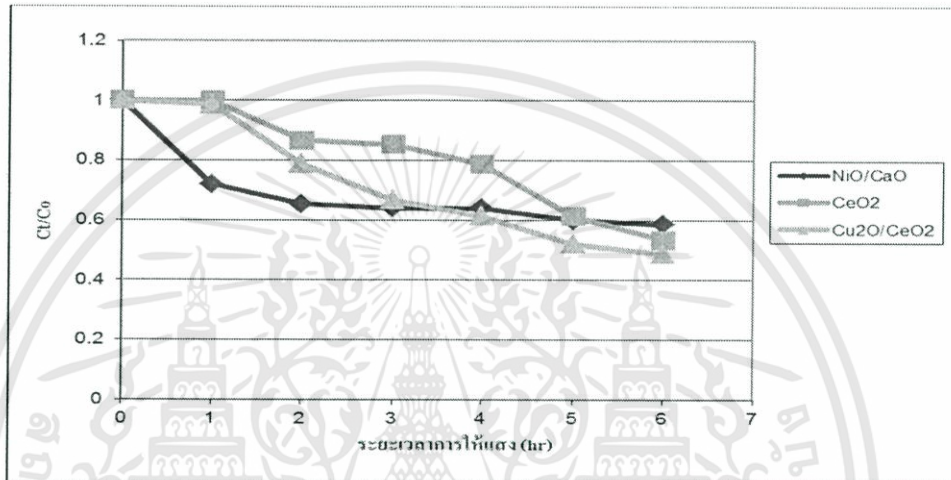


รูปที่ 4.2.1-1 กราฟแสดงความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.2.1-1 จะเห็นว่าที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของสีย้อมไคเร็กซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือ 18.29 ppm ดังนั้นแสดงว่า ในการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในช่วงแสงขาวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเรียมออกไซด์ไม่มีการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

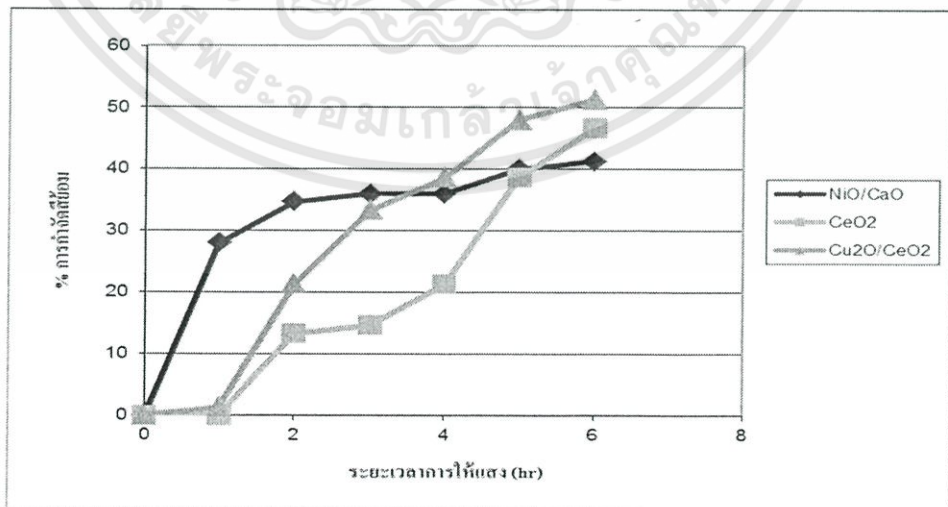
4.2.2 การศึกษาหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสีย้อมไครกที่ได้มากที่สุด

ในการวิเคราะห์หาความสามารถในการกำจัดสารละลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ปริมาณ 1g/L โดยที่ความเข้มข้นของสีย้อมคือ 20 ppm ปริมาตร 100 ml เมื่อได้ให้แสงในช่วงวิลิเบิลเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ มีความสามารถกำจัดสีย้อมได้มากที่สุด ซึ่งเห็นได้จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมกับเวลาดังนี้



รูปที่ 4.2.2-1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของสีย้อม

โดย นิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่ 6 ชั่วโมงอยู่ที่ 41.33% 46.67% 51.35% ตามลำดับ พบว่าคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่ 6 ชั่วโมงมากที่สุด ซึ่งเห็นได้จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมกับเวลา



รูปที่ 4.2.2-2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมกับเวลา

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลออกไซด์-แคลเซียมออกไซด์ ($\text{NiO} - \text{CaO}$) ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และคอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$) ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในช่วงแสงขาว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ได้มากที่สุดคือ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$) ซึ่งสามารถกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ได้ 51.35 % ในเวลา 6 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์ ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CeO}_2$) มีความสามารถในการกำจัดสีข้อมไคเร็กซ์ได้ดีที่สุด



เอกสารอ้างอิง

- [1] Limin Song , Shujuan Zang , Bin Chen , Donglan Sun Highly active NiO-Ca) photocatalyst for degrading organic contaminants under visible-light irradiation Catalysis Communications 10 (2009) 421-423
- [2] Pengfei Ji , Jinlong Zang , Feng Chen , Masakazu Anpo Study of adsorption and degradation of acid orange 7 on surface of CeO₂ under visible light irradiation Applied Catalysis B: Environmental 85 (2009) 148-154
- [3] Shichao Hu , Feng Zhou , LingZhi Wang , Jinlong Zhang Preparation of Cu₂O/CeO₂ heterojunction photocatalyst for the degradation of Acid Orange 7 under visible light irradiation Catalysis Communication 12 (2011) 794-797
- [4] Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, volume 1 โดย Emil Raymond Riegel, James Albert Kent. 511-516



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

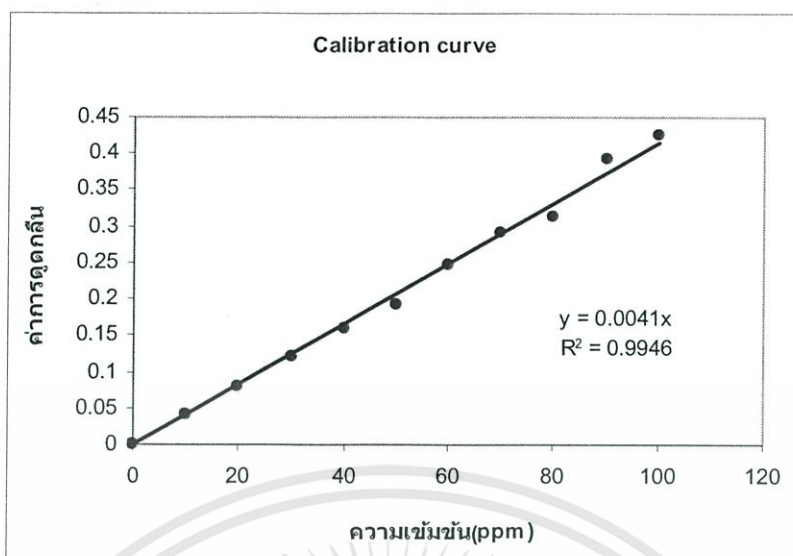
การสร้างกราฟมาตรฐานสีย้อมไดเร็กซ์สีเหลืองอ่อน ตราเทพพนม

การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมไดเร็กซ์ที่ไม่ทราบค่าทำได้โดยนำสารละลายสีย้อมไดเร็กซ์สีเหลืองอ่อนที่มีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุดเท่ากับ 463 นาโนเมตรที่ทราบความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสง กับเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น Jasco model 7800 ผลของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสีย้อมเป็นดังต่อไปนี้

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืน แสง
0	0
10	0.04
20	0.08
30	0.12
40	0.159
50	0.192
60	0.248
70	0.292
80	0.314
90	0.392
100	0.424

ตารางที่ ก.1 ผลของการวัดค่าดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมไดเร็กซ์สีเหลืองอ่อน ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมไดเร็กซ์สีเหลืองอ่อน ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.1 แสดงกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น

จากกราฟข้างต้นพบว่าความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นออกมาเป็นเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์คือ $y = 0.0041X$ และมีค่า $R^2 = 0.9946$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืน แสง	ความเข้มข้น (ppm)	Ct/Co	%การ กำจัด
0	0.075	17.8571	1.0000	0.00
1	0.054	12.8571	0.7200	28.00
2	0.049	11.6667	0.6533	34.67
3	0.048	11.4286	0.6400	36.00
4	0.048	11.4286	0.6400	36.00
5	0.045	10.7143	0.6000	40.00
6	0.044	10.4762	0.5867	41.33

ตาราง ข1. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของ นิกเกิลออกไซด์/แคลเซียมออกไซด์
กับสีย้อมไคเร็กซ์ทีเหลืองอ่อน

เวลา (ชั่วโมง)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (ppm)	Ct/Co	%การ กำจัด
0	0.075	17.8571	1.0000	0.00
1	0.075	17.8571	1.0000	0.00
2	0.065	15.4762	0.8667	13.33
3	0.064	15.2381	0.8533	14.67
4	0.059	14.0476	0.7867	21.33
5	0.046	10.9524	0.6133	38.67
6	0.040	9.5238	0.5333	46.67

ตาราง ข2. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของ ซีเรียมออกไซด์
กับสีย้อมไคเร็กซ์ทีเหลืองอ่อน

เวลา (ชั่วโมง)	เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (ppm)	Ct/Co	%การ กำจัด
0	0.075	17.8571	1.0000	0.00
1	0.074	17.6190	0.9867	1.33
2	0.059	14.0476	0.7867	21.33
3	0.050	11.9048	0.6667	33.33
4	0.046	10.9524	0.6133	38.67
5	0.039	9.2857	0.5200	48.00
6	0.036	8.5714	0.4865	51.35

ตาราง ข3. ผลการทดลองปฏิกิริยาโฟแคตตาไลซิสของ คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียมออกไซด์
กับสีข้อมไคเร็กทีสสีเหลืองอ่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้