



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมรีแอคทีฟ

Solar photo-catalysis to treat the wastewater contaminated reactive dye

ชื่อนิสิต นายธีระวัฒน์ ไวยะกา เลขประจำตัว 6032927823
นายณัฐพล ชำนาญศิลป์ เลขประจำตัว 6032916923

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีรีแอกทีฟ

นายธีระวัฒน์ ไวยะกา
นายณัฐพล ชำนาญศิลป์

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Solar photo-catalysis to treat the wastewater contaminated reactive dye

Mr. Theerawat

Waiyaka

Mr. Natthapon

Chamnansin

A Senior Project in Partial Fulfillment of Requirements for
the Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department

Faculty of Science Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

คำนำ

รายงานโครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา 2306499 Senior Project ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการกำจัดสี้อมรีแอคทีฟ 120 ผ่านกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสี้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่แตกต่างกัน และศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงต่อการย่อยสลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 ภายใต้แสงอาทิตย์

คณะผู้จัดทำมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อการกำจัดสี้อม อย่างไรก็ตามเนื้อหาที่ใช้ในการศึกษาอาจไม่ครอบคลุมถึงข้อมูลทุกส่วนที่เกี่ยวข้อง หรือมีข้อผิดพลาดประการใด จึงขออภัยมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

บทคัดย่อ

| | | |
|--|---|-----------------------------|
| ชื่อโครงการภาษาไทย | การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีรีแอคทีฟ | |
| ชื่อโครงการภาษาอังกฤษ | Solar photo-catalysis to treat the wastewater contaminated reactive dye | |
| ชื่อนิสิตหัวหน้าโครงการ | นายธีระวัฒน์ ไชยะกา | เลขประจำตัวนิสิต 6032927823 |
| ชื่อนิสิตที่ร่วมในโครงการ | นายณัฐพล ชำนาญศิลป์ | เลขประจำตัวนิสิต 6032916923 |
| ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ | ศ.ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี | |
| ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563 | | |

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120 ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงซึ่งเป็นชนิดวิวิธพันธุ์ วิธีการนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้ต้นทุนต่ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษามลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบวิวิธพันธุ์ที่มีผลต่อการกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120 เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 7 ชนิด ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ไทเทเนียมไดออกไซด์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์จากวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 1, 4, 7, และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่า โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าและไทเทเนียมไดออกไซด์แคลไซน์เป็นแบบผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวิธีการโซล-เจลและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก พบว่า โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทสเท่านั้น และเมื่อศึกษามลของการเจือเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า การเจือเหล็กในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดผลึกและขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จากผลการทดลองความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ที่ร้อยละ 50 พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุดในระยะเวลา 37 นาที รองลงมาคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 4 เปอร์เซ็นต์, ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 7 เปอร์เซ็นต์, ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากวิธีการโซล-เจล, ไทเทเนียมไดออกไซด์แคลไซน์และไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ที่ระยะเวลา 45, 47, 54, 96, 100 และ 125 นาที ตามลำดับ ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่สภาวะความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 0.2 กรัมต่อสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต *ธีระวัฒน์ ไชยะกา*

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต *ณัฐพล ชำนาญศิลป์*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ *ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี*

Abstract

Title: Solar photo-catalysis to treat the wastewater contaminated reactive dye

By Mr. Theerawat Waiyaka **Student ID** 6032927823

Mr. Natthapon Chamnansin **Student ID** 6032916923

Advisor Prof. Dr. Nattaya Pongstabodee

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic year 2020

In this research, the study on the removal of reactive red 120 through a photocatalyst in advance oxidation processes using a heterogeneous catalyst. Which is a method that provides high-efficiency, environment friendly, and low-cost. The purpose of this research was to study the types of catalysts that affected the removal of reactive red 120 to reduce the contamination problem of dyes to natural sources. Seven catalysts were prepared: commercial-grade titanium dioxide, commercial-grade titanium dioxide after calcining at 500 °C, titanium dioxide sol-gel, and iron-doped titanium dioxide (1, 4, 7, and 10 wt%) by the sol-gel method. After that, analyzing the structure using the XRD technique, the crystal structure of the commercial-grade titanium dioxide and commercial-grade titanium dioxide after calcining is mixed between anatase and rutile phase but titanium dioxide by sol-gel and iron-doped titanium dioxide was found only anatase phase. When studying the effect of amount iron doping on the change in catalyst structure, it was found that higher iron doping resulted in decreased crystallization and crystal size of the catalyst. The results of the degradation of reactive red 120 at 50 %, it was found that titanium dioxide doped with 10 wt% gave the best degradation efficiency within 37 minutes. And It was found that 4, 7, 1 wt% iron-doped titanium dioxide, titanium dioxide synthesized by sol-gel method, titanium dioxide calcine. And commercial grade titanium dioxide within 45, 47, 54, 96, 100, and 125 minutes respectively, under sunlight in the condition the initial dye concentration of 100 mg / L and the amount of catalyst 0.2 g per 10 ml of dye solution.

Field study: Chemical Technology

Student's Signature *Theerawat Waiyaka*

Academic year: 2020

Student's Signature *Natthapon Chamnansin*

Advisor's Signature *Sanyobij Pongstabodee*

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำในการ ปรับแก้ไขรายงานฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงการอบรมสั่งสอนทักษะในการทำงาน แง่คิดต่าง ๆ ที่ สามารถนำไปประยุกต์ได้ในอนาคต จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คุณณัฐวิรัช รัชประสิทธิ์ชัย คุณยุทธพันธ์ พงศ์บุญชู และคุณศรดา จันทร์โสภณพงศ์ ที่ ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และ เครื่องมือในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีเทคนิคที่อำนวยความสะดวกใน การใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา-มารดา และเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา และ กำลังใจที่ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญภาพ | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 2 |
| 1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย | 2 |
| 1.4 วิธีการดำเนินงาน..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis process)..... | 3 |
| 2.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of catalytic)..... | 3 |
| 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis Process) | 4 |
| 2.4 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process) | 5 |
| 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของสีย้อมด้วยแสง..... | 6 |
| 2.6 ลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Characteristics of Titanium dioxide) | 7 |
| 2.7 สีย้อม (Dye)..... | 8 |
| 2.8 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)..... | 11 |

| | |
|--|-----------|
| 2.9 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม | 13 |
| 2.10 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม | 13 |
| 2.11 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Preparation of the catalyst)..... | 15 |
| 2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 16 |
| 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 18 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 19 |
| 3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 19 |
| 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... | 19 |
| 3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... | 19 |
| 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 19 |
| 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง | 20 |
| 3.2.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก..... | 20 |
| 3.2.2 การเตรียมสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120..... | 21 |
| 3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอม | 21 |
| 3.2.4 การทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120..... | 21 |
| 3.2.5 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา | 21 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล | 22 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)..... | 22 |
| 4.1.1 ผลของการแคลไซน์ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง | 22 |
| 4.1.2 ผลของการเจือเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง..... | 23 |
| 4.1.2 การคำนวณขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง..... | 24 |
| 4.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา | 25 |
| 4.2.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.2 ปริมาณการเจอเหล็กในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ | 27 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 29 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 29 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 29 |
| บรรณานุกรม | 30 |
| ภาคผนวก | 34 |
| ภาคผนวก ก | 35 |
| ภาคผนวก ข | 38 |
| ภาคผนวก ค | 41 |

สารบัญตาราง

เรื่อง

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 2.1 ลักษณะประเภทและสมบัติของสีย้อม | 8 |
| ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน | 10 |
| ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสีย้อมรีแอคทีฟเรด120 | 12 |
| ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม | 13 |
| ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึก แลททิซพารามิเตอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบของโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 24 |

สารบัญภาพ

เรื่อง

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 2.1 พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยา | 1 |
| ภาพที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ | 5 |
| ภาพที่ 2.3 แสดงกระบวนการกระบวนการโฟโตแคตาไลติก | 5 |
| ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ (ก) อนาเทส (ข) รูบไทล์ และ (ค) บรูคไคต์ (brookite) | 8 |
| ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟ | 12 |
| ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด120 | 12 |
| ภาพที่ 2.7 แสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการโซล-เจล | 16 |
| ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ | 16 |
| ภาพที่ 2.9 หลักการทำงานของดุกกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา..... | 17 |
| ภาพที่ 4.1 แสดงผลของการแคลไซน์ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง..... | 22 |
| ภาพที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก | 23 |
| ภาพที่ 4.3 อัตราการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า, ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก..... | 25 |
| ภาพที่ 4.4 อัตราการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก ในปริมาณ 1%, 4%, 7% และ 10% ของน้ำหนัก | 27 |
| ภาพที่ ก-1 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า..... | 35 |
| ภาพที่ ก-2 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส | 35 |
| ภาพที่ ก-3 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 1 | 36 |

ภาพที่ ก-4 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 4 36

ภาพที่ ก-5 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 7 37

ภาพที่ ก-6 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 10 37

ภาพที่ ข-1 แสดงการหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด 38

ภาพที่ ค-1 แสดงผลร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า, ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าหลังแคลไซน์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก..... 41

ภาพที่ ค-2 แสดงผลร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 1%, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 4%, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 7% และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10%..... 42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ปัญหาวิกฤตด้านสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สะสมอย่างยาวนานและมีแนวโน้มทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก อันส่งผลให้มีสารปนเปื้อนและสีย้อมตกค้างในน้ำทิ้งปริมาณสูงขึ้นไปด้วย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ วิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีการดูดซับ (Adsorption), วิธีการโอโซนชัน (Ozonation), วิธีออสโมซิสแบบผันกลับ (reverse osmosis) วิธีการตกตะกอน (Coagulation technique) และวิธีการเพนโต-ออกซิเดชัน (Fenton oxidation) โดยวิธีการที่กล่าวมานั้นถือว่ามีปลอดภัยและน่าเชื่อถือ แต่อาจให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันหรือเกิดความยุ่งยากในการควบคุมกระบวนการต่างกัน ในปัจจุบันวิธีการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบวิวิธพันธุ์กำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้ต้นทุนในการบำบัดต่ำ (Jantawasu 2008, ปิยะฉัตร และ ปุณยภา 2015, พชรสกล 2018)

การบำบัดทางเคมีโดยวิธีการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบวิวิธพันธุ์เป็นกระบวนการทำลายสารอินทรีย์โดยอาศัยแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในวัฏภาคต่าง (Carp, Huisman et al. 2004) โดยเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากการกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอน (e^-) ในแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนบริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ($-O_2$) และในบริเวณแถบวาเลนซ์ที่อิเล็กตรอนหายไปจะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (h^+) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot OH$) ซึ่งทั้งซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลและไฮดรอกซิลแรดิคัลสามารถเกิดการออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Saravanan, 2017)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการทำมาความสะอาดสิ่งแวดล้อม (Fujishima และ Zhang 2006) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นพิษต่ำ ราคาไม่แพงและมีเสถียรภาพสูง แต่ถึงกระนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาเจือด้วยเหล็กเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีรีแอกทีฟ
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสีรีแอกทีฟ

1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง
2. ปริมาณการเจือหลักในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

1.4 วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงปริมาณด้วยการวิจัยแบบทดลอง มีรายละเอียดการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ดำเนินการขอเข้าใช้บริการเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
3. จัดเตรียมสารเคมีที่เกี่ยวข้องและสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการทดลอง
4. วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอมของวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)
5. ทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีรีแอกทีฟเรดภายใต้อิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษา และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (UV-visible Spectrophotometer)
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง พร้อมจัดทำสรุปเล่มรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

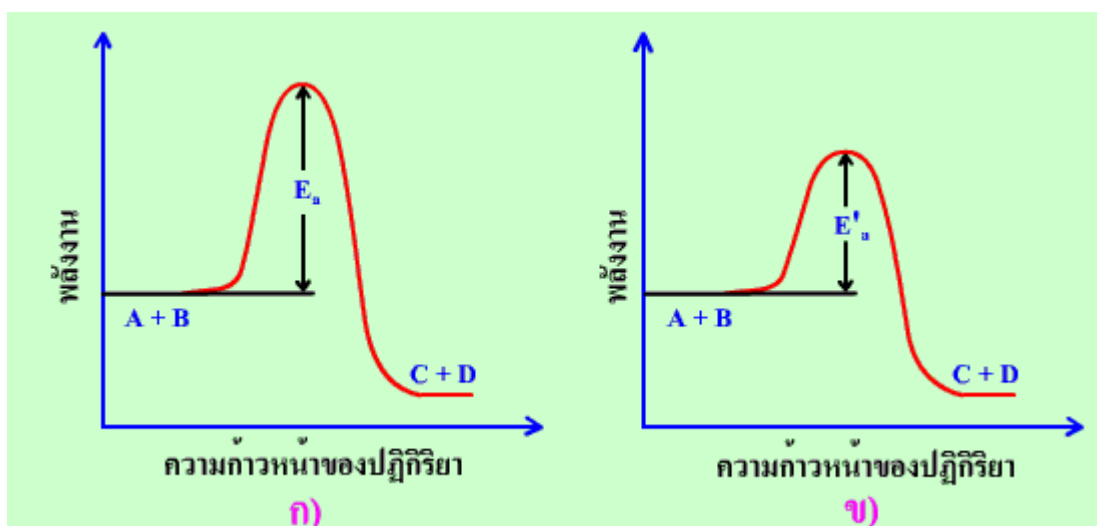
ความรู้เชิงวิชาการและประสบการณ์ที่สามารถนำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อมต่อไปในอนาคต เช่น การปรับใช้ความรู้เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของสีรีแอกทีฟในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และการลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาด้านสุขภาพที่เกิดจากการปนเปื้อนสีรีแอกทีฟในแหล่งน้ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis process)

การเร่งปฏิกิริยา หมายถึงการทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยเพิ่มเส้นทางทำให้พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาลดลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น แต่พลังงานรวมของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะไม่เปลี่ยนแปลง โดยภาพที่ 2.1 (ก) แสดงถึงพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะเห็นว่ามีค่าสูงและมีค่าพลังงานของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่าพลังงานของสารตั้งต้น และในภาพที่ 2.1 (ข) แสดงถึงพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโดยที่มีพลังงานของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เท่าเดิม



ภาพที่ 2.1 แสดงพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ก)

และแสดงพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (ข)

(ที่มา <https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/kinetics/catalyst.htm>)

2.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา (Type of catalytic)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์แบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้น เช่น ของเหลว-ของเหลว โดยจุดเด่นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้คือมี

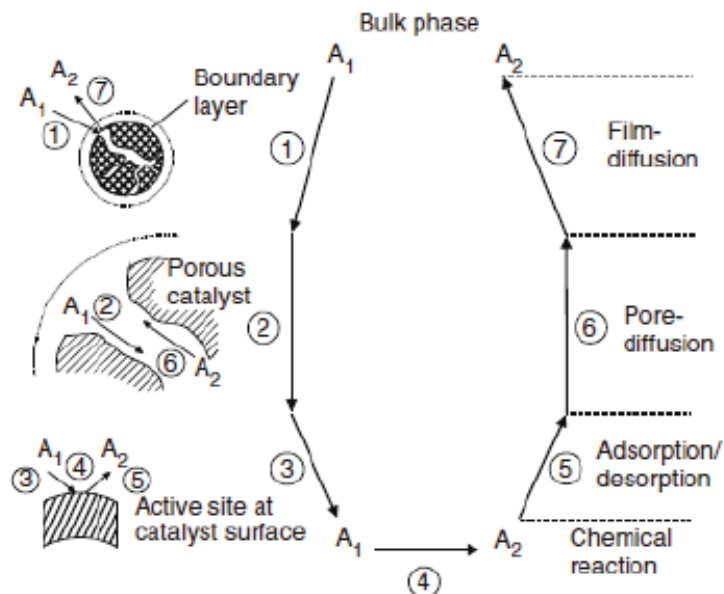
ความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยามากจึงสามารถให้สารผลิตภัณฑ์ได้มาก แต่มีข้อเสียตรงมักสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่มีความสูง และการแยกระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารผลิตภัณฑ์ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ต่างสถานะกับสารตั้งต้น เช่น ของแข็ง-แก๊ส หรือ ของแข็ง-ของเหลว โดยมีจุดเด่นที่การแยกระหว่างสารผลิตภัณฑ์กับตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถได้ได้ง่ายและสะดวกกว่า แต่มีข้อเสียตรงให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Karaked, 2013)

2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis Process)

การถ่ายโอนมวลสารของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังนี้

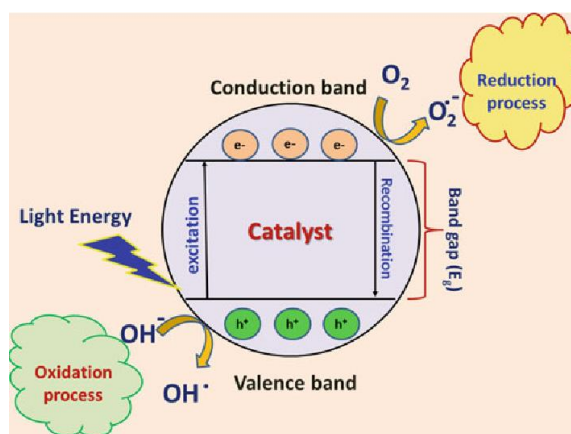
1. การแพร่ของภายนอกของสารตั้งต้น เป็นการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นจากของไหลผ่านชั้นฟิล์มมายังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในขั้นตอนนี้จะยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี
2. การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน เป็นการเคลื่อนที่ของสารตั้งต้นบริเวณผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในขั้นตอนนี้อาจเกิดการชนกันของโมเลกุลสารตั้งต้นกับผนังของรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาได้
3. การดูดซับ เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างสารตั้งต้นกับผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. การเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไว เป็นการเกิดสารผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาภายหลังการดูดซับ
5. การคายซับของผลิตภัณฑ์ เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเสร็จสิ้น
6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้นตอนย้อนกลับของการดูดซับคือสารผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ออกจากบริเวณรูพรุนมายังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหลที่ไหลผ่านรอบตัวเร่งปฏิกิริยา (เอกรัตน์, 2014)



ภาพที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Dittmeyer and Emig 2008)

2.4 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process)

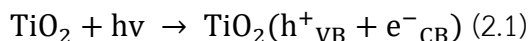
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เป็นกระบวนการที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้นเพื่อใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยมีหลักการคือเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากการกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอน (e^-) ในแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนบริเวณพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ($\cdot O_2$) และในบริเวณแถบวาเลนซ์ที่อิเล็กตรอนหายไปจะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (h^+) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot OH$) ซึ่งทั้งซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลและไฮดรอกซิลแรดิคัลสามารถเกิดการออกซิไดส์กับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์



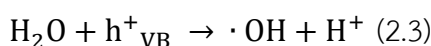
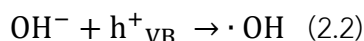
ภาพที่ 2.3 แสดงกระบวนการกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Saravanan, 2017)

2.4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

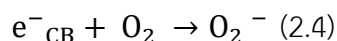
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในการกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเพื่อใช้ในการสลายตัวของสีย้อมโดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (Yang, 2006)



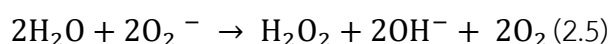
โดยในสารละลายหลุมอิเล็กตรอน (h^+) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ในน้ำได้เป็น



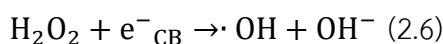
โดยที่ไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) จะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์กับสารอินทรีย์ในสารละลาย และอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ที่มีอยู่ในระบบได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ



จากนั้น O_2^- จำทำปฏิกิริยากับ H_2O ได้เป็น H_2O_2 ดังสมการ



โดยที่ H_2O_2 ที่ได้จะทำปฏิกิริยาต่อกับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า



ซึ่งทั้ง $\cdot\text{O}_2^-$ และ $\cdot\text{OH}$ จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น H_2O และ CO_2 (Liu, 2013)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของสีย้อมด้วยแสง

2.5.1 ความเข้มแสงและความยาวคลื่น (Light intensity and wavelength)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีความสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมของอิเล็กตรอน โดยช่วงความเข้มแสงที่เหมาะสมมักอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ดีซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ

2.5.2 อุณหภูมิของปฏิกิริยา (Reaction temperature)

อุณหภูมิของปฏิกิริยาถือว่าเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หากอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงหรือต่ำไปจะส่งผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงอันเนื่องมาจากการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมอิเล็กตรอนที่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

2.5.3 ค่าพีเอชของสารละลาย (pH solution)

ค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อการเปลี่ยนค่าประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งค่าประจุบนพื้นผิวมีผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ในสารละลาย โดยค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเพิ่มหรือลดของปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่พื้นผิวซึ่งมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล

2.5.4 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst loading)

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาหากมีปริมาณที่น้อยเกินไปจะส่งผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้า แต่ถ้าหากมีมากเกินไปก็จะส่งผลทำให้แสงที่ส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไปบดบังจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้า

2.5.5 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา (Crystal structure)

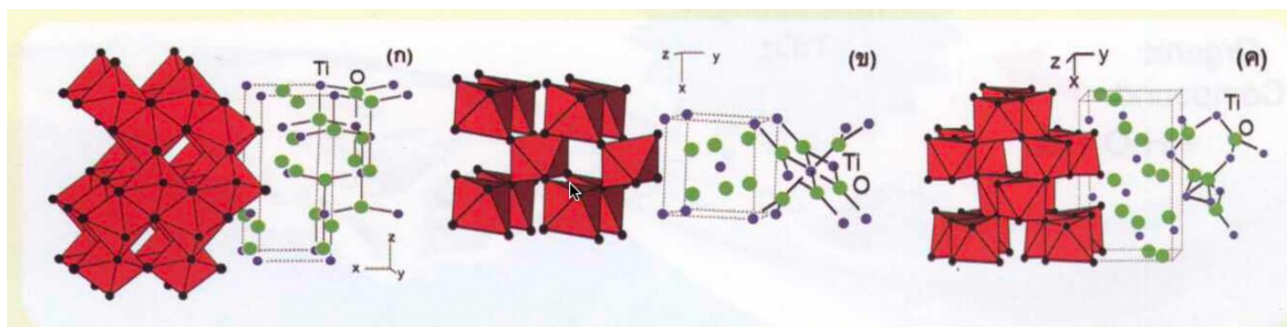
โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการกำจัดสีย้อม ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3 ชนิด ได้แก่ อนาเทส รุไทล์ และบรูคไคต์ โดยผลึกทั้งสามชนิดจะมีค่าพลังงานแถบการนำที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลให้เกิดการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนได้ไม่เท่ากัน

2.5.6 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface area)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวมากจะส่งผลทำให้สามารถดูดซับกับสารอินทรีย์บริเวณผิวได้มากขึ้นทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้มากขึ้นตามไปด้วย (Ajmal, Majeed et al. 2014, นิตดา 2555)

2.6 ลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Characteristics of Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของผลึกที่สำคัญ 3 รูป คือ อนาเทส (anatase) รุไทล์ (rutile) และบรูคไคต์ (brookite) โดยที่เฟสของอนาเทสและรุไทล์จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ส่วนบรูคไคต์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก โดยทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_6 octahedral) อะตอมไทเทเนียมหนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนหกอะตอม โครงสร้างแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับกระบวนการบดเปียกของการจัดรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบ มุม และหน้า ดังแสดง



ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคต์ (brookite)

ไทเทเนียมไดออกไซด์นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสงอย่างแพร่หลายด้วยเหตุผลหลายประการคือ สามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสง มีความเสถียรทางแสงและเคมี มีราคาถูกและสามารถเตรียมในรูปแบบผลึกเล็กได้ง่าย (นัตดา, 2555)

2.7 สีย้อม (Dye)

สีเป็นพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมกล่าวคือ ในปัจจุบันสีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อความคงทนสูง ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้น้ำที่ผ่านออกจากการบำบัดดังกล่าวยังคงมีความเข้มข้นสูง จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีออกจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สีย้อม (Dry) เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อดูดกลืนหรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บนผิวหน้าของวัตถุ เพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานจะต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมและพันธะในการยึดติดกับวัตถุ การทำให้สีย้อมมีความคงทนและมีความสดใสของสีจึงต้องมีการใช้สารโลหะหนักเข้ามาช่วย ได้แก่ แมงกานีส ทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว พรอท เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงมีการปนเปื้อนโลหะหนักและก่อให้เกิดปัญหาจากความเป็นพิษของโลหะหนัก

2.7.1 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกสีย้อมมีด้วยกันหลายระบบ เช่นการจำแนกจากแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้าง โดยระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบดัชนี (Color Index) ที่แบ่งตามการใช้งานได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะประเภทและสมบัติของสีย้อม (ศุภมาส, 2556)

| ประเภทของสีย้อม | สมบัติ |
|-----------------------|--|
| 1. สีเอซิด (acid dye) | เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน |

| | |
|--|--|
| 2. สีไดเร็กต์ (direct dye) | เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส |
| 3. สีเบสิก (basic or cationic dye) | เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี |
| 4. สีดิสเพอร์ส (disperse dye) | ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติการกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี สีดิสเพอร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากหมู่เคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน |
| 5. สีรีแอกทีฟ (reactive dye) | ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ |
| 6. สีอะโซอิก (azoic acid) | ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ ใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรือ อะซิเตท |
| 7. สีแคต (cat dye) | ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีเว็ทละลายน้ำ โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีเว็ทมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด |
| 8. สีมอร์แดนต์ หรือ โครม (mordant or chrome dye) | เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้ว ละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี |
| 9. สีอินเกรน (Ingrain dye) | ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ใช้สำหรับย้อมฝ้าย |
| 10. สีออกซิเดชัน (oxidation dye) | ไม่ละลายน้ำ อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้ย้อมฝ้ายและขนสัตว์ |
| 11. สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) | ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ นิยมนำมาย้อมฝ้าย |

ตารางที่ 2.2 แสดงการจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ, 2539)

| ประเภทสีย้อม | สมบัติทางกายภาพและเคมี | เส้นใยที่เหมาะสมกับการย้อม | พันธะหรือกลไกการติดสี | วิธีใช้ทั่วไป |
|-----------------------------|--|---|---------------------------------------|--|
| สีย้อมเอซิด | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น | - ไนลอน - ขนสัตว์ | -พันธะไอออนิก | - แชนเส้นใยในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ต่าง3.0-5.0 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมประจุลบที่ที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส |
| สีย้อมรีแอคทีฟ | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น | - ฝ้าย - ขนสัตว์ | -พันธะโควาเลนต์ | - แชนเส้นใยในสารละลายกรด - เติมต่างเพื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใย |
| สีย้อมไดเรกต์ | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น | - ฝ้าย - วิสกอส | - พันธะไอออนิก | - แชนเส้นใยในการละลายต่างอ่อน - เติมอิเล็กโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส |
| สีย้อมเบสิค | กระจุก ละลายน้ำน้อย | -อะครีลิก | -พันธะไอออนิก | - แชนเส้นใยในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ต่าง 4.0-6.0 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส |
| สีย้อมเมทัลลคอมเพล็กซ์เอซิด | - กระจุก - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่นดี | -ไนลอน -ขนสัตว์ | -พันธะไอออนิก | - แชนเส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ต่าง 5.0-7.0 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมประจุลบที่ที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส |
| สีย้อมดิสเพอร์ส | - ไม่ละลาย/ ละลายน้ำได้น้อย - กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี | - อะครีลิก -โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อีซีเตต | - คอลลอยด์ของสีย้อมติดติดกับผิวเส้นใย | - แชนเส้นใยในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ต่าง 4.0-5.0 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส |

| | | | | |
|----------------|--|--------------------|---|--|
| สีย้อมซัลเฟอร์ | - เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำสี ติดแน่น | - ฝ้าย - วิสคอส | - ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ |
| สีย้อมแวต | - เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำสี ติดแน่น | - ฝ้าย - วิสคอส | -ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึก ภายในเส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ |
| สีย้อมแอสโซอิก | - เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำสี ติดแน่น- | - ฝ้าย - วิสคอส | -ปฏิกิริยา ตกตะกอนผลึกใน เส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก |

2.8 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลสเกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงจึงมีความคงทน ต่อการซักสีย้อมรีแอคทีฟ นอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับ หมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยเซลลูโลสได้แล้วยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วยทำให้เกิดการสูญเสียสีย้อมรีแอคทีฟบางส่วนไป

2.8.1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ

กลุ่มเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ ประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้

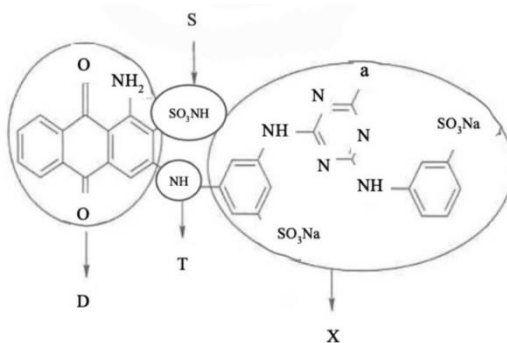
S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค ($-SO_3Na$) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่นกลุ่ม $-NH-$ $-NHCO-$ $-SO_2-$ และ $-NCH_3-$ เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจจะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง โดยไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่เป็นเฮตเตอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic) ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของเฮตเตอโรไซคลิกอะโรมาติกมีอิทธิพลอย่างมาก ต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่นๆของสี ตัวอย่างโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟ

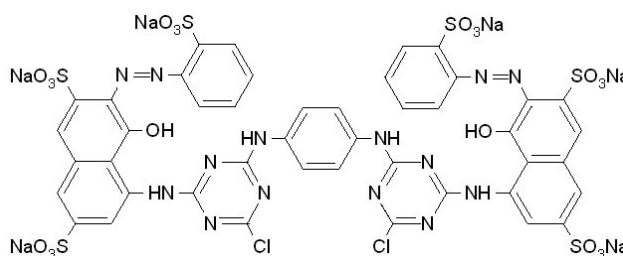


ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟ (วรรณวิภา, 2547)

2.8.2 สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงคุณสมบัติของสีย้อมรีแอคทีฟเรด120

| | |
|----------------------|--|
| ประเภทสีย้อม | Azo textiles dry Reactive red 120 |
| มวลโมเลกุล | 1338.0869 g/mol |
| สูตรโครงสร้างโมเลกุล | C ₄₄ H ₃₀ Cl ₂ N ₁₄ O ₂₀ S ₆ |
| ลักษณะกายภาพ | ของแข็ง |
| ความสามารถในการละลาย | ละลายในน้ำ(60-70 mg/ml ที่ 20 องศาเซลเซียส) |
| จุดหลอมเหลว | >350 องศาเซลเซียส |



ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด120 (Reactive red 120)

(ที่มา: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/r0378?lang=en®ion=TH>)

2.9 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยสีย้อมและสารเคมีต่างๆ มากมาย เมื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำและมนุษย์(Sun 2010, เสมรัตน์ 2543, ปฏิเวธ 2543)

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

| ผลของน้ำเสีย | ผลกระทบที่เกิดขึ้น |
|--|---|
| ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง | <ul style="list-style-type: none"> - สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน - ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ - ทำให้เกิดกลิ่น |
| สารเคมีบางตัวเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต | <ul style="list-style-type: none"> - เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ - เป็นอันตรายต่อมนุษย์โดยตรงหากบริโภคสัตว์น้ำที่ได้รับพิษเข้าไป |
| ค่าความเป็นด่าง | <ul style="list-style-type: none"> - น้ำเสียที่มีความเป็นด่างสูงหากปล่อยลงสู่ธรรมชาติจะเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตในน้ำ เพราะโดยปกติสิ่งมีชีวิตจะสามารถดำรงชีพอยู่ได้น้ำที่สถานะเป็นกลาง |
| อุณหภูมิ | <ul style="list-style-type: none"> - เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ - ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง |
| ของแข็งที่ละลายน้ำ | <ul style="list-style-type: none"> - ของแข็งที่ละลายในน้ำบางตัว จะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นโรคได้ |
| สี | <ul style="list-style-type: none"> - ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ - ทำให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงสาแหล่งน้ำลดลง - ส่งผลให้พืชน้ำสังเคราะห์แสงไม่ได้ |
| โลหะหนัก | <ul style="list-style-type: none"> - ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรค - เป็นอันตรายหากโลหะหนักสะสมอยู่ในระบบนิเวศน์ |

2.10 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียแต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมและการเลือกวิธีการกำจัดที่เหมาะสม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.10.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ต่าง ซึ่งสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนการบำบัดทางชีวภาพ หรือวิธีบำบัดอย่างอื่น สารที่ช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอออนของอลูมิเนียม(Al^{3+}) แคลเซียม (Ca^{2+}) และเฟอร์ริก

(Fe³⁺) เป็นต้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสารช่วยสร้างตะกอนแต่ละชนิด โดยมีค่าความเป็นกรด ต่างเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการตกตะกอน โดยหากค่าความเป็นกรด ต่างอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมอาจไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยตกตะกอนมากเกินไป

Hai และคณะ. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมกลุ่มเอโซ ได้แก่ สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมแอซิด และสีย้อมเบสิคด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีจากการศึกษาพบว่ากระบวนการ ตกตะกอนทางเคมีไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง และพบว่า การเกิดตะกอนของสีย้อมในกลุ่มเอโซโดยใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอนไม่สามารถทำได้เนื่องจากสีย้อมในกลุ่มเอโซมี โมเลกุลขนาดเล็ก

2.10.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation and Reduction)

การออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมีเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีไปอยู่ในรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสี สารเคมีที่ใช้จะเลือกจากศักยภาพในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ จากการศึกษาพบว่าสารที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ได้แก่ คลอรีน โอโซน และเพนตันรีเอเจนต์ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย โอโซนเนชัน (Ozonation) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากการที่โอโซนไปออกซิไดซ์พันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลของสีย้อม เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อมจะออกซิไดซ์ไปอย่างรวดเร็วและส่วนใหญ่จะสร้างสารประกอบชนิดใหม่ขึ้นมาที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม แต่มีข้อดีคือ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ปริมาณมากและใช้เวลาในการบำบัดน้อย

Sundrarajan และคณะ. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน จากการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟได้ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาทีโดยสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟได้ถึงร้อยละ 90 และสามารถกำจัดสีโอติได้ร้อยละ 50

แสวง เกิดประทุม, ชนาภานต์ อาษาสุจริต และ อธิษฐาน ทิมแย้มประเสริฐ (2551) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียที่ได้จากขั้นตอนการย้อมตัว สีย้อมรีแอคทีฟจากการศึกษาพบว่า สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียจาก 1080 เอดีเอ็มไอ เหลือ 119 เอดีเอ็มไอ

2.10.3 เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรองสามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้อีกทั้งสามารถนำสารเคมีที่ใช้ในสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรองจะเป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเยื่อกรองในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อกรองไปได้ซึ่งสามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น

Qin และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการเยื่อกรองมีข้อดี คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง แต่ก็มีข้อเสียคือ ต้นทุนสูงและปัญหาการอุดตัน การกำจัดตะกอนที่เหลือจากการแยกออกจากน้ำเสีย

2.10.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Adsorption on active carbon powder)

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นเทคนิคการดูดซับสีไวบนผิวของถ่านกัมมันต์ซึ่งเทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงแต่การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีข้อจำกัดในเรื่องของราคาที่สูง ทำให้ไม่เป็นที่นิยม (ณัฐพันธุ์, 2546)

2.10.5 กระบวนการเร่งด้วยแสง (Photocatalysis process)

กระบวนการเร่งด้วยแสง เป็นวิธีที่กำลังเป็นที่นิยมและเป็นทางเลือกใหม่อีกวิธีหนึ่งโดยใช้โฟโตคะตะลิสต์เป็นคำที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือโฟโต (Photo) หมายถึง การใช้แสงเข้าร่วมในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และคะตะลิสต์ (Catalyst) หมายถึง วัสดุหรือสารประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของผงหรือฟิล์มสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยที่ตัวเองไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่ จะนิยมใช้โฟโตคะตะลิสต์ในการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous photocatalysis) ยกตัวอย่างข้อดีของกระบวนการเร่งด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคือสามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีความเสถียรทางแสงและเคมี มีราคาถูกและสามารถเตรียมในรูปแบบผลึกเล็กได้ง่าย (นิตดา, 2555)

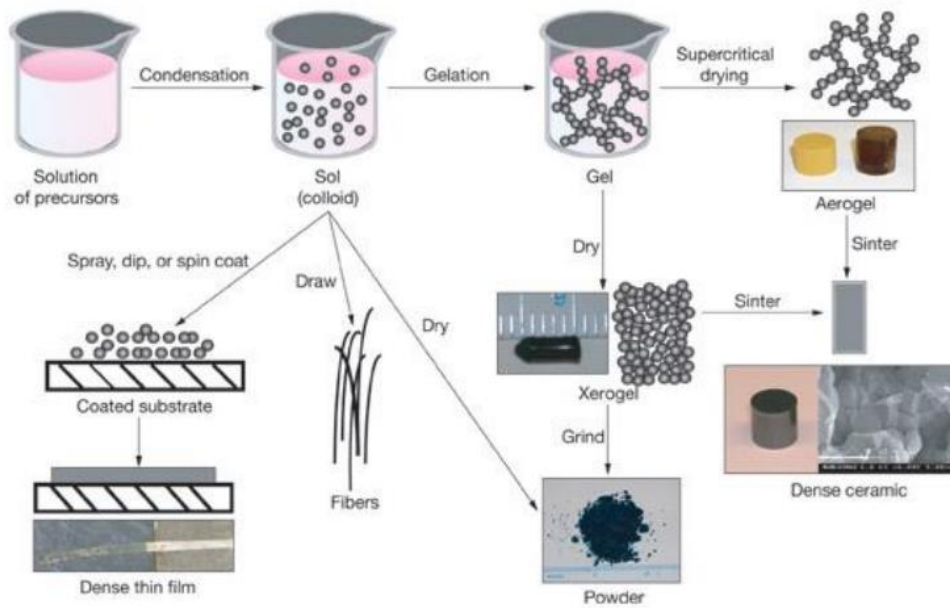
2.11 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Preparation of the catalyst)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีอยู่หลากหลายวิธี เช่น วิธีเคลือบฝัง, ไฮโดรเทอร์มอล หรือการตกตะกอนร่วม (สิทธิสุนทร 2543) แต่สำหรับในการวิจัยครั้งนี้เลือกเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านโซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถเตรียมได้ในอุณหภูมิต่ำ และปรับปรุงโครงสร้างได้หลากหลาย

2.11.1 วิธีการโซล-เจล (Sol-gel method)

กระบวนการโซล-เจล เป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้สังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า โซล ซึ่งเป็นสารแขวนลอยที่มีขนาด 0.1 – 1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า เจล โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา โดยสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะโซล และเมื่อโซลเกิดการเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเจล ซึ่งในกระบวนการโซล-เจล เมื่อดำเนินการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ เส้นใย แอโรเจล ซีโรเจล เคลือบฟิล์ม และอนุภาคผง

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การควบแน่นด้วยน้ำ และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ความเป็นกรด-ด่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ

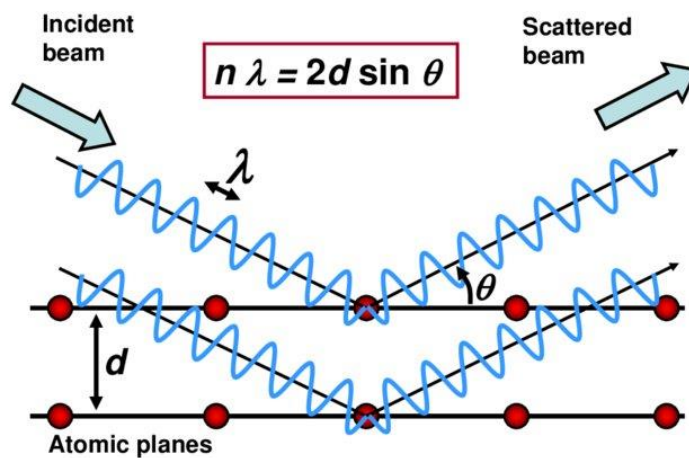


ภาพที่ 2.7 แสดงการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการโซล-เจล (หทัยทิพย์, 2556)

2.12 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.12.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัตถุชั้นพื้นฐาน เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในสารประกอบทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงแสงของรังสีเอกซ์ซึ่งมีหลักการคือ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ



ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Nasir, 2018)

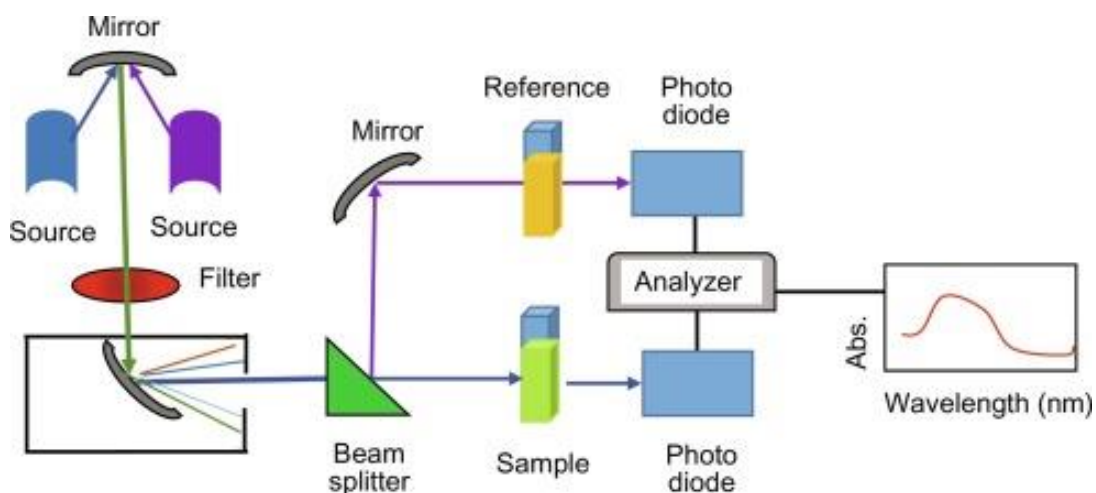
กฎของแบร็ก (Bragg's law) เป็นเป็นกฎที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ตกกระทบ มุมตกกระทบและระยะห่างของอะตอมซึ่งเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเมื่อเราทราบความยาวคลื่นและมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนจะสามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ จากสมการ

$$2d_{(hkl)}\sin\theta = n\lambda \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- D = ขนาดผลึก (Å)
 - K = แฟกเตอร์ของรูปร่างผลึก (K = 0.89)
 - λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (สำหรับ CU $K\alpha$ มีค่าเท่ากับ 0.154056 nm)
 - B = ความกว้างตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีคการเลี้ยวเบนสูงสุด มีหน่วยเรเดียน
 - θ = มุมของพีคจากรูปผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ มีหน่วยองศา

2.12.2 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (UV-vis spectrophotometer)

เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ โดยเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ (ศุภย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2021)



ภาพที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ (House, 2018)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kaur และ Singh (2007) ทำการศึกษากระบวนการย่อยสลายสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 198 ด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 198 ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสี้อมตั้งต้น ความเป็นกรด-ด่างของสี้อมตั้งต้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าจลนพลศาสตร์การย่อยสลายด้วยแสงเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir – Hinshelwood ซึ่งอัตราการย่อยสลายของสี้อมแปรผกผันกับความเข้มข้นของสี้อมตั้งต้นและความเป็นกรด-ด่างของสี้อมตั้งต้น แต่แปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงต้นการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายสี้อมแต่จะลดลงเนื่องจากการบดบังแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารละลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 198 คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.3 gL^{-1} ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 3.5 ความเข้มข้นสี้อม 50 mgL^{-1} และปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม 5 mL^{-1} โดยสามารถย่อยสลายสี้อมรีแอคทีฟเรด 198 ได้ถึง 99 ร้อยละในระยะเวลา 45 นาที และลดค่าซีโอดีจาก 104 เหลือ 5 mgL^{-1} เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ภายใต้แสงยูวี นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำจะส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายสี้อมลดลงโดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 4 ครั้งประสิทธิภาพพลดลงเหลือ 40 ร้อยละเท่านั้น ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนสภาวะแสงเป็นแสงอาทิตย์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากแสงยูวี

Pirinejad และคณะ (2018) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก ไนโตรเจนและโครเมียม ที่ถูกตรึงบนเบดแก้วภายใต้การฉายแสงในช่วงแสงที่มองเห็นเพื่อกำจัดสี้อมออกจากน้ำที่ปนเปื้อนสี้อม โดยเลือกใช้หลอดไฟแอลอีดีเป็นแหล่งกำเนิดแสงและทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่สังเคราะห์ด้วย SEM, EDX, XRD และ FTIR จากนั้นทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ชนิดของสารที่นำมาเจือ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม ความเข้มแสง และระยะเวลาในการฉายแสง จากผลการศึกษา พบว่าการกำจัดสี้อมในสภาวะที่เป็นกรดให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสภาวะที่เป็นกลางและสภาวะที่เป็นด่าง และประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ความเข้มแสง และระยะเวลาการฉายแสง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 เป็น 10 มิลลิกรัม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 39 เปอร์เซ็นต์ เป็น 98 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มแสงจาก 358 ลักซ์ เป็น 980 ลักซ์ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมเพิ่มขึ้นจาก 11 เปอร์เซ็นต์ เป็น 74.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี้อมลดลงจาก 72 เปอร์เซ็นต์เหลือเพียง 10.8 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า (Commercial Titanium dioxide, Ajax Fine chem)
2. ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium iso-propoxide, 97% Aldrich)
3. เอทานอล (Ethanol, RCI Labscan)
4. กรดไนตริก (Nitric acid, QReC)
5. สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (Reactive red 120, Sigma)
6. กรดอะซิติก (Acetic Acid, QReC)
7. เหล็ก (III) ไนเตรตโนนาไฮเดรตเกรดงานวิเคราะห์ (Iron (III) nitrate nonahydrate, QReC)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน
4. ไมโครปิเปต
5. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ
6. เตาแคลไซน์อุณหภูมิสูง
7. ถ้วยกระเบื้อง
8. ไซริงค์ฟิวเตอร์ (PTFE Filter Media 0.2 μm pore size, Whatman)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. X-Ray diffractometer ของ Bruker
2. UV-vis spectrophotometer รุ่น Genesys 180

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงไททาเนียมไดออกไซด์ โดยการเจือโลหะเหล็กด้วยวิธีการโซล-เจล (Sol-gel) จากนั้นทำการศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการโฟโตแคทาไลติกต่อสีรีแอกทีฟแอกทีฟเรด และทำการเปรียบเทียบผลระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า, ไททาเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์, ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล และไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก และเปรียบเทียบผลของปริมาณเหล็กที่เจือลงไปไนไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแอกทีฟเรด 120 ที่เหลือด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (UV-Vis spectrophotometer)

3.2.1 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำการหยดกรดอะซิติกปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ลงในเอทานอลปริมาตร 54 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ได้เป็นสารละลาย A
2. เตรียมสารละลาย B โดยการค่อยๆใส่ไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ลงในเอทานอลปริมาตร 54 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. เตรียมสารละลาย C โดยการผสมเหล็ก (III) ไนเตรตโนนาไฮเดรตตามปริมาณที่ต้องการลงในน้ำกลั่นปริมาตร 33 มิลลิลิตร
4. นำสารละลาย A ค่อยๆหยดลงในสารละลาย B โดยตั้งกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. จากนั้นเติมสารละลาย C และกรดไนตริกปริมาตร 0.45 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่กวนผสมกันตามลำดับ
6. ทิ้งสารละลายที่ได้ไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเจลที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. นำไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบไปแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยไททาเนียมที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็ก (III) ไนเตรตโนนาไฮเดรต 1, 4, 7, 10 ร้อยละของน้ำหนัก โดยไททาเนียมที่ไม่ได้เจือเหล็กก็จะเตรียมด้วยกระบวนการเดียวกับที่อธิบายด้านบน

3.2.2 การเตรียมสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

เตรียมสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ความเข้มข้น 100 mg/L โดยการชั่ง reactive red 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร

3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอม

1. ทำการบดสารตัวอย่างให้มีความละเอียดมากที่สุด
2. ตักสารตัวอย่างปริมาณ 1-2 กรัม ลงใน sample holder แล้วใช้ glass plate กดอัดตัวอย่าง เพื่อให้มีผิวหน้าที่เรียบ
3. ดำเนินการวิเคราะห์ตัวอย่าง ได้แก่ โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า โทเทเนียมไดออกไซด์ หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และโทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก ตามลำดับ

3.2.4 การทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

1. นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดทดลอง
2. ชั่งโทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 0.2 กรัม (หรือใช้โทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า หากทำการทดสอบโทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าในปริมาณที่เท่ากัน) ใส่ลงในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และนำไปตั้งไว้บริเวณที่โล่งแจ้งเพื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ (แสงจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลา 9.00 -15.00 น. ที่มีความเข้มแสงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 130,000-100,000 ลักซ์) และทำการเก็บขวดที่เตรียมไว้เป็นทุกๆ 1 ชั่วโมง
3. เก็บสารตัวอย่างและกรองสารตัวอย่างผ่านไซริงค์ฟิวเตอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาต่อไป

3.2.5 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา

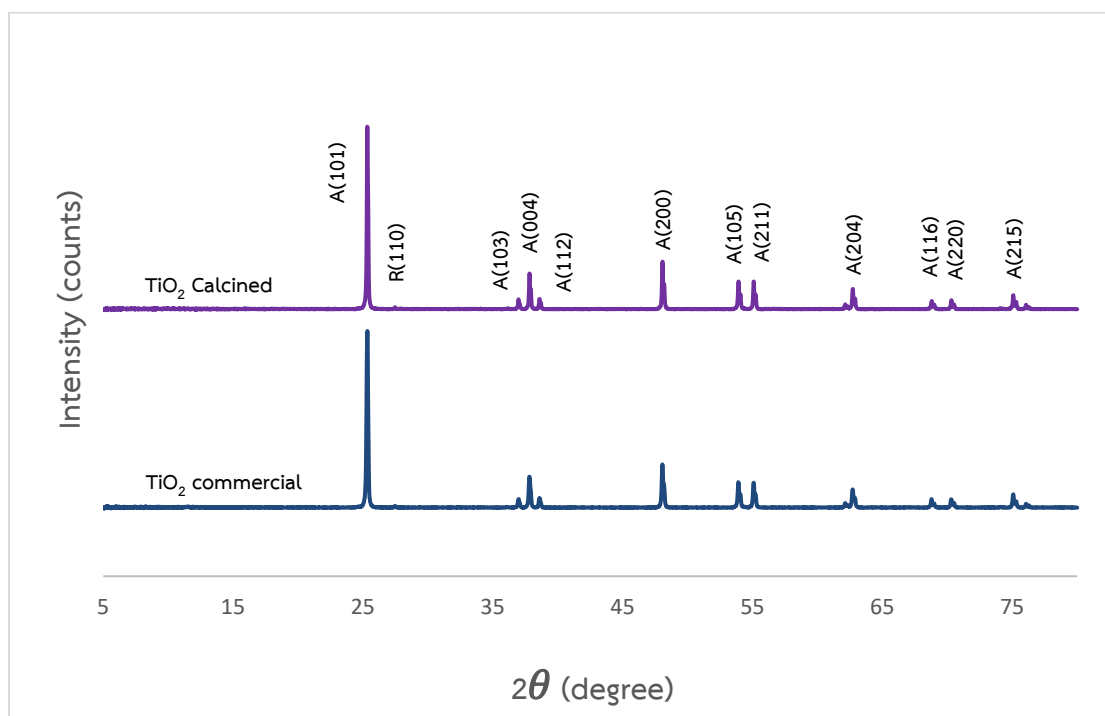
1. เปิดใช้งานเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (UV-visible Spectrophotometer) กำหนดช่วงความยาวคลื่นแสง 300 – 700 นาโนเมตร
2. ทำการ blank โดยใช้ น้ำกลั่นใส่ลง cuvette ซับด้านข้างของ cuvette ให้แห้ง
3. ใส่สารละลาย Reactive Red 120 ที่ได้จากการทดลองลง cuvette ซับด้านข้างของ cuvette ให้แห้งและสะอาด
4. วาง cuvette ในช่องสำหรับใส่ในเครื่อง ปิดฝาเครื่องและกด start เพื่อเริ่มการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

4.1.1 ผลของการแคลไซน์ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

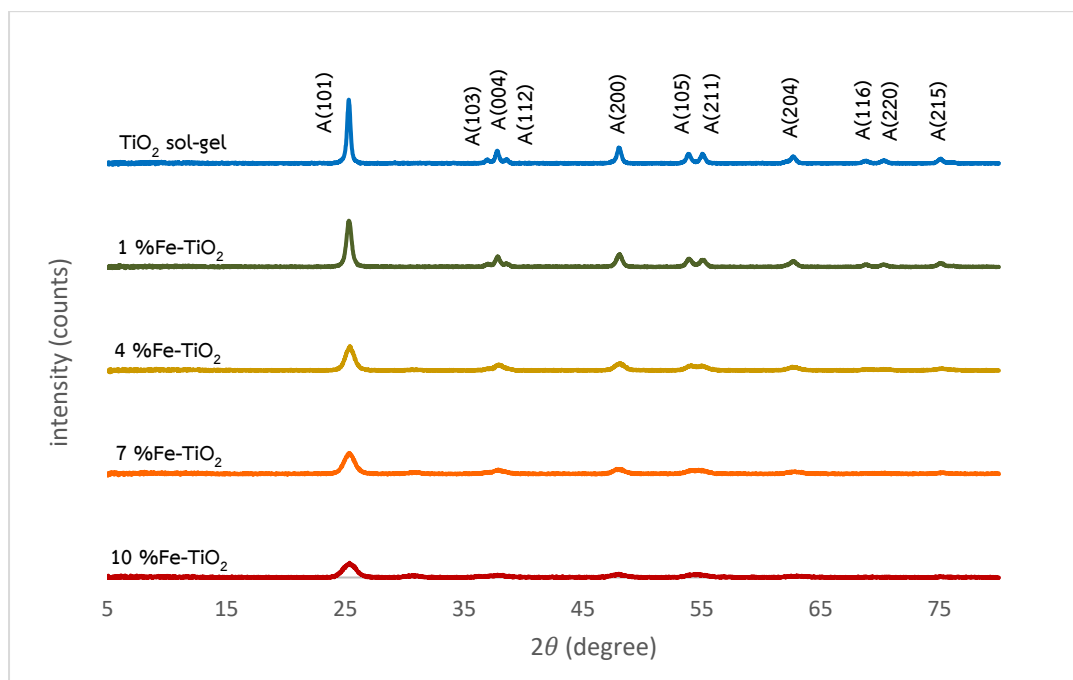


ภาพที่ 4.1 แสดงผลของการแคลไซน์ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า และไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะพบพีคการเลี้ยวเบนที่ 2θ สูงสุดที่ตำแหน่ง 25.3°, 36.9°, 37.8°, 38.6°, 48.0°, 53.9°, 55.1°, 62.7°, 68.8°, 70.3° และ 75.0° ซึ่งแสดงดัชนีมิลเลอร์ (1 0 1), (1 0 3), (0 0 4), (1 1 2), (2 0 0), (1 0 5), (2 1 1), (2 0 4), (1 1 6), (2 2 0) และ (2 1 5) ตามลำดับ โดยมีค่าตรงกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 21-1272 ที่ระบุโครงสร้างผลึกแบบอนาเทซของไทเทเนียมไดออกไซด์ และในตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนที่ 27.5° ซึ่งแสดงถึงดัชนีมิลเลอร์ (1 1 0) ของข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 73-1765 ที่ระบุโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Zhang, Wang et al. 2016) และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของการแคลไซน์ต่อการเป็นการเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้ากับไทเทเนียมไดออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมีความสูงพีคมากกว่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์จากที่ไม่มีรูปผลึกหรืออสัณฐาน

เป็นโครงสร้างแบบสัณฐานที่มีการจัดเรียงผลึกที่เป็นระเบียบและมีความเป็นผลึกมากยิ่งขึ้น (Juliet และคณะ, 2017)

4.1.2 ผลของการเจือเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



ภาพที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเจือเหล็กในปริมาณต่าง ๆ โดยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเจือด้วยเหล็กจะพบพีคการเลี้ยวเบนที่ 2θ สูงสุดที่ตำแหน่งประมาณ 25.3° , 36.9° , 37.8° , 38.6° , 48.0° , 53.9° , 55.1° , 62.7° , 68.8° , 70.3° และ 75.0° ซึ่งแสดงค่าดัชนีมิลเลอร์ (1 0 1), (1 0 3), (0 0 4), (1 1 2), (2 0 0), (1 0 5), (2 1 1), (2 0 4), (1 1 6), (2 2 0) และ (2 1 5) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 21-1272 ที่ระบุโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Zhang, Wang et al. 2016) และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณเหล็กที่เจือต่อการเป็นการเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก จะพบว่าเมื่อดำเนินการเพิ่มปริมาณเหล็กที่เจือลงในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นจะส่งผลให้ความสูงพีคต่ำลงและช่วงการเกิดพีคมีความกว้างเพิ่มขึ้น สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นผลึกลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าไอออนของเหล็กอาจรวมเข้าและอยู่ในโครงสร้างของไทเทเนียม

ได้ออกไซด์จากการแทนที่ของไอออน Fe^{3+} ที่มีรัศมีไอออนิกเท่ากับ 0.64 \AA ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรัศมีไอออนิกของ Ti^{4+} ที่มีค่าเท่ากับ 0.68 \AA (Totsaporn และคณะ, 2020)

4.1.2 การคำนวณขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผลึก แลททิซพารามิเตอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบของโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยา

| Photocatalyst | Crystallite size (nm) | Lattice parameter (\AA) | |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------|------|
| | | a = b | c |
| TiO ₂ commercial | 105.95 | 3.78 | 9.45 |
| TiO ₂ calcined | 116.70 | 3.78 | 9.44 |
| TiO ₂ sol-gel | 47.08 | 3.78 | 9.61 |
| 1% Fe-TiO ₂ | 31.69 | 3.78 | 9.61 |
| 4% Fe-TiO ₂ | 19.90 | 3.77 | 9.49 |
| 7% Fe-TiO ₂ | 14.83 | 3.79 | 9.36 |
| 10% Fe-TiO ₂ | 12.77 | 3.79 | 9.33 |

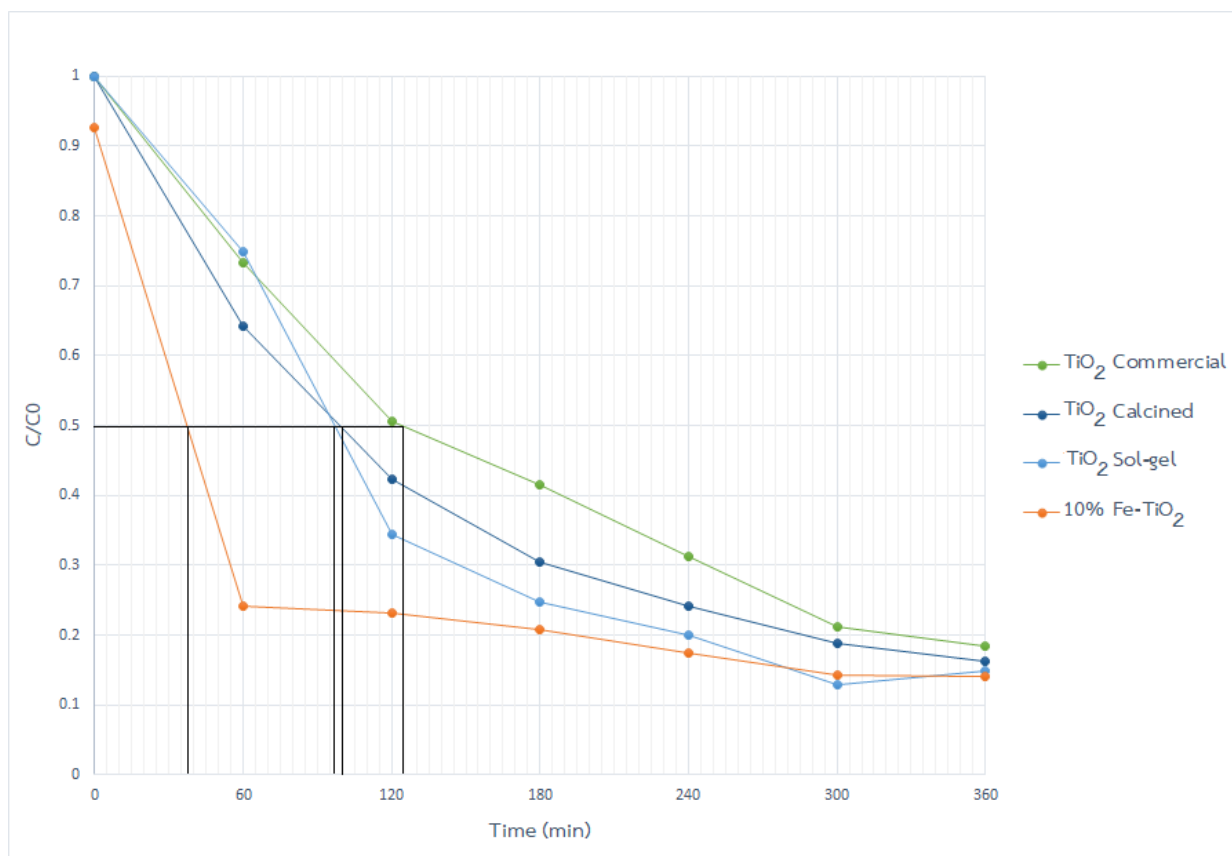
จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงขนาดของผลึก แลททิซพารามิเตอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบของโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดต่าง ๆ โดยเมื่อพิจารณาปริมาณของเหล็กที่เจือลงในตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จะพบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดผลึก (crystallite size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงลดลง โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการโซล-เจลมีขนาดของผลึกเท่ากับ 47.08 นาโนเมตร และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยเหล็ก 1%, 7% และ 10% มีขนาดผลึกเท่ากับ 31.69, 19.90, 14.83 และ 12.77 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยสามารถคำนวณมาจากสมการของเดอบาย เซอร์เรอร์ ในระนาบ (1 0 1) ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ซึ่งสอดคล้องกับแลททิซพารามิเตอร์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่สามารถคำนวณได้จากกฎของแบรกก์และลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล โดยพบว่าค่าความยาวในด้าน c ลดลงตามปริมาณการเจือเหล็กที่สูงขึ้น โดยมีค่าความยาวในด้าน c เท่ากับ 9.61 อังสตรอม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการโซล-เจล และมีค่าเท่ากับ 9.61, 9.49, 9.36, 9.33 อังสตรอม สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 1%, 4%, 7% และ 10% ตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการเจือเหล็กลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย ซึ่งเหตุผลที่เป็นไปได้จากเหตุการณ์นี้คือการที่ไอออนของเหล็กเข้าไปอยู่ใน

พื้นที่ว่างภายในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์หรืออาจเกิดจากการที่ Fe^{3+} เข้าแทนที่ Ti^{4+} บางส่วนภายในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Jing Zhang และคณะ, 2016)

4.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา

ดำเนินการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า, ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก และเปรียบเทียบผลของปริมาณเหล็กที่เจือลงไปไนไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นทำการวัดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟเฟรต 120 ที่เหลือด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดคลื่นแสงเหนือม่วงและคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตา (UV vis spectrophotometer) ในช่วง 400-900 นาโนเมตร

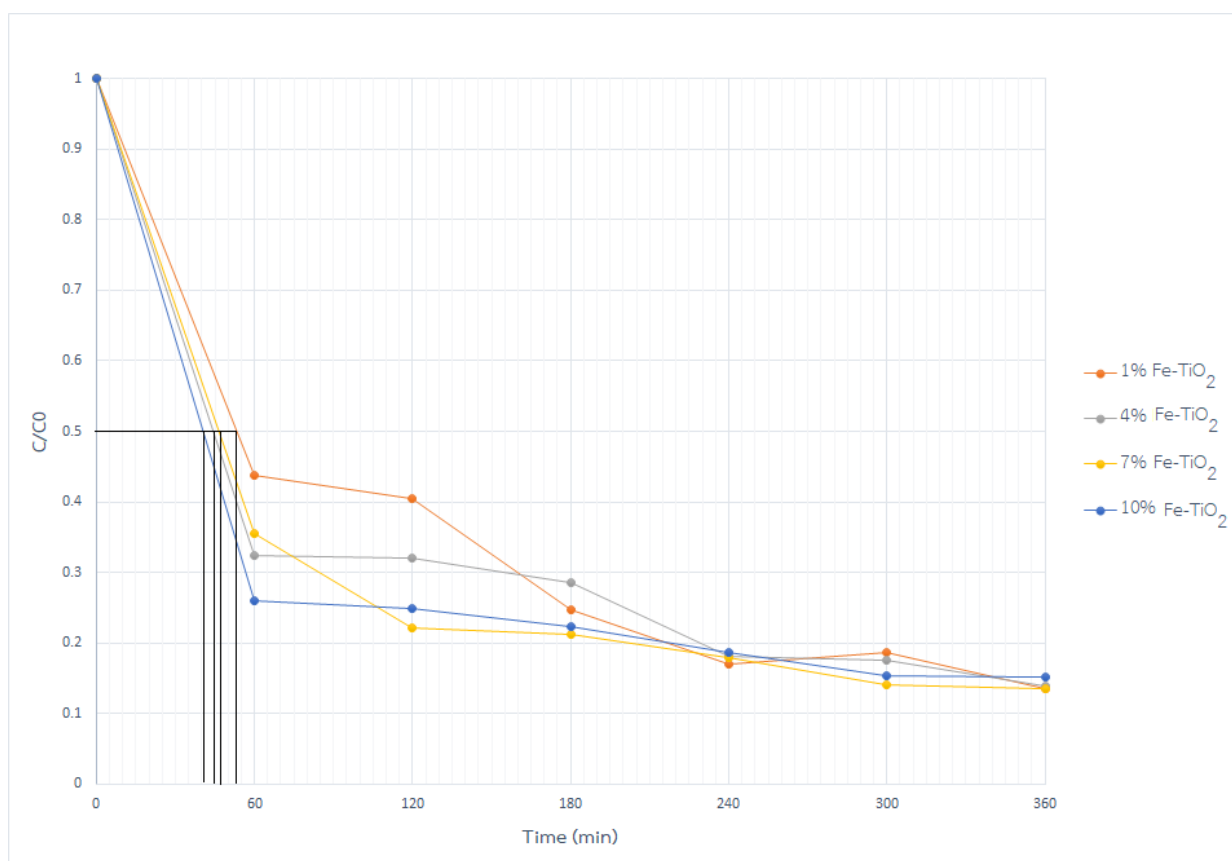
4.2.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.3 อัตราการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก

จากภาพที่ 4.3 แสดงร้อยละการกำจัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสีย้อมนั้น เกิดได้ดีในช่วง 2 ชั่วโมงแรก และสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 85 ที่เวลา 6 ชั่วโมง และจากรูป 4.3 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมที่ร้อยละ 50 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก สามารถการกำจัดสีย้อมภายใน 37 นาที ไทเทเนียมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล สามารถการกำจัดสีย้อมภายใน 1 ชั่วโมง 36 นาที ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า แคลไซน์ สามารถกำจัดสีย้อมภายใน 1 ชั่วโมง 40 นาที และไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า สามารถกำจัดสีย้อมภายใน 2 ชั่วโมง 5 นาที หลังจากผ่านการย่อยสลายสีย้อมที่ร้อยละ 50 แล้ว โดยสรุปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้สูงที่สุด รองลงมาคือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยโซล-เจล ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าแคลไซน์ และไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเจือเหล็ก จะช่วยกระตุ้นให้สารตัวอย่างสามารถสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ได้มากขึ้นภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ กล่าวคือการเจือธาตุโลหะทรานซิชันสามารถสร้างชั้นระดับพลังงานย่อยระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำ อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์สามารถเคลื่อนที่ไปยังชั้นระดับพลังงานย่อยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ ส่งผลให้การใช้พลังงานในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำลดลง เมื่อสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้มากขึ้นจะเพิ่มการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลและซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลมากขึ้นซึ่งเป็นเรดิคอลที่ทำหน้าที่ในการกำจัดสีย้อม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการได้ดีไว้มาก เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ผ่านการเจือเหล็ก และอีกเหตุผลคือขนาดของอนุภาคของตัวอย่างที่เจือเหล็กมีขนาดเล็ก การที่ขนาดของอนุภาคเล็กทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงสั้นลง และอัตราการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล มีค่าลดลงอย่างมาก (Narayana และคณะ, 2011)

4.2.2 ปริมาณการเจือเหล็กในตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.4 อัตราการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก ในปริมาณ 1%, 4%, 7% และ 10% ของน้ำหนัก

จากภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงต่อเวลาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กในปริมาณ 1%, 4%, 7% และ 10% ของน้ำหนัก ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าแนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงในการกำจัดสีย้อมนั้น เกิดได้ดีในช่วง 1 ชั่วโมง และสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 85 ที่เวลา 6 ชั่วโมง และจากรูป 4.2 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมที่ร้อยละ 50 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10% สามารถกำจัดสีย้อมภายใน 37 นาที ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 4% สามารถกำจัดสีย้อมภายใน 45 นาที ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 7% สามารถกำจัดสีย้อมภายใน 47 นาที และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 1% มีสามารถกำจัดสีย้อมภายใน 54 นาที โดยสรุปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10% มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้สูงที่สุดมากที่สุด เนื่องมาจากการเจือเหล็กจะช่วยสร้างข้อบกพร่องและช่องว่างที่เกิดจากออกซิเจนชั้นในไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงช่วยดักจับอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงอาทิตย์โดยการลดความเป็นไปได้ของการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงสามารถ

เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองหลังจากเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวเท่านั้น กล่าวคือตำแหน่งในการเจือเหล็กลงไปสามารถเป็นจุดให้เกิดการกลับมารวมตัวกันได้ดังนั้นก็จะมีค่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจือไอออนของโลหะ หากการเจือเหล็กมากเกินไปสามารถกลายเป็นจุดให้อิเล็กตรอนกลับมารวมตัวกันได้ และหากน้อยเกินไปปริมาณเหล็กที่เข้าไปช่วยในปฏิกิริยาเชิงแสงก็ลดลง จากการทดลองจึงกล่าวได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็ก 10% ของน้ำหนักมีปริมาณเหล็กที่เจือได้อย่างเหมาะสม นอกจากนั้นขนาดผลึกของไทเทเนียมที่เจือด้วยเหล็ก 10% ก็มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงอีกด้วย (Weichao li และคณะ 2020)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 120 โดยจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเคลือบผิวมีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้ามีโครงสร้างแบบสัณฐานและมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มปริมาณเหล็กที่เจือส่งผลให้ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงลดลง
3. การกำจัดสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะเกิดได้อย่างรวดเร็วในช่วง 2 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีที่ย่อยละ 50 ภายในระยะเวลา 37 นาที ซึ่งรวดเร็วกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการโซล-เจล ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ และไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ที่ใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 36 นาที, 1 ชั่วโมง 40 นาที และ 2 ชั่วโมง 5 นาที ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเรด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 กรัมต่อสารละลายสี 10 มิลลิตร ภายใต้การฉายแสงอาทิตย์
5. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10% ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีที่ย่อยละ 50 ได้ภายใน 37 นาทีซึ่งถือว่ารวดเร็วที่สุด รองลงมาคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 4%, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 7% และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 1% ที่ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเรด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.2 กรัมต่อสารละลายสี 10 มิลลิตร ภายใต้การฉายแสงอาทิตย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนสีรีแอกทีฟ
2. ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้บำบัดแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำเพื่อความประหยัด
3. ศึกษาการตรึงตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิววัสดุเพื่อลดการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาสู่สิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ชนิตา เสมรัตน์, ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

ณัฐพันธุ์ ศุภกา, การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ โดยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบแอนแอรอบิก-แอโรบิก. , วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

นัตตา เวชชากุล, ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบ. ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบ, 2555

ปฏิเวธ ชินเชษฐ, การบำบัดน้ำเสียสีดีสเพอร์สโดยกระบวนการยูเอเอสบี, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

ปิยะฉัตร และ ปุณยภา, Photocatalytic degradation of Reactive Red by photocatalytic TiO₂, Chemical Technology, Chulalongkorn University, 2015.

เพชรสกล ประยูรพันธุ์รัตน์, SIMULTANEOUS HYDROGEN PRODUCTION AND POLLUTANT REMOVAL FROM BIODIESEL WASTEWATER USING METAL-DOPED TiO₂ PHOTOCATALYST, Chemical Technology, Chulalongkorn University, 2018

มหาวิทยาลัยมหิดล, การเร่งปฏิกิริยา. [online]. สืบค้นได้จาก : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/kinetics/catalyst.htm>. [2020, December 20].

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, UV/VIS Spectroscopy. [online]. สืบค้นได้จาก : <https://www.nanotec.or.th> [2021, April 20].

วรรณวิภา ผลาหาญ, การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก, วิทยาศาสตรเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

ศุภมาส ด่านวิทยากุล, บทความเชิงค่อออกไซด์กับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมผ้า. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2556.

สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, Advanced Ceramics. MTEC, 2543.

แสวง เกิดประทุม, ชนากานต์ อาษาสุจริต, อธิษฐาน ทิมแย้มประเสริฐ, บำบัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยโอโซน. ThaiEnvironmentalEngineeringMagazine.5(4) (2551):15-18

หทัยทิพย์ พันฤทธิ์ดำ, การสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อฆ่าเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคใบร่วงของต้นยางพารา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556.

อภิชาติ หิรัญจิตต์, การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดซับผิวและโค แอ ก
กูเลชัน วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2539.

เอกรัตน์ วงษ์แก้ว, A study of preparation conditions of bimetallic oxides (Copper and Ferric) affecting to their physical properties and catalytic activity to CO oxidation reaction, Chemical Engineer, Burapha University, 2014.

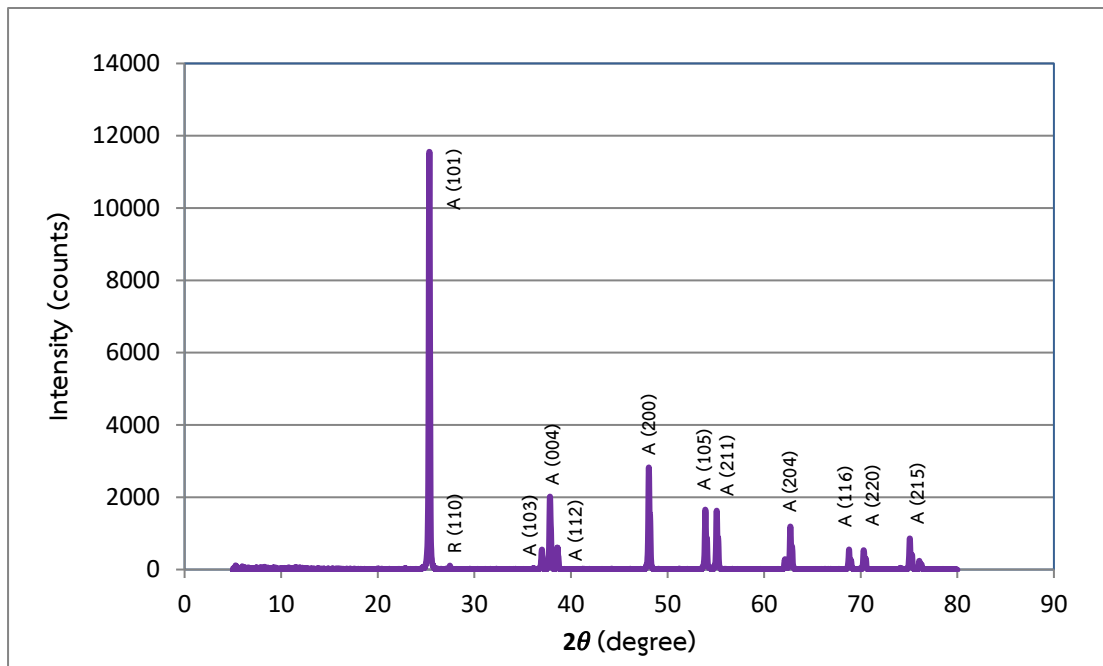
ภาษาอังกฤษ

- Ajmal, A., I. Majeed, R. N. Malik, H. Idriss, and M. A. Nadeem, Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *RSC Advances*, **4**, (2014) : 37003-37026.
- Annadurai, G., M. Chellapandian, and M. R. V. Krishnan, Adsorption of Reactive Dye on Chitin. *Environmental Monitoring and Assessment*, **59**, 111-119. Carp, O., et al. (2004). "Photoinduced reactivity of titanium dioxide." *Progress in Solid State Chemistry* **32** (1999) : 33-177.
- Dittmeyer, R., and G. Emig, Simultaneous Heat and Mass Transfer and Chemical Reaction. In: *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, vol.1., Fujishima, A. and X. Zhang (2006). "Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches." *Comptes Rendus Chimie* **9**(5) (2008) : 750-760.
- Hai Faisal Ibney, Yamamoto Kazuo, and Fukushi Kensuke, Hybrid Treatment Systems for Dye Wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **37**, (2007) : 315-377.
- House, J. E. Chapter 11 - Molecular Spectroscopy. In J. E. House (Ed.), *Fundamentals of Quantum Mechanics* (Third Edition). (2018) : 271-296.
- Jantawasu, Photocatalytic decomposition of methyl orange Azo Dye using nanostructured TiO₂ photocatalyst, The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, 2008.
- Juliet, S., S. Ramalingom, C. Ravidhas, and A. M. E. Raj, Effect of Calcination Temperature on Titanium Oxide Nanocrystallites in the Anatase Phase Synthesized By Sol-Gel Route, 2007.
- Karaked Tedsree, Nanocatalyst: Next Generation of Catalytic Technology. *Burapha Sci. J*, **18**, (2013) : 274-280.
- Kaur, S., and V. Singh, TiO₂ mediated photocatalytic degradation studies of Reactive Red 198 by UV irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, **141**, (2017) : 230-236.

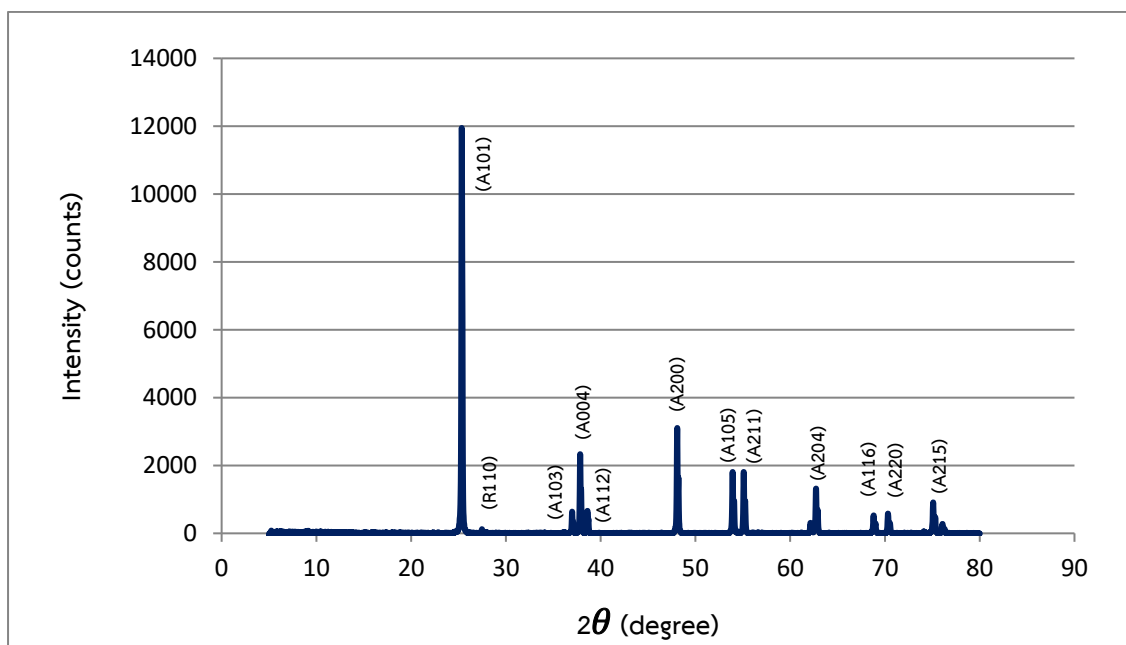
- Merck, โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120. [online]. สืบค้นได้จาก : <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/r0378?lang=en®ion=TH>. [2020, January 2]
- Nasir, S., Hussein, M., Zainal, Z., Yusof, N., Zobir, S., & Alibe, I. Potential Valorization of By-product Materials from Oil Palm: A review of Alternative and Sustainable Carbon Sources for Carbon-based Nanomaterials Synthesis. *Bioresources*, 14, (2018)
- National Center for Biotechnology Information, COMPOUND SUMMARY Reactive Red 120. [online]. สืบค้นได้จาก : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Reactive-Red-120>. [2020, January 3]
- Qin, J. J., M. H. Oo, and K. A. Kekre, Nanofiltration for recovering wastewater from a specific dyeing facility. *Sep. Purif. Technol.*, 56, (2007) : 199-203.
- Saravanan R., Gracia F. J., and Stephen A., Chapter 2 Basic Principles , Mechanism , and Challenges of Photocatalysis. (2017)
- Sun, D., Zhang, X., Wu, Y., and Liu, X, Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. *Hazardous Materials*. (2010)
- Sundrarajan, M., G. Vishnu, and K. Joseph, Ozonation of light-shaded exhausted reactive dye bath for reuse. *Dyes and Pigments*, 75, (2007) : 273-278.
- Zhang, J., and Coauthors, Remediation of diesel polluted water through buoyant sunlight responsive iron and nitrogen co-doped TiO₂ coated on chitosan carbonized fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 306, (2016) : 460-470.

ภาคผนวก

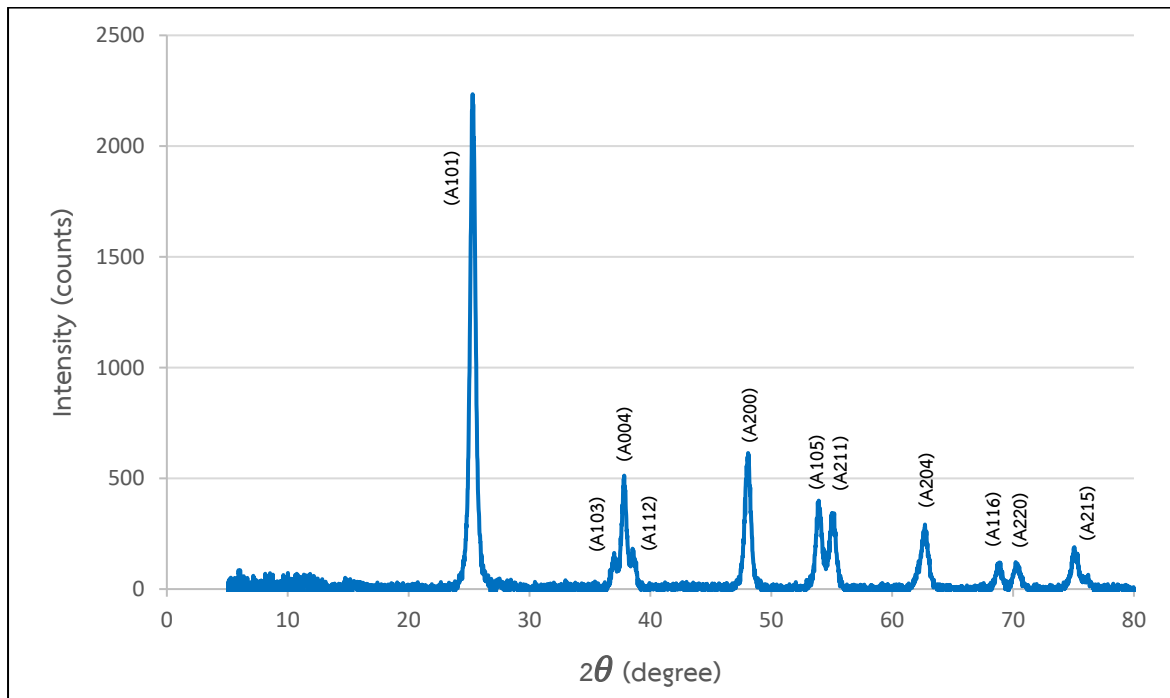
ภาคผนวก ก



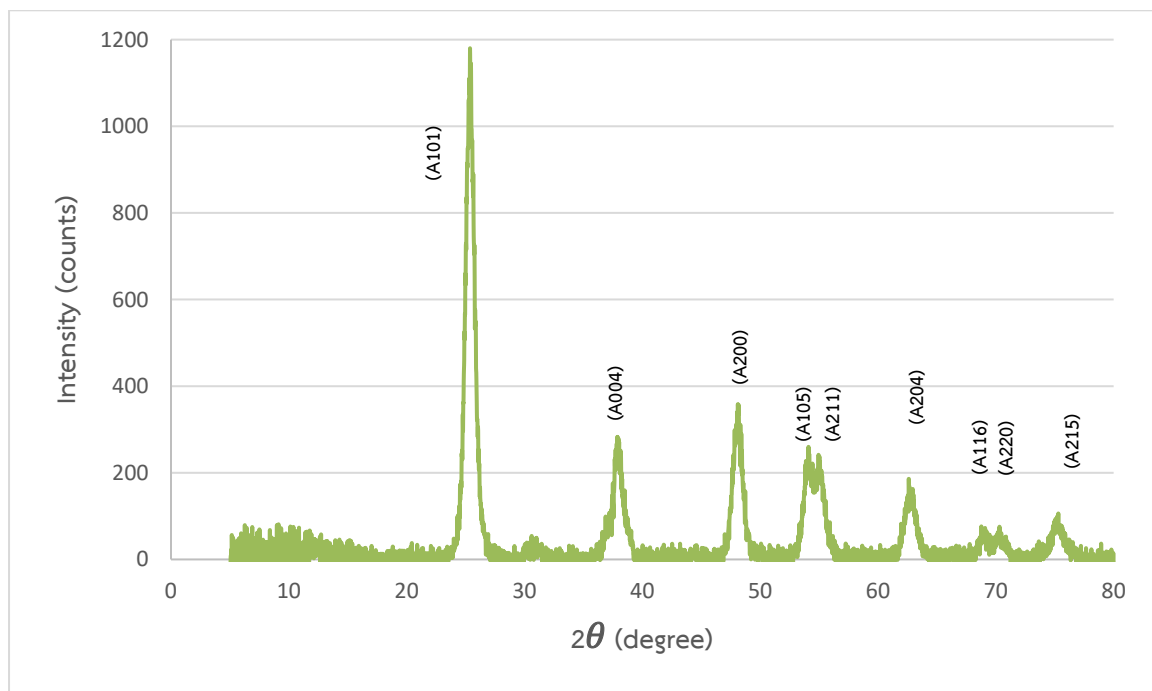
ภาพที่ ก-1 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า



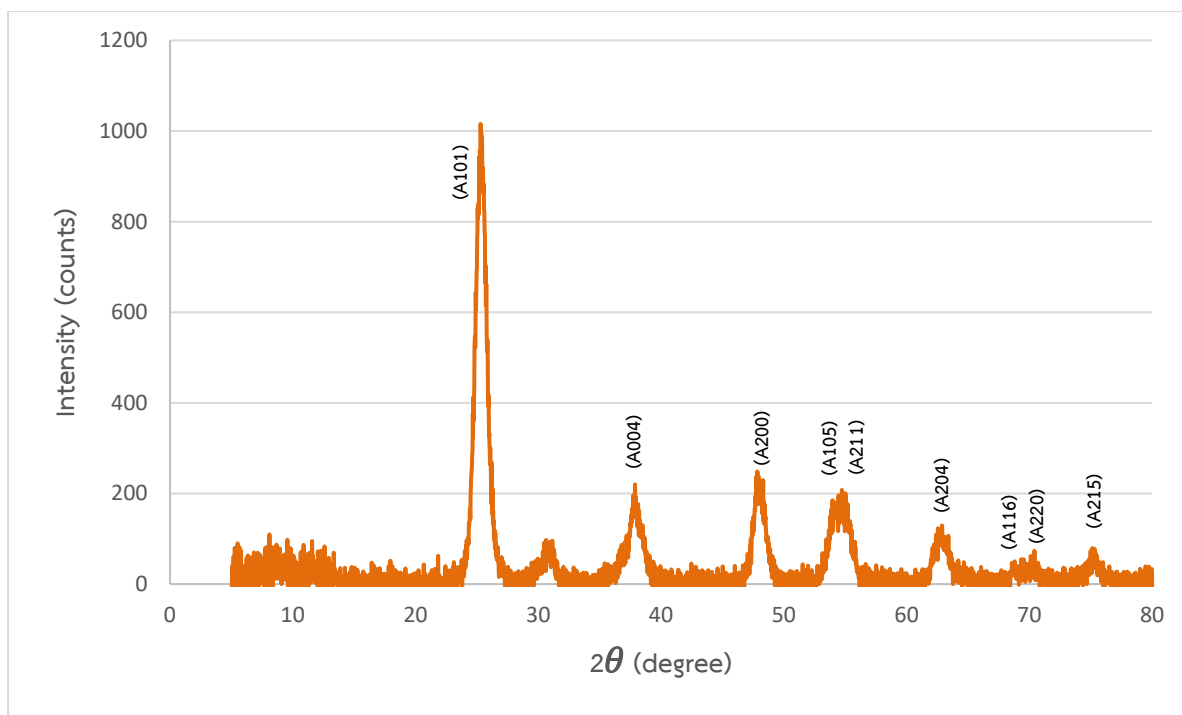
ภาพที่ ก-2 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าหลังเคลือบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



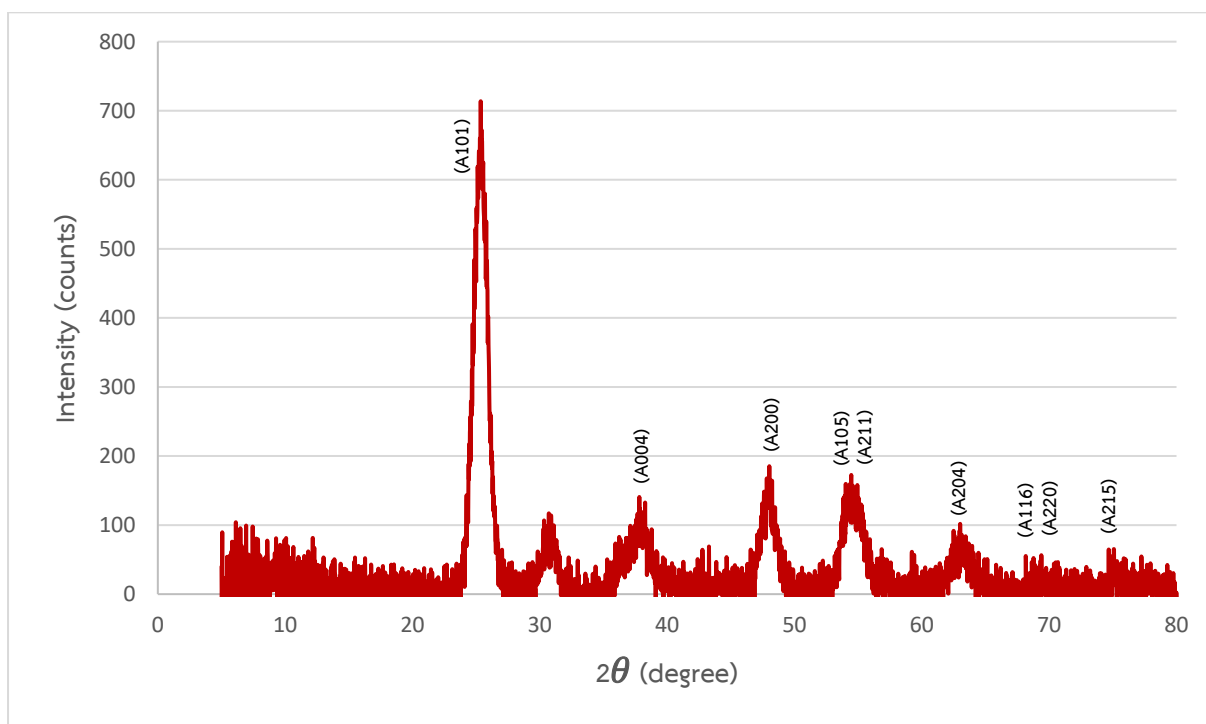
ภาพที่ ก-3 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก-4 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก-5 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ก-6 แสดงผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยเหล็ก ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ข

การคำนวณขนาดของผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การคำนวณขนาดของผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถคำนวณได้จากความกว้างของพีคที่เลี้ยวเบน (Half-height width of the diffraction peak) โดยอาศัยสมการของเดอบาย เซอร์เรอร์ (Debye-Scherrer equation) ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta}$$

เมื่อ D = ขนาดผลึก (Å)

K = แฟกเตอร์ของรูปร่างผลึก ($K = 0.89$)

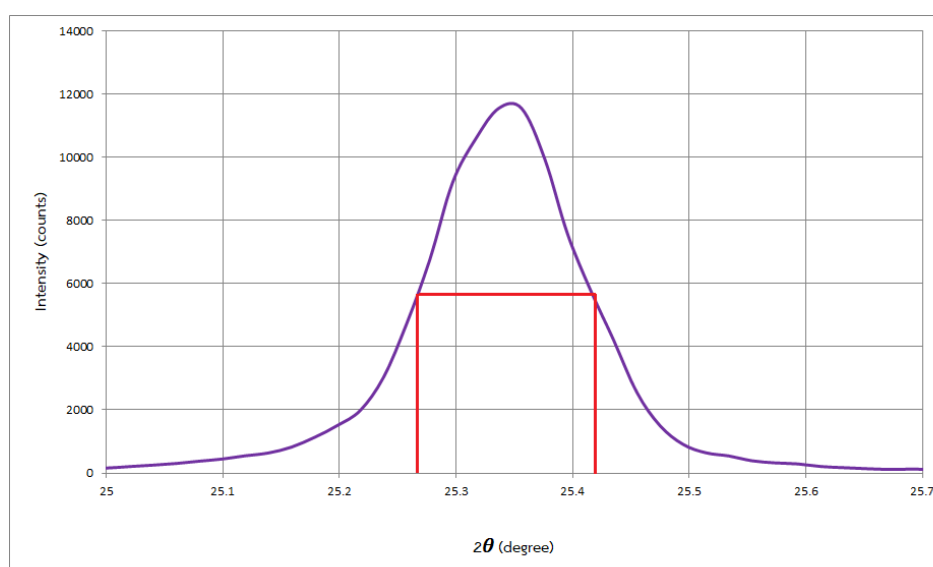
λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (สำหรับ $\text{Cu K}\alpha$ มีค่าเท่ากับ 0.154056 nm)

B = ความกว้างตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีคการเลี้ยวเบนสูงสุด มีหน่วยเรเดียน

θ = มุมของพีคจากรูปผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ มีหน่วยองศา และสำหรับความกว้างตำแหน่งครึ่งหนึ่งของพีคการเลี้ยวเบนสูงสุด (B) คำนวณได้จากสมการ

$$B = \frac{2\theta_{B2} - 2\theta_{B1}}{2}$$

ตัวอย่าง ข-1 การคำนวณขนาดของผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



ภาพที่ ข-1 แสดงการหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด

จาก

$$\begin{aligned} B &= \frac{2\theta_{B2} - 2\theta_{B1}}{2} \\ &= \frac{25.42 - 25.27}{2} \\ &= 0.0013 \text{ radian} \end{aligned}$$

แทนค่า B ลงในสมการของเดอบาย เซอร์เรอร์

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} ; \cos\theta = 0.976 \text{ radian}$$

$$D = \frac{(0.89) \times 0.154056}{0.0013 \times \cos(25.34)}$$

$$D = 105.95 \text{ nm.}$$

การคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกและค่าคงที่แลททิซของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

การคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกสามารถคำนวณได้โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการต่อไปนี้

$$d_{(hkl)} = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$$

เมื่อ $d_{(hkl)}$ = ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (สำหรับ CU K α มีค่าเท่ากับ 1.54056 Å)

θ = มุมตกกระทบและมุมสะท้อน เมื่อวัดจากแนวราบ (หน่วยเรเดียน)

ตัวอย่าง ข-2 การคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรด

การค้ำที่ระนาบ (1 0 1) จากสมการ

$$d_{(hkl)} = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$$

$$d_{(101)} = \frac{1.54056}{2\sin(0.22)}$$

$$d_{(101)} = 3.51 \text{ \AA}$$

และที่ระนาบ (2 0 0) ของเฟสอานาเทส จะได้ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกเท่ากับ 1.89 \AA

ตัวอย่าง ข-2 การคำนวณค่าคงที่แลททิซของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า

จากโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลที่มีความยาวแกน ($a = b \neq c$)

$$\frac{1}{d_{(hkl)}} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

โดยเลือกใช้ระนาบ (1 0 1) และ (2 0 0) ของเฟสอานาเทส

ระนาบ (1 0 1)

$$\frac{1}{3.51} = \frac{1^2 + 0^2}{a^2} + \frac{1^2}{c^2}$$

ระนาบ (2 0 0)

$$\frac{1}{1.89} = \frac{2^2 + 0^2}{a^2} + \frac{0^2}{c^2}$$

ซึ่งจะได้ค่าคงที่แลททิซของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า คือ $a = b = 3.78 \text{ \AA}$
และ $c = 9.44 \text{ \AA}$

ภาคผนวก ค

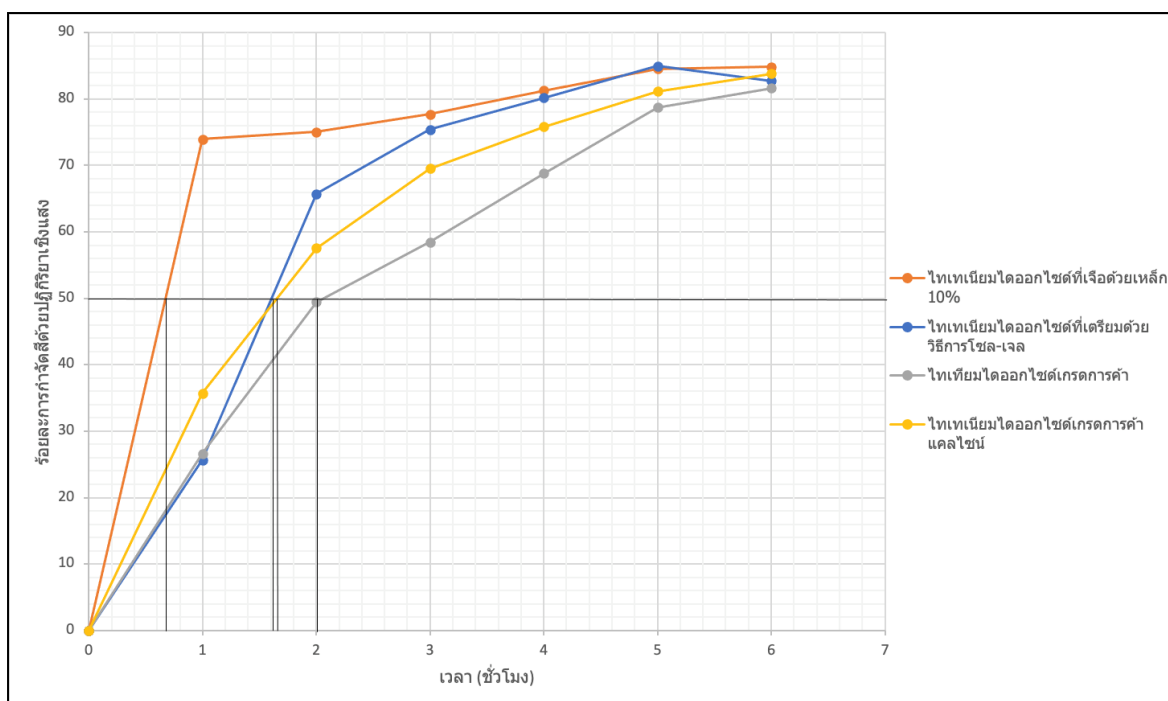
การคำนวณร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

$$\% \text{ Photodegradation} = \left(1 - \frac{C_f}{C_i} \right) \times 100$$

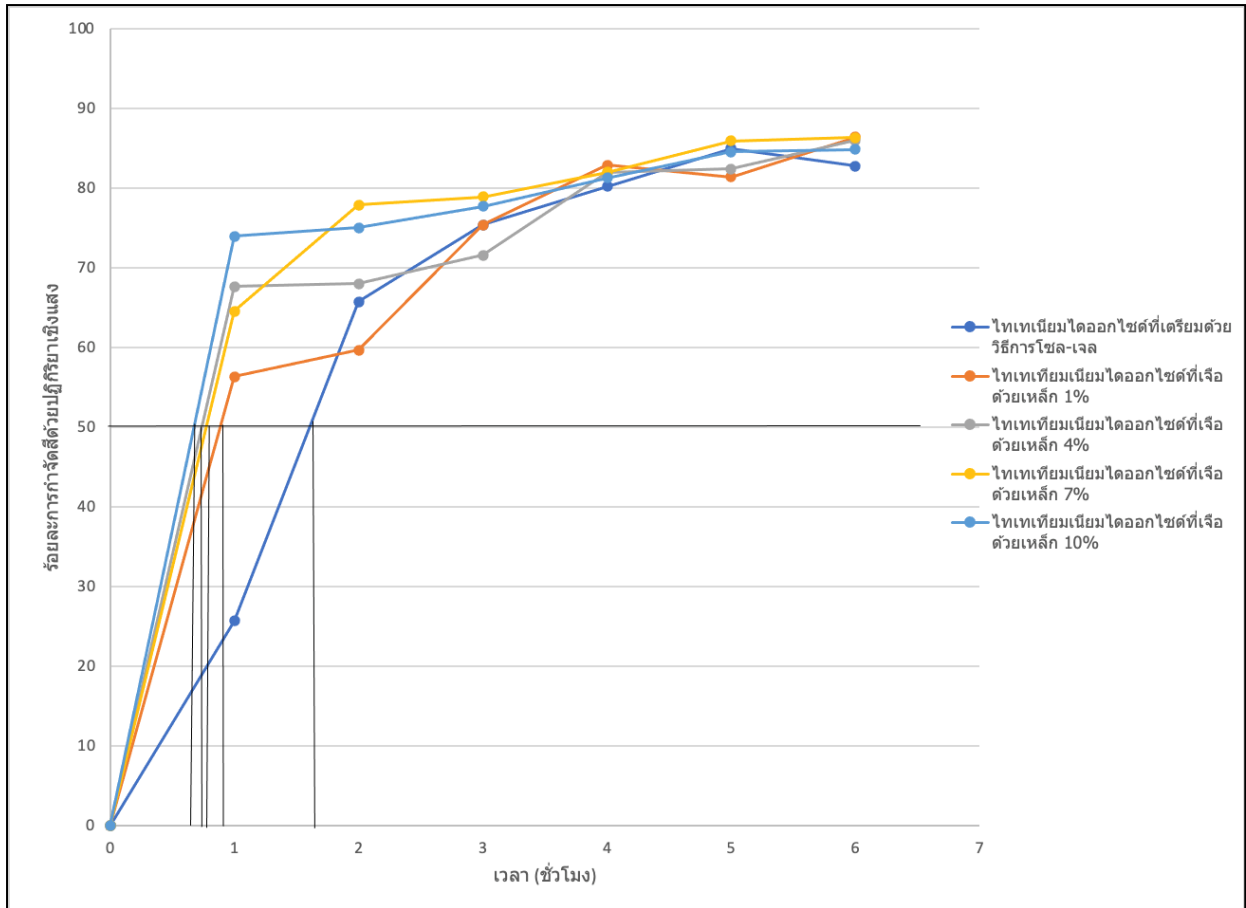
เมื่อ C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

C_f = ความเข้มข้นสุดท้ายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

ตัวอย่างผลการคำนวณร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120



ภาพที่ ค-1 แสดงผลร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า, ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้าหลังคลอไรน์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการโซล-เจล และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ค-2 แสดงผลร้อยละการย่อยสลายของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 1%, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 4%, ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 7% และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 10% โดยน้ำหนัก