

การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบกระตุ้นด้วยแสงโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

TREATMENT OF REACTIVE DYES IN AQUEOUS SOLUTION BY TiO_2 -PHOTOCATALYTIC DEGRADATION PROCESS

กมลวรรณ ลิ้มขจรเกียรติ^{1*} คณิตา ตังคณานุรักษ์²

Kamonwan Limkhajonkiat^{1}, Kanita Tangkananurak²*

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University.

²คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²Faculty of Environment, Kasetsart University.

*Corresponding author, e-mail: Km_Kamonwan@hotmail.com

Received: 4 September 2019; **Revised:** 30 October 2019; **Accepted:** 14 November 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ Red SBN, Blue G และ Yellow RN ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ด้วยวิธีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ด้วยวิธีโซล-เจล และเคลือบลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด $6.0 \times 2.0 \times 0.1$ เซนติเมตร สภาวะที่เหมาะสมสำหรับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร คือ ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 6 มิลลิโมลาร์ และกวนที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที โดยฉายแสงยูวีด้วยหลอดยูวีแสงสีด้าร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดของสีรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow เท่ากับ 54.40, 64.07 และ 41.66 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาเป็น 10 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดเท่ากับร้อยละ 100 นอกจากนี้เมื่อบำบัดสารละลายสีรีแอคทีฟแบบผสมทั้ง 3 ชนิด ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมค่าสีของสารละลายที่ผ่านการบำบัดเท่ากับ 212 ADMI ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (300 ADMI) ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายแบบกระตุ้นด้วยแสงโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดนี้

คำสำคัญ: กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สีรีแอคทีฟ

Abstract

This research determine the efficiency of 3 reactive dyes (Red SBN, Blue G and Yellow RN) treatment by using photocatalytic degradation process. TiO_2 thin film was prepared by the sol-gel method and coated on the surface of stainless steel sheet size $6.0 \times 2.0 \times 0.1$ cm. The optimum condition for the 10

mg/L of each reactive dye solution were pH3, 6mM H_2O_2 and agitation 150 rpm at 180 min with UV black light lamp irradiation. The removal efficiency of Red SBN, Blue G and Yellow RN were 54.40%, 64.07% and 41.66% respectively. In addition, when reaction time was increased until 10 hr, 100% of removal efficiency of 3 reactive dyes were achieved. Furthermore, the mixed 3 reactive dyes solution was treated under the optimum condition, the color value of the treated solution was 212 ADMI that was lower than the industrial wastewater standard value (300 ADMI) Therefore, the TiO_2 photocatalytic degradation process coupled with H_2O_2 had enough potential to treatment these 3 reactive dyes.

Keywords: Photocatalytic degradation, TiO_2 , H_2O_2 , Reactive dye

บทนำ

การย้อมผ้าและทอผ้าพื้นเมือง เป็นหนึ่งในภูมิปัญญาไทยที่ประกอบอาชีพสืบทอดกันมาแต่อดีตถึงปัจจุบัน และมีการจัดตั้งวิสาหกิจชุมชนขึ้นเพื่อนำเอกลักษณ์การย้อมผ้าพื้นเมืองเป็นการสร้างรายได้แก่คนในชุมชน ในอดีตนั้นมีการใช้สีย้อมธรรมชาติจากพืช สัตว์ และแร่ธาตุต่าง ๆ [1] ในการผลิตผ้าพื้นเมือง ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามามีบทบาทอย่างมาก โดยเปลี่ยนจากการใช้สีย้อมตามธรรมชาติ มาใช้สีย้อมที่ทำขึ้นจากสารเคมี และนิยมใช้สีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟในการให้สีที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในสภาวะที่เหมาะสม ส่งผลให้เป็นสีที่ย้อมติดง่าย และยังสามารถย้อมได้หลายวิธี เช่น แบบการแช่ในอ่างย้อม แบบกึ่งต่อเนื่องหรือแบบต่อเนื่อง ผ้าย้อมมีความคงทนต่อการซักสูง สีรีแอคทีฟเป็นสีที่มีความสด เจดสีที่หลากหลายและราคาไม่แพง [2] จึงเหมาะสำหรับการย้อมผ้าในชุมชน กระบวนการผลิตเป็นขั้นตอนที่มีการใช้น้ำในกระบวนการจำนวนมากส่งผลให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีย้อม [3] ซึ่งชาวบ้านในชุมชนมักขาดความรู้ความเข้าใจและเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้า จึงทำการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม แม้ว่าสีรีแอคทีฟจะมีความเป็นพิษต่ำแต่สารประกอบในผลิตภัณฑ์อาจส่งผลให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้ [4] นอกจากนี้สีย้อมไม่ผ่านการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ [5] จะก่อให้เกิดปัญหาการขัดขวางการส่องผ่านของแสง พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ [3] ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ จึงต้องมีการบำบัดให้ได้มาตรฐานเพื่อป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำ ปัจจุบันมีวิธีการบำบัดสีย้อม 2 วิธีหลัก ๆ คือ กระบวนการทางเคมีฟิสิกัล (Physicochemical Process) และกระบวนการทางชีวภาพ (Biological Process) ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการมีการดำเนินการที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูง [6] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการบำบัดสีย้อมผ้าในสารละลาย ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ระยะเวลาสั้น มีการดำเนินระบบที่ไม่ซับซ้อน ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ และมีต้นทุนในการดำเนินการไม่สูงมาก [7] เมื่อเทียบกับกระบวนการ ดังที่กล่าวมา

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลาย ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เคลือบบนใบพัดเหล็กกล้าไร้สนิมทำงานร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยใช้กับแหล่งกำเนิดแสง UV- Black Light ซึ่งมีสมบัติในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยสูง [8] เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารละลายสีย้อม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

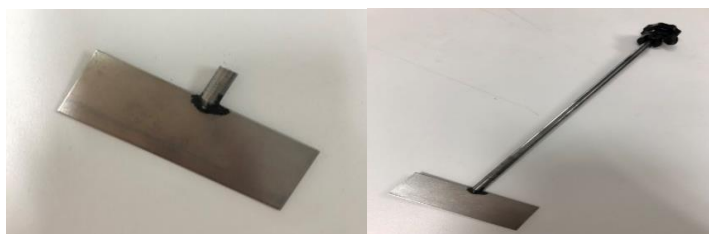
1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
2. เพื่อประยุกต์การบำบัดสารละลายสีย้อมผสมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

1. ไบพัด

ไบพัดที่ใช้ในการศึกษาเป็นไบพัดเหล็กกล้าไร้สนิม มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (กว้าง×ยาว×หนา) เท่ากับ $6.0 \times 2.0 \times 0.1$ เซนติเมตร และแกนยึดติดกับเครื่องจาร์ทดสอบมีความยาว 25 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1 โดยใช้การกวัดความเร็ว 150 รอบต่อนาที ในการศึกษาดำเนินการโฟโตคะตะไลติก



ภาพที่ 1 ไบพัดสแตนเลส

2. หลอดไฟยูวี Black Light

3. เครื่องจาร์ทดสอบ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมไบพัดที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

เตรียมไบพัดด้วยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ตามวิธีโซล-เจลของศิริวิมล [9] ดัดแปลงจากวิธีของกฤษณะ [10] โดยผสมสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (TTIP; $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) ต่อตัวทำละลายเอทิลออกซิเจน ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$) ที่อัตราส่วน 1:15 ผสม TiO_2 ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2-3 ทำการเคลือบแบบจุ่มกะ เป็นจำนวน 5 ครั้ง และอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ครั้งละ 1 ชั่วโมง

2. การจัดเตรียมอุปกรณ์

การศึกษามีการจัดเตรียมอุปกรณ์โดยใช้ไบพัดที่ได้จากข้อที่ 1 จำนวน 6 ใบ ยึดติดกับเกลียวแกนหมุนของเครื่องจาร์ทดสอบ ติดตั้งหลอดไฟยูวี Black Light จำนวน 3 หลอด โดยจัดวางให้อยู่แนวขนานกับบีกเกอร์ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ติดตั้งอุปกรณ์กับเครื่องจาร์เทสต์

3. การเตรียมสารละลาย

3.1 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow RN แต่ละชนิดเข้มข้น 5, 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเจือจางจากสารละลายสต็อก (Stock Solution) เข้มข้น 1,000 ppm โดยปิเปตสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด จากสารละลายสต็อกที่ปริมาตร 5, 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.2 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสม

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนปริมาตรเท่ากัน

4. ศึกษาหาความยาวคลื่นที่สีย้อมแต่ละชนิดดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max}) โดยใช้การหาสเปกตรัมตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-700 นาโนเมตร

5. การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

5.1 การศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เหมาะสม

ศึกษาโดยนำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เท่ากับ 3, 7 และ 10 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้แสงจากหลอดไฟยูวี กวนด้วยใบพัดสแตนเลสที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที โดยนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ λ_{max} ของสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow RN ที่ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 516, 590 และ 397 ตามลำดับ ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (PHIPPS&BIRD รุ่น PB900 ประเทศสหรัฐอเมริกา) และคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ ดังสมการ (1) [11]

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด} = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A_0 เป็นค่าดูดกลืนแสงสารละลายสีย้อมเริ่มต้น, A เป็นค่าดูดกลืนแสงสารละลายสีย้อมหลังกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

5.2 การศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดมาศึกษาหาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยนำสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้น

ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศึกษา คือ 2, 4, 6 และ 8 มิลลิโมลาร์ โดยเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 0.029, 0.059, 0.089 และ 0.119 มิลลิลิตรตามลำดับ และสารละลายสีย้อมเข้มข้น 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศึกษา คือ 8, 10, 12 และ 14 มิลลิโมลาร์ โดยเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 0.119, 0.149, 0.179 และ 0.209 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยใช้สภาวะ pH ที่สามารถบำบัดสีย้อมได้ดีที่สุดจากการศึกษาข้อที่ 5.1 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อที่ 5.1

5.3 การศึกษาระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการบำบัดสารละลายสีย้อมทั้ง 3 ชนิด

นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด มาศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ โดยใช้สภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุดของค่าความเป็นกรดต่าง จากข้อที่ 5.1 และอัตราส่วนที่เหมาะสมของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ จากการพิจารณาข้อที่ 5.2 ใช้แสงจากหลอดไฟยูวี Black Light กวนด้วยใบพัดเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบไทเทเนียม ไดออกไซด์ ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นศึกษาระยะเวลาที่สามารถบำบัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟจนหมด เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุก 60 นาที โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ λ_{max} ของแต่ละสีย้อมด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

6. การศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้งานจริงในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

6.1 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด

นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด มาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด ปรับปริมาตรสีย้อมรีแอคทีฟ 50 มิลลิลิตร ทำการศึกษาเช่นเดียวกับข้อที่ 5.2 โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้อ 5.1 ถึงข้อ 5.2 และวิเคราะห์ค่าสีในหน่วยแพลตทินัม-โคบอลต์ โดยวัดค่าดูดแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

6.2 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสม

นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสม มาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยทำการศึกษาเช่นเดียวกับข้อที่ 6.1 จากนั้นนำไปวัดค่าสีในหน่วย ADMI (American Dye Manufacturers Institute) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ผลการวิจัย

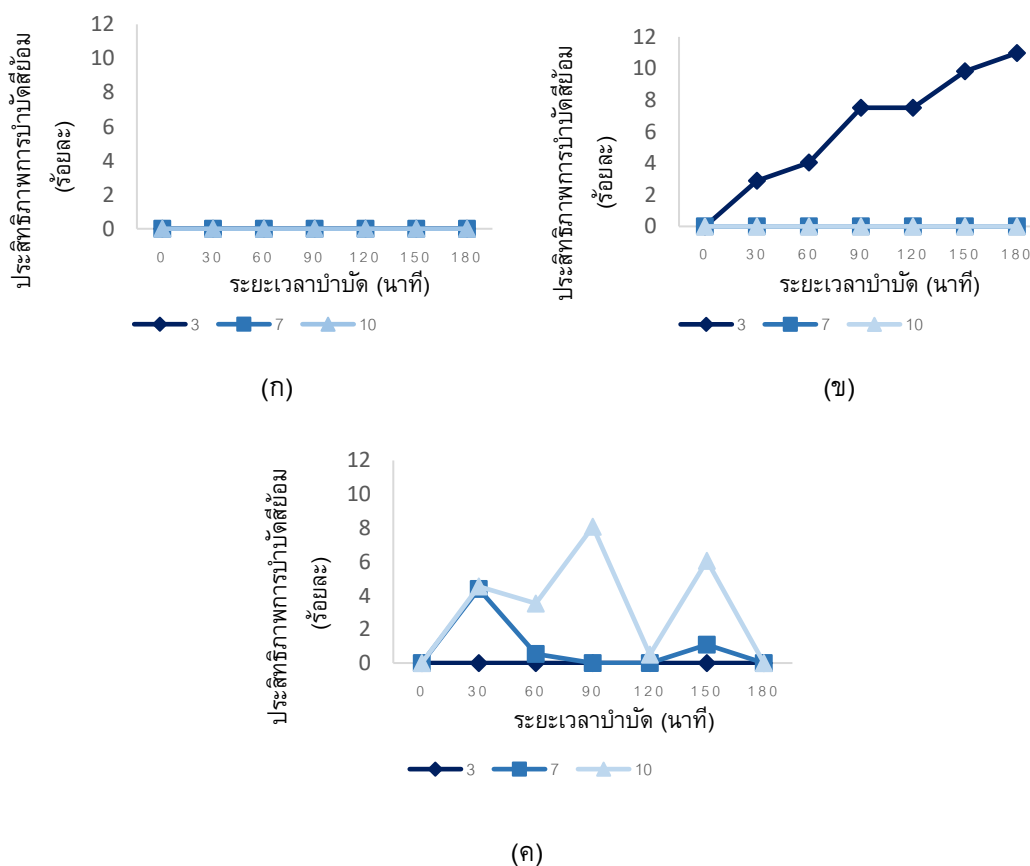
1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ

ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ และระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาดำเนินการโฟโตคะตะไลติก

1.1 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เหมาะสม

จากการทดลองการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ในสารละลายสีย้อมที่ปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3, 7 และ 10 ร่วมกับการเพิ่มระยะเวลาบำบัด จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกับระยะเวลาในการบำบัดที่สภาวะค่าความเป็นกรดต่างต่าง ๆ สีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN (ก) ค่าความเป็นกรดต่างไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดร่วมด้วย สีย้อมรีแอคทีฟ Blue G (ข) พบว่าที่สภาวะค่าความเป็นกรดต่าง 7 และ 10 ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดร่วมด้วย แต่ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 3 พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดได้ร้อยละ 10.98 และสีย้อมรีแอคทีฟ Yellow RN (ค) พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง 7 และ 10 มีประสิทธิภาพการ

บำบัดต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และที่สภาวะค่าความเป็นกรดต่าง 3 ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด แม้ว่า会增加ระยะเวลาในการบำบัดร่วมด้วย



ภาพที่ 3 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN (ก), Blue G (ข) และ Yellow RN (ค) ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 3, 7 และ 10

เนื่องจากผลการศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างต่ำ ผู้วิจัยจึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด โดยเลือกใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณสมบัติที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่ได้จากสีย้อมผ้า โดยเมื่อโดนแสงจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) [11] ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้แสง UV ทำให้มีแหล่งที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) [12] 2 แหล่ง ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดจากกระบวนการของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด เป็นตัวออกซิไดซ์สี และสลายพันธะโมเลกุลของสี ทำให้จากเดิมที่เป็นสีที่เคยมองเห็นด้วยตาเปล่าเปลี่ยนเป็นไม่มีสี [11]

1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมกับการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow RN พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ดีที่สุด คือ 6 มิลลิโมลาร์ ซึ่งมีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟเท่ากับร้อยละ 54.40, 64.07 และ 41.66 ตามลำดับ การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ที่ 8 มิลลิโมลาร์ มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟ Red SBN และ Blue G ได้ดี นอกจากนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 14 มิลลิโมลาร์ สามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ Yellow RN แต่ไม่สามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ Red SBN และ Blue G ได้ ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 8 มิลลิโมลาร์ จึงมีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟได้ดีที่สุด ร้อยละ 56.11, 53.98 และ 7.8 ตามลำดับ และการบำบัดสีย้อมผ้าที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 10 มิลลิโมลาร์ มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ Red SBN และ Yellow RN ได้ดี และที่ 8 มิลลิโมลาร์ สามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ Blue G ได้ดีแต่ไม่สามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอื่นได้ ดังนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 10 มิลลิโมลาร์ จึงมีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟได้ดีที่สุดมีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟเท่ากับร้อยละ 31.15, 34.21 และ 3.32 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิด

สีรีแอกทีฟ	ความเข้มข้น สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)					
		2	4	6	8	10	12
Red SBN	10	25.24	38.65	54.40	33.11		
Blue G	10	60.24	55.98	64.07	50.00		
Yellow	10	27.48	25.00	41.66	32.91		
Red SBN	20				56.11	37.60	36.80
Blue G	20				53.98	36.41	28.04
Yellow	20				4.24	6.62	7.61
Red SBN	30				21.83	30.15	25.70
Blue G	30				34.21	26.92	22.36
Yellow	30				2.39	3.32	1.19

1.3 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟที่เหมาะสม

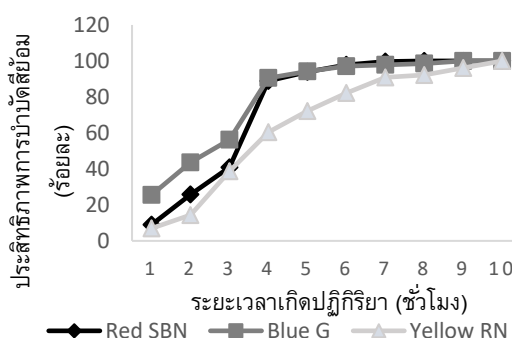
จากการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในข้อที่ 1.2 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุดร้อยละ 54.4, 64.07 และ 41.66 ตามลำดับ แม้ว่าสีย้อมรีแอกทีฟ Red SBN ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 มิลลิโมลาร์ จะสามารถบำบัดได้มากกว่าที่ร้อยละ 56.11 แต่ในขณะเดียวกันที่สีย้อมรีแอกทีฟ Blue G และ Yellow RN และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิโมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟได้น้อย แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพร้อยละการบำบัดของสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิดที่ต่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6, 8 และ 10 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

สีย้อมรีแอคทีฟ	ความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) : ความเข้มข้น H_2O_2 (มิลลิโมลาร์)		
	10:6	20:8	30:10
Red SBN	54.40	56.11	31.15
Blue G	64.07	53.98	34.21
Yellow RN	41.66	7.80	3.32

1.4 ผลการศึกษาระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษาระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow RN ที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 มิลลิโมลาร์ ที่สภาวะค่าความเป็นกรดเท่ากับ 3 พบว่าระยะเวลาที่มีร้อยละประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด คือ ที่เวลา 8, 9 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ ดังนั้นระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาที่ 10 ชั่วโมง จึงเป็นระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาที่มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้ร้อยละ 100 แสดงในภาพที่ 4

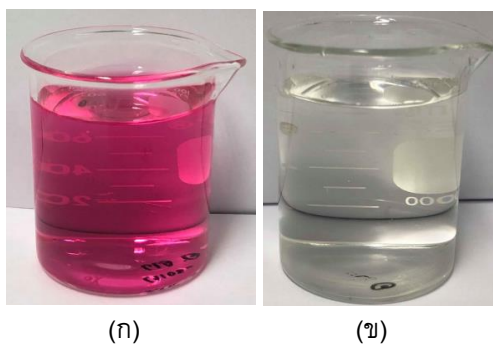


ภาพที่ 4 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

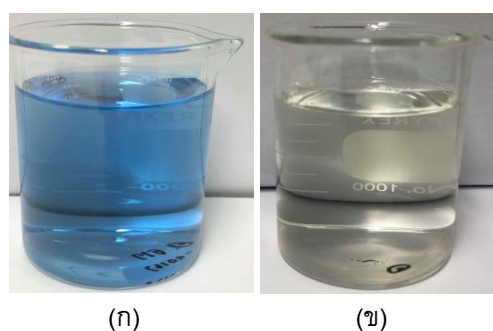
2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้งานจริงในการบำบัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.1 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด

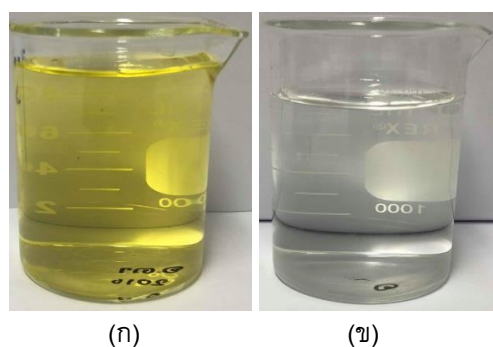
จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าค่าสีในหน่วยแพลตทินัม-โคบอลต์เท่ากับ 8.29, 11.39 และ 5.30 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดไว้ที่ 15 หน่วยแพลตทินัม-โคบอลต์ ดังภาพที่ 5-7



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบสีของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN ก่อนการบำบัด (ก) กับหลังการบำบัด (ข)



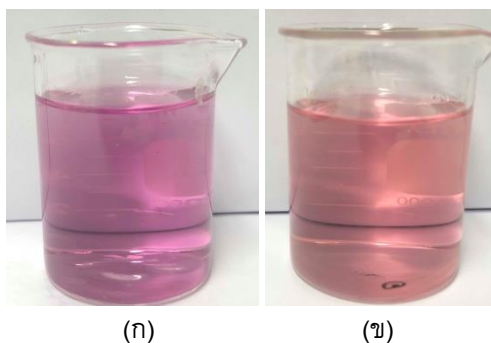
ภาพที่ 6 เปรียบเทียบสีของของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ Blue G ก่อนการบำบัด (ก) กับหลังการบำบัด (ข)



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบสีของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ Yellow RN ก่อนการบำบัด (ก) กับหลังการบำบัด (ข)

2.2 สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสม

จากการศึกษาค่ามาตรฐานสีของน้ำทิ้งที่ระบายสู่แหล่งน้ำ (ADMI) ของกระทรวงอุตสาหกรรม ตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดที่ไม่เกิน 300 [13] พบว่าสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสม ก่อนกระบวนการบำบัด มีค่า ADMI เท่ากับ 332 หลังการผ่านกระบวนการบำบัดพบว่ามีค่า ADMI เท่ากับ 212 นอกจากนี้ค่าสีในหน่วย แพลตทินัม-โคบอลต์ของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสมเท่ากับ 19.46 ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบสีของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบบผสมก่อนการบำบัด (ก) กับหลังการบำบัด (ข)

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาการบำบัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ Red SBN, Blue G และ Yellow RN โดยใบพัดเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำงานร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ คือ ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟ Blue G ร้อยละ 10.98 เมื่อเทียบกับสภาวะค่าความเป็นกรดต่าง 7 และ 10 มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งคล้ายกับการรายงานก่อนหน้านี้โดย Soutsas K. และคณะ [6] ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากประจุไฟฟ้าของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นประจุบวกที่ค่าความเป็นกรดต่างต่ำ และเป็นประจุลบที่ค่าความเป็นกรดต่างสูง นอกจากนี้คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดถูกศึกษาโดย Sohrabi M R. และคณะ [8] เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเหนี่ยวนำให้มีประจุบวกหรือลบได้ ซึ่งเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรด พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุบวก ขณะที่สีย้อมรีแอคทีฟเป็นประจุลบ จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3 มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ดี ค่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ (มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์) ที่มีร้อยละประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟคือ 10:6 มีค่าร้อยละการบำบัดเท่ากับ 54.4, 64.07 และ 41.66 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอคทีฟที่เหมาะสมสอดคล้องกับการศึกษาของ Emad S Elmolla [12] พบว่าร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มไฮดรอกซิลเรดิคัล ทำให้มีความสามารถในการออกซิเดชันที่สูง และเพิ่มการสลายพันธะโมเลกุลของสี แต่ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึงค่าค่าหนึ่ง จากนั้นร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงถูกศึกษาโดย Adly M S และคณะ [14] เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล ก่อให้เกิดเป็นน้ำและออกซิเจนซึ่งทำให้สูญเสียปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งส่งผลให้ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง นอกจากนี้ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดมีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างพันธะเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด และจากการศึกษาระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมพบว่า ที่ 10 ชั่วโมง บันทวนที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที มีแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไฟยูวี ส่งผลให้สามารถบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้ร้อยละ 100 และนอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ค่าสีในหน่วยแพลดทินัม-โคบอลต์ของสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด หลังการบำบัดเท่ากับ 8.29, 11.39 และ 5.30 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

น้ำบริโภค และค่ามาตรฐานสีของน้ำทิ้ง (ADMI) ของสีย้อมสีแอคทีฟแบบผสมพบว่า หลังการบำบัดเท่ากับ 212 และผลการวิเคราะห์ค่าสีในหน่วยแพลตทินัม-โคบอลต์ของสีย้อมสีแอคทีฟแบบผสมเท่ากับ 19.46 มีร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายสีย้อมสีแอคทีฟได้ดีทั้ง 3 ชนิด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในการบำบัดสีย้อมผ้าพื้นเมืองในชุมชน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Usa Chaijumnong. (2017, January- April). Treatment of Reactive Dyes in Wastewater from Native Textile House-Hold Factory by Using Constructed Filter Tank with Lignite Fly Ash Adsorbent. *Thai Environmental Engineering Journal*, 31(1), 45-57. Retrieved from <https://www.tci-thaijo.org/index.php/teej/article/view/191731/133841>
- [2] Kaoutar El Hassani, Hajar Jabkhiro. (2019, August). Effect of drying step on layered double hydroxides properties: Application in reactive dye intercalation. *Applied Clay Science*, 182, 105246. Retrieved from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S0169131719303047>
- [3] Chandrakant R. Holkar, Ananda J. Jadhav, Dipak V. Pinjari. (2016, August). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351-366. Retrieved from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S03014716305266>
- [4] Siriphan Pruektara., & Paradee Chuaybamroong. (2018, April). Treatment of High Concentration Reactive Blue Dye with Fenton and Fenton-like Reactions Using Iron Filings. *Thai Science and Technology Journal*, 27(4), 661-674. Retrieved from <https://www.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/189989/133069>
- [5] Jaruwan Phanchomphu. (2015). *Treatment of Textile Factory Wastewater by Using Lignite Fly Ash as Coagulant*. Master of Science (Environmental Science). Bangkok: Graduate school of Kasetsart University.
- [6] Soutsas K, Karayanis V. (2009, October). Decolorization and degradation of reactive azo dyes via heterogeneous photocatalytic processes. *Desalination*, 250(1), 345-350. Retrieved October 20, 2012, from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S0011916409010868>
- [7] Pengwei Huo a, Yongsheng Yan. (2010, July). H₂O₂ modified surface of TiO₂/fly-ash cenospheres and enhanced photocatalytic activity on methylene blue. *Desalination*, 263(1-3), 258-263. Retrieved October 20, 2012, from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S0011916410004765>
- [8] Sohrabi M. R., Ghavami M. (2009, November). Comparison of Direct Yellow 12 dye degradation efficiency using UV/semiconductor and UV/H₂O₂/semiconductor systems. *Desalination*, 252(1-3), 157-162. Retrieved October 20, 2012, from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S0011916409012181>
- [9] Siwimon Cheerprasert. (2015). *Photocatalytic Reduction of Nitrate over Stainless Steel Coating with Ag-TiO₂*. Master of Engineering (Environmental Engineering). Bangkok: Graduate school of Kasetsart University.

- [10] Krisana Kobwittaya. (2014). *Photocatalytic Reduction of Nitrate over TiO_2 and Metal-Modified TiO_2* . Master of Engineering (Environmental Engineering). Bangkok: Graduate school of Kasetsart University.
- [11] Hathaisamit K., Sutha W., Kamruang P., Pudwat S., Teekasap S. (2012, November). Decolorization of Cationic Yellow X-Gl 200% from Textile Dyes by TiO_2 Films-Coated Rotor. *Procedia Engineering*, 32, 800-806. Retrieved October 20, 2012, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812014397>
- [12] Emad S Elmolla. (2009, November). Photocatalytic degradation of amoxicillin, ampicillin and cloxacillin antibiotics in aqueous solution using UV/ TiO_2 and UV/ H_2O_2 / TiO_2 photocatalysis. *Desalination*, 252(1-3), 46-52. Retrieved October 21, 2012, from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S001191640902788>
- [13] Department of industrial works. (2017). Industrial wastewater standard value. Bangkok. Retrieved from <http://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF>
- [14] Adly M. S., El-Dafrawy Sh M. (2019, September). Application of nanostructured graphene oxide/titanium dioxide composites for photocatalytic degradation of rhodamine B and acid green 25 dyes. *Journal of Materials Research and Technology*. Retrieved from <https://portal.lib.ku.ac.th:10373/science/article/pii/S2238785419303977>