

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบลอยตัวไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงอยู่กับ
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากขานอ้อย
Floating Photocatalyst based on Titanium Dioxide Immobilized on
Carboxymethyl Cellulose Hydrogel from Bagasse

ปรัชญา วาทะสิทธิ์ วงเดือน ไม้สนธิ์ และ วียารัตน์ กุมุทนาค*

Prachya Watasit Wongduan Maison and Wiyarat Kumutanat*

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย

Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University,
Chachoengsao, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 22 พฤศจิกายน 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 12 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 ธันวาคม 2567
Received: 22 November 2023, Revised: 12 December 2024, Accepted: 13 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวไทเทเนียมไดออกไซด์/คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (Titanium dioxide Carboxymethyl Cellulose Hydrogel: TiO_2/CMC -hydrogel) เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ โดยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จากขานอ้อยถูกผสมกับนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นเชื่อมขวางพอลิเมอร์ให้กลายเป็นไฮโดรเจลด้วยกรดซัลฟอนิก แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคแอมพเทนนูเอเทคไทเทรลรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR) วิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิวไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) และวิเคราะห์ค่าช่องว่างแถบพลังงานด้วยเทคนิคดิฟฟิวส์เรฟเลกแทนซ์ ยูวี-วิสิเบิล (Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy: UV-Vis DRS) การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) กระจายตัวได้ดีบนวัสดุรองรับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) และมีการเลื่อนตำแหน่งของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate) ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose: CMC) และอนุภาค TiO_2 นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุรองรับ CMC-hydrogel ช่วยลดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของ TiO_2 ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel สามารถสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว 2% TiO_2/CMC -hydrogel มีประสิทธิภาพการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สูงถึง 78.11% หลังจากทดสอบเป็นเวลา 70 ชั่วโมง

คำสำคัญ : ขานอ้อย คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮโดรเจล ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว ไทเทเนียมไดออกไซด์

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: wiyarat.kum@rru.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.261319>

Abstract

This research focused on the preparation of Titanium dioxide Carboxymethyl Cellulose Hydrogel (TiO₂/CMC-hydrogel) floating catalyst for removing methyl orange dye. The obtained Carboxymethyl Cellulose (CMC) from bagasse was mixed with nano Titanium dioxide and then crosslinked the polymer into hydrogel using succinic acid. The synthesized hydrogel films were characterized by Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) technique. Surface morphology of hydrogels was analyzed by Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM). Band gap energy was evaluated by Ultraviolet–Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy (UV–Vis DRS) technique. The study of morphology showed that TiO₂ particles can disperse in CMC-hydrogel. Infrared absorption of carboxylate groups was shifted when adding TiO₂ content. This can be suggested that there are interactions between carboxylate of CMC and TiO₂ particles. In addition, CMC-hydrogel can decrease the band gap energy of TiO₂, leading to improving methyl orange removal under sunlight. 2 % TiO₂/CMC-hydrogel floating catalyst provided an efficiency to remove methyl orange dye up to 78.11% after testing for 70 hours.

Keywords: Bagasse, Carboxymethyl cellulose, Hydrogel, Floating catalyst, Titanium dioxide

1. บทนำ

ปัญหาน้ำเสียโดยส่วนใหญ่มีสาเหตุหลัก ๆ มาจากน้ำทิ้งจากภาคการเกษตร โรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งน้ำทิ้งจากบ้านเรือนและชุมชน เป็นต้น น้ำทิ้งดังกล่าวมีการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ หากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดอาจก่อให้เกิดมลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำเป็นอย่างมาก ดังนั้นการแก้ไขปัญหาเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น [1]-[2] ปัจจุบันกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี เช่น กระบวนการออสโมซิสผันกลับ [3] กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมี [4] กระบวนการแยกผ่านเยื่อกรอง [5] การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [6] และกระบวนการทางชีวภาพจะมีการนำเชื้อจุลินทรีย์เข้ามาใช้ในการบำบัด [7] แต่เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูงและมีอัตราการสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียค่อนข้างช้า [8] เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ปฏิกิริยาการเร่งเชิงแสงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO₂) ซึ่งเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต มีความเสถียรต่อแสงและสารเคมี อีกทั้งราคาไม่สูงมากนัก [9] แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำยังมีข้อจำกัด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จำเป็นต้องใช้รังสียูวีในการกระตุ้นเพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสารอินทรีย์ ซึ่งแสงอาทิตย์ในธรรมชาติมีปริมาณรังสียูวีในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อกำจัดสีย้อมโดยใช้แสงจากธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยจำนวนมาก

จึงมุ่งเน้นพัฒนาปรับปรุงให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความว่องไวต่อรังสีวิเบิลมากขึ้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้สารประกอบอินทรีย์ เช่น โทลูอินไดไอโซไซยานต (Toluene Diisocyanate: $C_9H_6N_2O_2$) [10] และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose: $C_8H_{15}NaO$) [11] ในการปรับปรุงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำขานอ้อยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากทางภาคการเกษตรมาดัดแปลงเป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (Carboxymethyl Cellulose hydrogel) เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับพลังงานในช่วงรังสีวิเบิลได้ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้หลักการนี้ในการกำจัดสีย้อมในแหล่งน้ำ โดยวัสดุรองรับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลมีความสามารถในการบวมตัว โดยที่สามารถรักษาสภาพของวัสดุไว้ได้เมื่ออยู่เหนือ น้ำ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการลอยตัว [12] ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ของไฮโดรเจลจะช่วยพยุงให้อนุภาค TiO_2 สามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ จากการบวมตัวและลอยตัวของไฮโดรเจลสามารถช่วยให้ TiO_2 ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำในการสร้างสารอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แผ่นไฮโดรเจลยังช่วยดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่งผลให้สามารถกำจัดสีย้อมอินทรีย์ได้เร็วขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งคือวัสดุรองรับทำมาจากสารพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ โดยในปัจจุบันมีการศึกษาโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) แบบลอยตัวที่ตรึงอยู่บนพื้นผิวของวัสดุที่มีน้ำหนักเบาอย่างกว้างขวาง เช่น เม็ดบีดส์แก้ว (Glass microbead) [13] พอลิเมอร์ (Polymer) [14] คอร์ก (Cork) [15] และกราฟไฟท์แบบขยาย (Expanded graphite) [16] ซึ่งโฟโตคะตะลิสต์แบบลอยตัวที่มีการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่ย่อยสลายได้ด้วยแสงได้ [17]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลจากขานอ้อย เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบลอยตัว ตลอดจนศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 /CMC-hydrogel ในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) ทั้งภายใต้รังสียูวีและภายใต้แสงอาทิตย์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุขานอ้อยที่สามารถหาได้จากอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2 (P25 Degussa, Evonik) อัตราส่วนฟลักอนาเทสต่อรูทิล (80:20) กรดซัคซินิก (Kemaus) กรดโมโนคลอโรอะซิติก (Sigma-Aldrich) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Univar)

อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Velp Scientifica) เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter; Innovation Beyond 2000, Index) เครื่องปั่นละเอียด (HR2056, Philips) ตู้อบลมร้อน (Mettler) เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น (UV-Visible spectrophotometer; UV mini 1240V, Shimadzu และรุ่น UV-2600, Shimadzu) กล้องไม้ที่ติดตั้งหลอดให้แสงอัลตราไวโอเลต (TL 8W, Philips) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM; S4700, Hitachi)

2.2. วิธีการทดลอง

1) การเตรียมวัตถุดิบ

นำขานอ้อยที่สามารถหามาได้จากอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา มาล้างด้วยน้ำจนสะอาดและหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) การสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อย

ขังขานอ้อย 35 กรัม เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10%w/v ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเอมิเซลลูโลสจนกลายเป็นของเหลวหนืด มีสีน้ำตาลแดง จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง ล้างเยื่อที่กรองด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH เป็นกลาง นำเยื่อที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด ฟอกสีเยื่อขานอ้อยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5%v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงจนได้เยื่อที่เป็นสีขาว ล้างเยื่อด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง อบเยื่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียดอีกครั้ง [18] แล้วนำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในลำดับต่อไป จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของผงเซลลูโลส โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{Percentage yield of cellulose} = \frac{W_B}{W_A} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_A และ W_B คือ น้ำหนักขานอ้อยและน้ำหนักเซลลูโลส ตามลำดับ

3) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

ขังผงเซลลูโลส 10 กรัม เติมน้ำโซโพรพานอลปริมาตร 200 มิลลิลิตร และเติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 30%w/v ปริมาตร 32 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เติมน้ำกรดโมโนคลอโรอะซิติก 12 กรัม แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมากรองด้วยกระดาษกรอง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [19] จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{Percentage yield of CMC} = \frac{W_C}{W_A} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_A และ W_C คือ น้ำหนักเซลลูโลสและน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ

4) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล

นำแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มาปั่นละเอียด จากนั้นชั่ง 1 กรัม และเติมน้ำกรดซัลฟิวริก 5%w/w ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและหนืด เติมน้ำละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในภาชนะพิมพ์ (ขนาด 10x10x0.5 เซนติเมตร) จากนั้นอบที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.50 ชั่วโมง อบเพิ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหยความชื้น และขั้นตอนสุดท้ายอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเชื่อมขวางสายโซ่โพลิเมอร์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล โดยใช้สมการที่ (3) โดยแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความหนาอยู่ในช่วง 150-200 ไมครอน

$$\text{Percentage yield of CMC-hydrogel} = \frac{W_d}{W_A} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_A และ W_d คือ น้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและน้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล ตามลำดับ

5) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

นำแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มาปั่นละเอียด ชั่ง 1 กรัม และเติมกรดซัลฟอนิกจำนวน 5%w/w ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปั่นจนอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและหนืด เติมนิโตรเจนไดออกไซด์ (TiO_2) จำนวน 0.5, 1 และ 2%w/w ของน้ำหนักคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นขึ้นรูปแผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นเดียวกับวิธีในข้อ 4)

6) การพิสูจน์ของแผ่นฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยแอมเพนนูเอเทโททรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำการวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 4000-650 cm^{-1} ทำการสแกนซ้ำ 40 รอบ แล้วประเมินผล วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชันทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ตำแหน่งภาคตัดขวาง ซึ่งเตรียมชิ้นงานด้วยการหักตัวอย่างภายใต้สภาวะไนโตรเจนเหลว ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ของแผ่นฟิล์มของแผ่นฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคดิฟฟิรแฟกแทนซ์ ยูวี สเปกโทรสโกปี ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยใช้สมการที่ (4)

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (4)$$

เมื่อ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.16×10^{-15} eV.s)

c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^{17} nm/s)

λ คือ ค่าของความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (nm)

7) การศึกษาปริมาณสารตัวเติมของแผ่นฟิล์ม $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

ซึ่งตัวอย่างปริมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยครุชีเบล บันทึกน้ำหนักก่อนเผา จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปลอ่ยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนักหลังเผา จากนั้นคำนวณหาร้อยละปริมาณสารตัวเติม (Amount of additive) โดยใช้สมการที่ (5)

$$\text{Amount of additive (\%)} = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา และน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ตามลำดับ

8) ศึกษาการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล

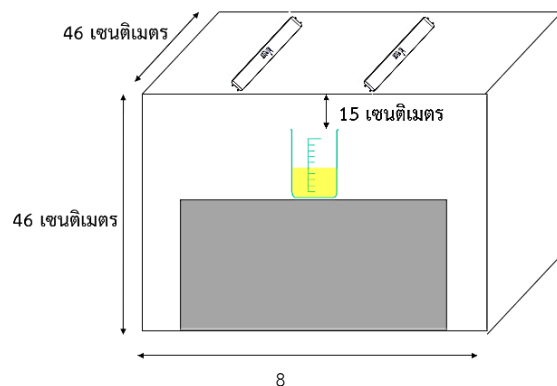
ตัดแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลขนาด 3x3 เซนติเมตร นำไปซังและจดบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ตามเวลาที่กำหนด คือ 5, 10, 20, 30, 60, 120 และ 180 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด ซังแผ่นไฮโดรเจลแล้วคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล โดยใช้สมการที่ (6)

$$\text{Water swelling} = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ A และ B คือน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลก่อนแช่น้ำ และน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลหลังแช่น้ำตามลำดับ

9) การทดสอบการสลายสีของสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

การสลายสีของสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ทดสอบโดยใช้หลอดยูวีขนาด 8 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งในกล่องที่มีขนาด 46x51x46 เซนติเมตร ระยะห่างจากหลอดยูวีถึงตัวอย่างเท่ากับ 15 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1 จากนั้นวางบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และวางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวในสารละลาย ปิดฝากล่องให้สนิท ปลอ่ยให้สีย้อมถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยา 30 นาที จากนั้นเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต และเก็บสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ทุก ๆ 0, 5, 10, 20, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ยาวความคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 รอบ



รูปที่ 1. กล่องสำหรับส่องแสงอัลตราไวโอเล็ต

10) การทดสอบสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์

บรรจุสารละลายเมทิลออเรนจ์เข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 50 มิลลิตรในบีกเกอร์ วางแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาลอยตัวในสารละลาย ปิดปากบีกเกอร์ให้ด้วยฟิล์มพลาสติกบางใส ปล่อยให้สีย้อมถูกดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาในที่มืด 30 นาที จากนั้นนำบีกเกอร์ไปวางบริเวณที่มีแสงแดด (ในช่วงเดือนมีนาคม) เก็บสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิตร ทุก ๆ 0, 5, 10, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง โดยทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์วันละ 8 ชั่วโมง ในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. ของแต่ละวัน หลังจากทดสอบในแต่ละวันทำการเก็บตัวอย่างไว้ในที่มืดและนำตัวอย่างมาทดสอบต่อในวันถัดไป นับเวลาเพิ่มจนครบเวลา 70 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ยาวความคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 รอบ

11) การทำกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์ เข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ppm จากสารละลายมาตรฐาน 100 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเมทิลออเรนจ์ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐานและคำนวณค่าความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน

3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

3.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฮโดรเจล

1) การเตรียมวัตถุดิบ

นำขานอ้อยแบบสดมาปอกเปลือกส่วนนอกออก จากนั้นนำส่วนเยื่อในที่ได้หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ล้างน้ำให้สะอาด แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำขานอ้อยที่แห้งแล้วมาปั่นละเอียดจะได้ผงของเซลลูโลส ลักษณะดังรูปที่ 2(ก)-2(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 2. ลักษณะขานอ้อยที่เตรียมได้ (ก) ขานอ้อยแบบสด (ข) ขานอ้อยแบบแห้ง และ (ค) ขานอ้อยแบบปั่นละเอียด

2) การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฮโดรเจล

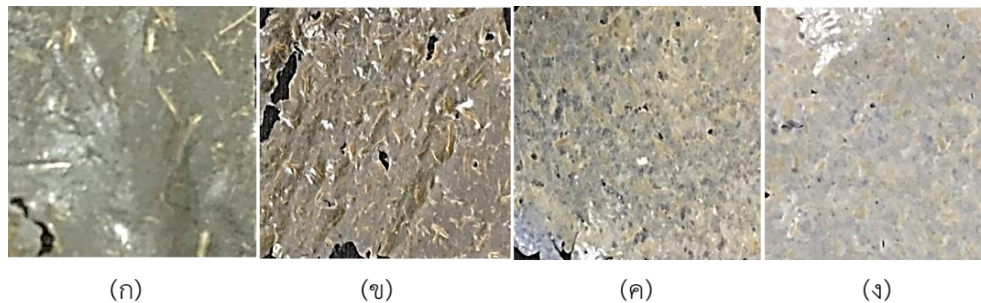
จากการเตรียมเซลลูโลสจากขานอ้อย จากนั้นนำเซลลูโลสที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับกรดคลอโรอะซิติกได้ผลผลิตเป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟูริก ได้ร้อยละผลผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ปริมาณร้อยละผลผลิตที่สังเคราะห์ได้ต่อปริมาณขานอ้อย

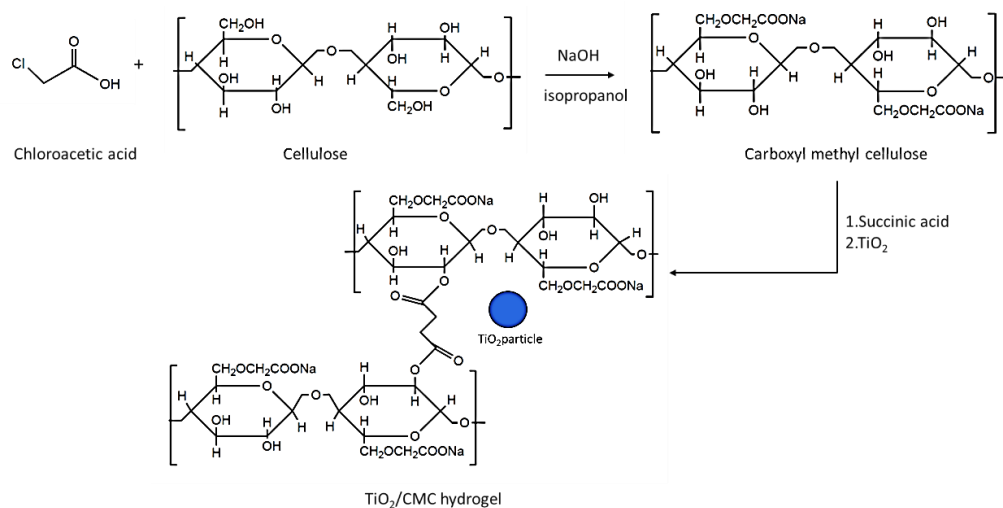
สารผลิตภัณฑ์	ร้อยละผลผลิต
เซลลูโลส	37.68
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	25.10
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล	23.03

3.2 ผลการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ที่มีปริมาณของ TiO_2 เท่ากับ 0.5%, 1% และ 2% พบว่าแผ่นฟิล์มมีความขาวขุ่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3(ก)-3(ง) ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปฏิกิริยาการสังเคราะห์ $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการศึกษาปริมาณสารตัวเติม TiO_2 ที่อยู่ใน CMC-hydrogel โดยการเผาตัวอย่าง $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ที่อุณหภูมิสูงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ทำการวิเคราะห์น้ำหนักที่เหลืออยู่ของ TiO_2 ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนร้อยละของ TiO_2 มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ TiO_2 ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการทดลองของวัสดุรองรับไฮโดรเจล (0.5, 1.0 และ 2.0%) ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3. ลักษณะแผ่นฟิล์ม (ก) CMC-hydrogel (ข) 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel (ค) 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ (ง) 2%TiO₂/CMC-hydrogel



รูปที่ 4. ปฏิกริยาการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและปฏิกริยาการสังเคราะห์ TiO₂/CMC-hydrogel

ตารางที่ 2. ปริมาณสารตัวเติม TiO₂ ในตัวเร่งปฏิกริยา

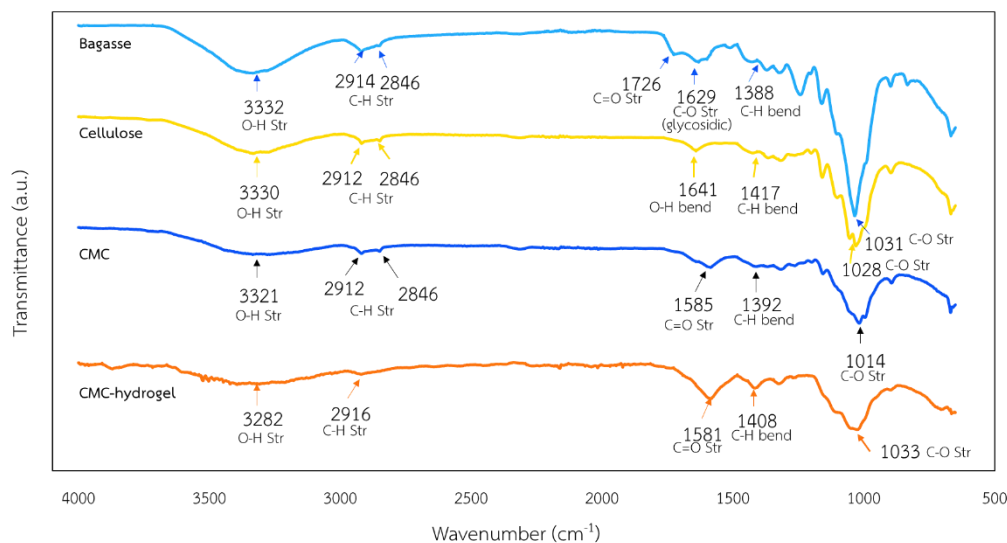
ตัวเร่งปฏิกริยา	น้ำหนัก TiO ₂ หลังเผา (กรัม)	สัดส่วน TiO ₂ (%)
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.01	0.46
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.02	0.94
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.04	2.05

3.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคแอมเพนนูเอเทดโททัตรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี ด้วยแอมเพนนูเอเทดโททัตรีเฟลกชันฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของ

สารตัวอย่าง โดยผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของชานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel แสดงดังรูปที่ 5

ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างชานอ้อย แสดงหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง 3332 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching ตำแหน่ง 2914 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching (Asymmetric) ตำแหน่ง 2846 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching (Symmetric) ตำแหน่ง 1734 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของเอมิเซลลูโลสและลิกนิน ตำแหน่ง 1629 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้าของเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลส ตำแหน่ง 1388 cm^{-1} และ 1031 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และ C-O stretching ของโครงสร้างเซลลูโลส โดยพิกัดดังกล่าวสอดคล้องกับโครงสร้างของเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในชานอ้อย [20]



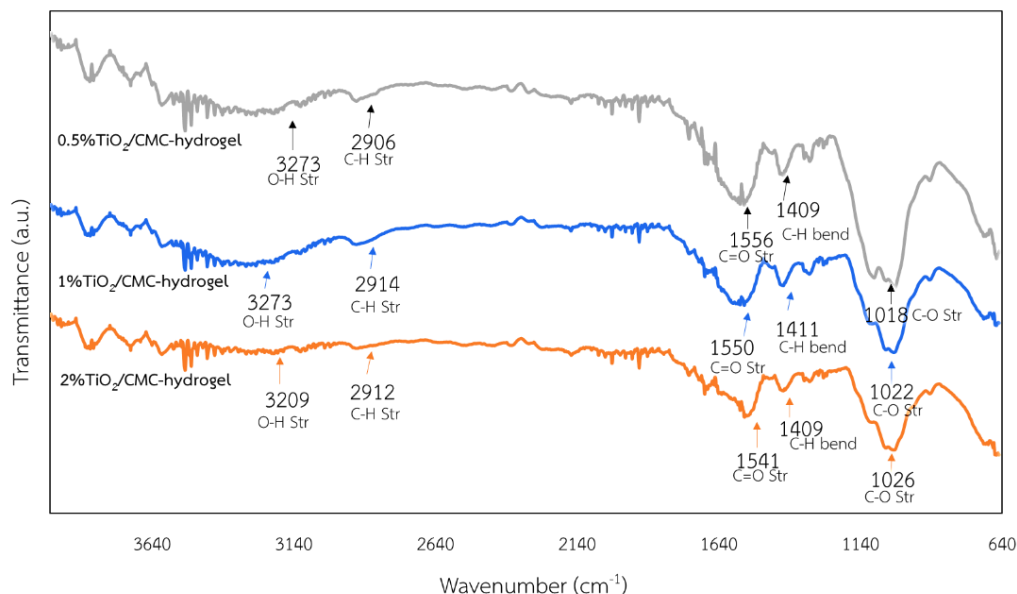
รูปที่ 5. อินฟราเรดสเปกตรัมของชานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลส พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1641 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับ [21] ตำแหน่ง 1417 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending ที่ตำแหน่ง 1031 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-O stretching [22] นอกจากนี้ยังมีการปรากฏพิกัดที่ 3330 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) ของเซลลูโลส ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สกัดได้จากชานอ้อยคือ เซลลูโลส

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่สังเคราะห์ได้พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1585 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate [23] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของ CMC ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ CMC จากเซลลูโลสได้ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1392 cm^{-1} และ 1014 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และพันธะ C-O stretching ตามลำดับ [24]

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) พบตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เลขคลื่น 1581 cm^{-1} และเป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ stretching พบว่าพีคของ CMC-hydrogel มีการดูดกลืนแสงมากขึ้นและมีการเลื่อนตำแหน่งสูงกว่า CMC เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการรวมกันของพีคของหมู่ฟังก์ชัน carboxylate และคาร์บอนิลของกรดซัคซินิก นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 1408 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ bending ของกรดซัคซินิก [25] ซึ่งปรากฏในพีคของ CMC-hydrogel มากกว่า CMC ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของกรดซัคซินิกที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถยืนยันได้เบื้องต้นว่าเกิดการเชื่อมขวาง CMC ได้

ค่าการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดของ $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ที่มีปริมาณ TiO_2 0.5%, 1% และ 2% แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างปรากฏหมู่ฟังก์ชันหลักคล้ายกัน คือ ที่ตำแหน่ง $3273\text{--}3209\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ $\text{O}-\text{H}$ stretching ตำแหน่ง $2914\text{--}2906\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{H}$ stretching ตำแหน่ง $1556\text{--}1541\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ stretching ของหมู่ Carboxylate โดยที่ตำแหน่งนี้พบการเลื่อนของพีคเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ Carboxylate และอนุภาค TiO_2 ที่ตำแหน่ง $1411\text{--}1409\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ bending ของกรดซัคซินิก ตำแหน่ง $1081\text{--}1022\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของพันธะ $\text{C}-\text{O}$ stretching ทั้งนี้พีคที่พบในช่วง $3273\text{--}3209\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคมีลักษณะกว้างที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ $\text{O}-\text{H}$ stretching

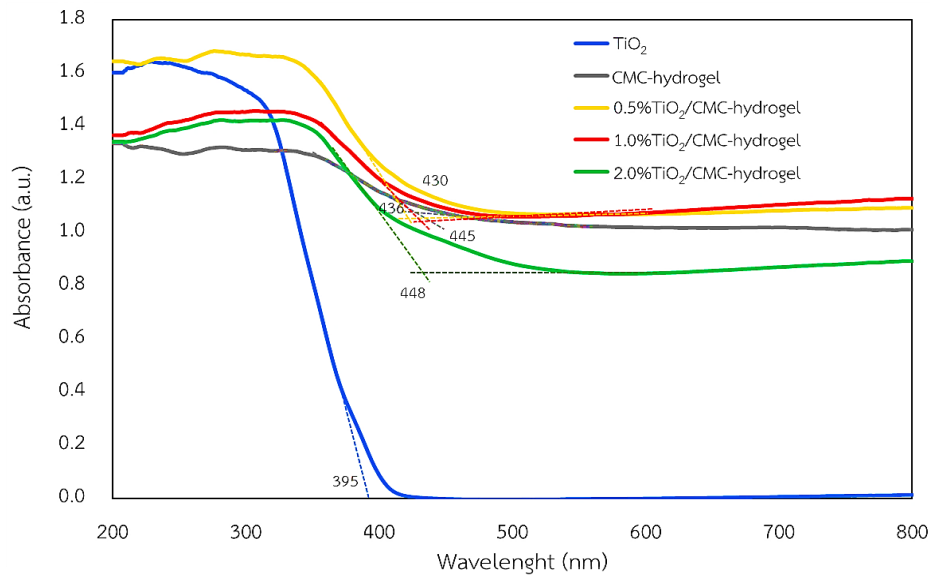


รูปที่ 6. อินฟราเรดสเปกตรัมของ 0.5%, 1% และ 2% $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

3.4 ผลการวิเคราะห์ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

ค่าช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง วิเคราะห์ได้โดยความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล (200-800 nm) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า

TiO₂ มีการดูดกลืนแสงเฉพาะในช่วงรังสียูวีเท่านั้น โดยมีค่าขอบการดูดกลืนแสงที่ 395 nm ส่วนวัสดุรองรับ CMC-hydrogel มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิซิเบิล โดยมีค่าขอบการดูดกลืนแสงที่ 445 nm ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂/CMC-hydrogel สามารถดูดกลืนแสงทั้งในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิล ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ และวัสดุรองรับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าขอบการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าขอบการดูดกลืนแสงของแต่ละตัวอย่างมาคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) โดยใช้สมการของพลิงค์ พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าขอบการดูดกลืนแสง อาจเนื่องมาจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาค TiO₂ และหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลตที่อยู่บนโครงสร้างของ CMC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sugashini และคณะ [11]



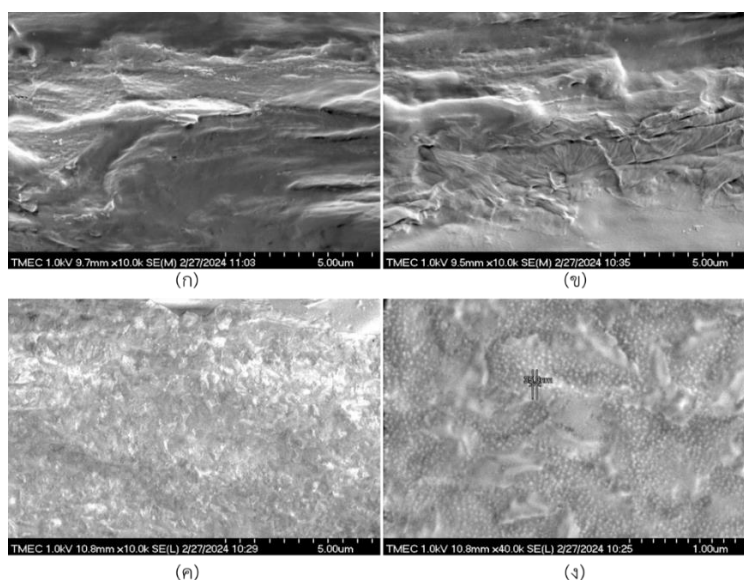
รูปที่ 7. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลของตัวอย่าง

ตารางที่ 3. จุดตัดความยาวคลื่นและค่าช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง

Materials	Absorption edge (nm)	Band gap energy (eV)
TiO ₂	395.02	3.15
CMC-hydrogel	445.16	2.78
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	430.07	2.89
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	436.15	2.85
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	448.17	2.77

3.5 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของ TiO_2/CMC -hydrogel

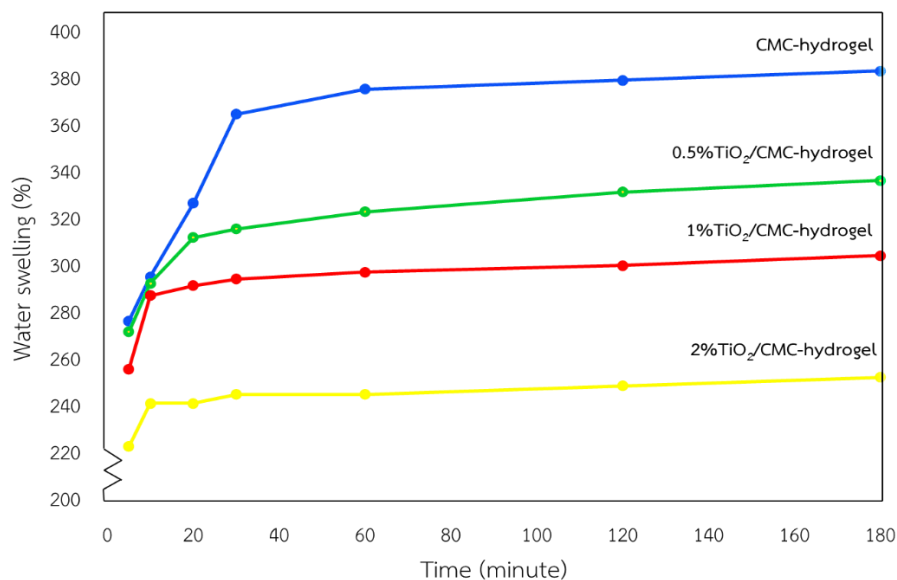
สัณฐานวิทยาของตัวอย่าง TiO_2/CMC -hydrogel ที่ตำแหน่งภาคตัดขวางสามารถวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8(ก)-8(ง) พบว่าอนุภาค TiO_2 มีการกระจายตัวบนวัสดุรองรับ hydrogel ทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาค TiO_2 ในรูป 8(ค) มีปริมาณมากกว่า 8(ข) และ 8(ก) ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณ TiO_2 ที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่าง TiO_2/CMC -hydrogel แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อศึกษาตัวอย่าง 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel ด้วยกำลังขยาย 40k สังเกตได้ว่าอนุภาค TiO_2 มีการกระจายตัวเป็นแบบอนุภาคเดี่ยว (Single particle) และพบว่าอนุภาค TiO_2 มีขนาดประมาณ 35 นาโนเมตร จากข้อมูลสัณฐานวิทยาสามารถบ่งบอกได้ว่ากระบวนการใช้ในการเตรียม TiO_2/CMC -hydrogel มีความเหมาะสม



รูปที่ 8. สัณฐานวิทยาที่ กำลังขยาย 10k ของ (ก) 0.5% TiO_2/CMC -hydrogel (ข) 1.0% TiO_2/CMC -hydrogel (ค) 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel และ (ง) สัณฐานวิทยาที่ กำลังขยาย 40k ของ 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel

3.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบวมน้ำของไฮโดรเจล

การศึกษาการบวมน้ำของฟิล์ม CMC-hydrogel และ TiO_2/CMC -hydrogel ที่ความเข้มข้น 0.5%, 1% และ 2% ทดสอบโดยการนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างแช่น้ำที่เวลา 5, 10, 20, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบวมน้ำของตัวอย่างมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลาเริ่มต้น และพบว่าฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการบวมน้ำมากที่สุดที่เวลา 180 นาที เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิเลตที่อยู่บนโครงสร้างของ CMC สามารถดึงดูดโมเลกุลน้ำได้ดี จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2 ในวัสดุไฮโดรเจล ทำให้ประสิทธิภาพในการบวมน้ำลดลง เนื่องจากอนุภาคของ TiO_2 ที่อยู่ใน CMC-hydrogel เกิดแรงดึงดูดกับหมู่คาร์บอกซิเลต (ยืนยันจากผล ATR-FTIR) ส่งผลให้สายโซ่ CMC-hydrogel มีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลน้ำได้น้อยลง แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9. การบวมน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาลอยตัว TiO₂/CMC-hydrogel

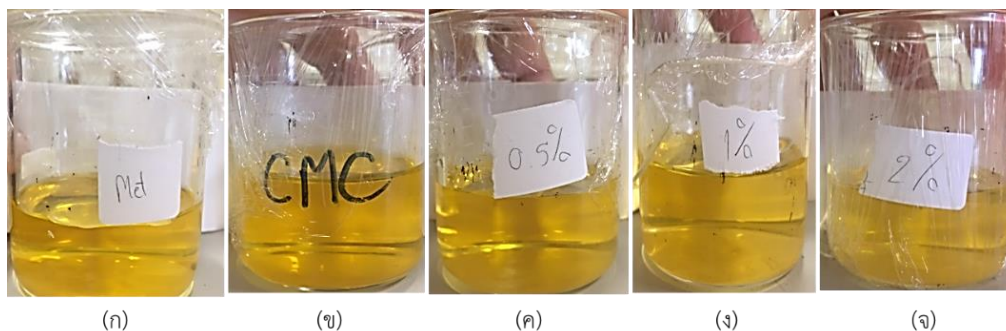
อย่างไรก็ตามการเติม TiO₂ ในปริมาณ 2wt% พบว่าวัสดุไฮโดรเจลยังคงมีความสามารถในการบวมน้ำได้ ซึ่งการบวมน้ำของไฮโดรเจลสามารถช่วยให้ TiO₂ สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำเพื่อสร้างสารอนุพลอิสระในกำจัดสีย้อม นอกจากนี้การบวมตัวของแผ่นไฮโดรเจลยังช่วยดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เข้ามาใกล้อนุภาค TiO₂ ส่งผลให้สามารถกำจัดสีย้อมอินทรีย์ได้ หากแผ่นไฮโดรเจลไม่สามารถบวมน้ำได้เนื่องจากอนุภาค TiO₂ ถูกเคลือบไว้โดยวัสดุรองรับ ทำให้อนุภาค TiO₂ ไม่สามารถสัมผัสโมเลกุลน้ำและสารอินทรีย์ได้

3.7 การศึกษาการสลายสีย้อม

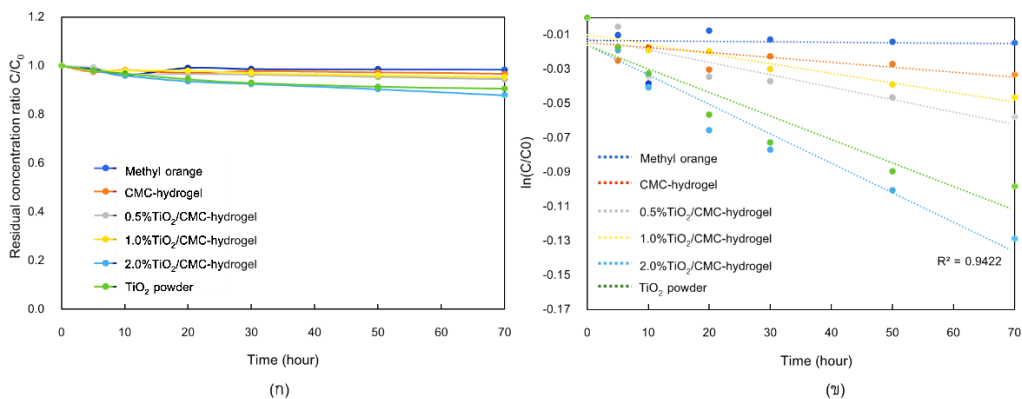
1) การสลายสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต

การเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวทั้งสามชนิด ถูกทดสอบโดยการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ที่ความเข้มข้น 5 ppm ทำการศึกษาที่ช่วงเวลา 0, 5, 10, 20, 30, 50 และ 70 ชั่วโมงตามลำดับ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต (ความเข้มแสงเฉลี่ย 1910 ลักซ์) พบว่าสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ไม่ได้ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเมทิลออเรนจ์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) ค่อนข้างคงที่หลังจากผ่านการทดสอบเป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 10 ผลการทดลองที่ได้ปรากฏในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบด้วยแผ่นฟิล์ม CMC-hydrogel และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี TiO₂ ในปริมาณน้อย (0.5%TiO₂/CMC-hydrogel และ 1.0%TiO₂/CMC-hydrogel) อาจเนื่องมาจากความเข้มแสงยูวีในกล่องทดสอบมีปริมาณน้อยเกินไป จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัวที่มีปริมาณ TiO₂ เป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อย (0.5 และ 1.0wt%) ไม่สามารถสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์ได้ภายในระยะเวลา 70 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 เป็น 2.0wt% พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีแนวโน้มในการสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์ได้เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 11(ก) และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีค่า C/C_0 ลดลงที่เวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง เนื่องจากในช่วงเวลานี้อนุภาค TiO_2 เริ่มกระบวนการดูดซับพลังงานแสงยูวีเพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสีย้อม นอกจากนี้พบว่าค่า C/C_0 มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ทดสอบ โดยมีประสิทธิภาพการสลายโมเลกุลของเมทิลออเรนจ์เท่ากับ 12% ภายในระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเนื่องจาก 2% TiO_2 /CMC-hydrogel มีพื้นที่ผิวของอนุภาค TiO_2 มากกว่า (ยืนยันได้จากผล FE-SEM) จึงสามารถสร้างอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้มากขึ้น และจากการศึกษาทางจลนศาสตร์การสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ พบว่าการสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 ตามโมเดลจลนศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94 แสดงดังรูปที่ 11(ข) นอกจากนี้ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟจากรูป 11(ข) ถูกแสดงเพิ่มเติมในตารางที่ 4 โดยพบว่าค่า k_{app} ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.0017 cm^{-1} อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมภายใต้รังสียูวียังไม่มีประสิทธิภาพมากนัก เนื่องจากแสงยูวีที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มแสงน้อยเกินไป จึงส่งผลให้อนุภาค TiO_2 สร้างอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดสีย้อมได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว 2.0% TiO_2 /CMC-hydrogel มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่าเล็กน้อยภายใต้ระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง อาจเนื่องจากวัสดุรองรับไฮโดรเจลที่เป็นองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว ช่วยพยุงให้อนุภาค TiO_2 รับพลังงานจากแสงยูวีได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ชนิดผง ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคที่บริเวณก้นภาชนะเมื่อใช้เวลาในการทดสอบเป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 10. การสลายสีย้อมภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตการสลายสีย้อม ณ เวลา 30 ชั่วโมง ของ (ก) Methylorange (ข) CMC (ค) 0.5% TiO_2 /CMC-hydrogel (ง) 1% TiO_2 /CMC-hydrogel และ (จ) 2% TiO_2 /CMC-hydrogel



รูปที่ 11. ผลการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ก) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีของเมทิลออเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และ (ข) จลนศาสตร์ของการสลายเมทิลออเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

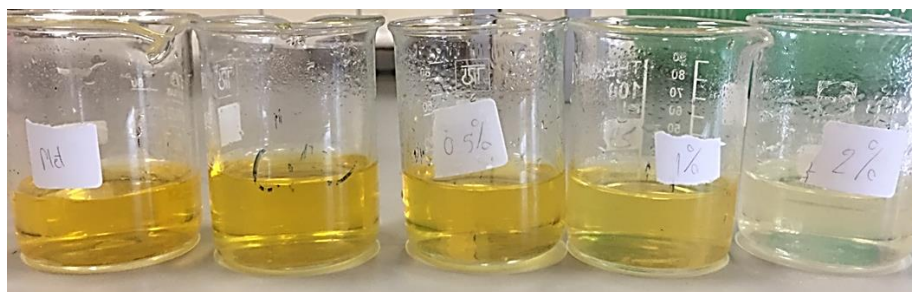
ตารางที่ 4. ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) และค่า R^2 ของการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวเร่งปฏิกิริยา	k_{app} (min ⁻¹)	R^2
Methyl orange (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา)	0.0000	0.0044
CMC-hydrogel	0.0003	0.4516
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0007	0.7811
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0006	0.8814
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0017	0.9422
TiO ₂ powder	0.0014	0.8895

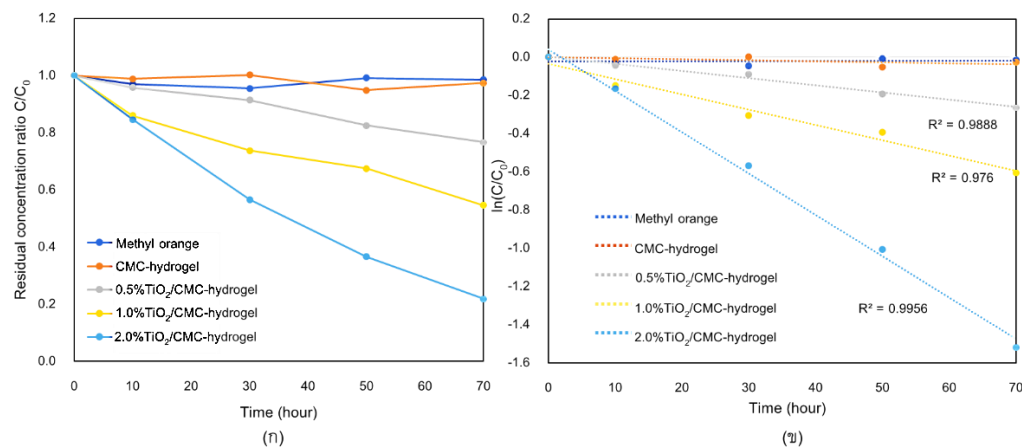
2) การสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์

การสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ ทดสอบโดยใช้แผ่นฟิล์มแบบลอยตัว CMC-hydrogel, 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel, 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ 2%TiO₂/CMC-hydrogel โดยทำการทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ (ความเข้มแสงเฉลี่ย 552,500 ลักซ์) เป็นเวลา 0, 10, 30, 50 และ 70 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ค่า C/C_0 ของสารละลายเมทิลออเรนจ์ที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแผ่น CMC-hydrogel ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 70 ชั่วโมง เนื่องจากแผ่น CMC-hydrogel ที่ไม่มีอนุภาค TiO₂ ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ ประกอบกับในการทดลองได้มีการปิดภาชนะทดสอบอย่างมิดชิดทำให้ไม่มีผลจากการระเหยของโมเลกุลน้ำในสารละลายเมทิลออเรนจ์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%TiO₂/CMC-hydrogel, 1%TiO₂/CMC-hydrogel และ 2%TiO₂/CMC-hydrogel สามารถสลายสีของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 12 โดยพบว่า ค่า C/C_0 ของแผ่นฟิล์มทั้งสามชนิดมีแนวโน้มลดลงหลังจากใช้เวลาทดสอบ 10 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้อนุภาค TiO₂ เริ่มกระบวนการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการกำจัดสีของเมทิลออเรนจ์ เมื่อใช้เวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นค่า C/C_0 ของแผ่นฟิล์มยังมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ ในแผ่นฟิล์มแบบลอยตัว โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%TiO₂/CMC-hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีของเมทิลออเรนจ์ได้มากที่สุดถึง 78.11% ที่เวลา 70 ชั่วโมง ดังแสดงรูปที่ 13(ก) อธิบายได้จากเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO₂ ใน

วัสดุ CMC-hydrogel ทำให้มีพื้นที่ผิวของอนุภาค TiO_2 ในการถูกกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 บนวัสดุไฮโดรเจล จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยา (FE-SEM) ดังนั้น TiO_2 จึงสามารถสร้างอนุภาคลิสรสเพื่อกำจัดสีย้อมได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ในระยะเวลาสั้นขึ้น ยังส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดสีย้อมของ TiO_2/CMC -hydrogel เพิ่มขึ้น และพบว่าการกำจัดสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพมากกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตในตู้ทดสอบภายใต้ระยะเวลาทดสอบ 70 ชั่วโมง เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงวิชิเบิลได้ สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ใน CMC-hydrogel ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในสร้างอนุภาคลิสรสภายใต้แสงอาทิตย์ ประกอบกับความเข้มแสงที่ได้รับจากดวงอาทิตย์มีปริมาณมากกว่าตู้ทดสอบแสงยูวี ด้วยเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่าการสลายตัวของเมทิลออเรนจ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/CMC -hydrogel สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1 ตามโมเดลจลนศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5% TiO_2/CMC -hydrogel, 1% TiO_2/CMC -hydrogel และ 2% TiO_2/CMC -hydrogel มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98, 0.97 และ 0.99 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 13(ข) ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) ของการสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ถูกแสดงในตารางที่ 5 จากตารางพบว่าค่า k_{app} ของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.0217 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0% TiO_2/CMC -hydrogel มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมได้ดีภายใต้แสงอาทิตย์ ดังแสดงในตารางที่ 6 ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ จึงมีศักยภาพในการถูกพัฒนาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในแหล่งน้ำธรรมชาติได้



รูปที่ 12. การสลายสีย้อมภายใต้แสงอาทิตย์ ณ เวลา 70 ชั่วโมง (ก) Methylorange (ข) CMC (ง) 0.5% TiO_2/CMC -hydrogel (จ) 1% TiO_2/CMC -hydrogel และ (ค) 2% TiO_2/CMC -hydrogel



รูปที่ 13. ผลการสลายสีของเมทิลอเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ (ก) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีของเมทิลอเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และ (ข) จลนศาสตร์ของการสลายเมทิลอเรนจ์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นภายใต้แสงอาทิตย์

ตารางที่ 5. ค่าคงที่อัตราที่ปรากฏ (k_{app}) และค่า R^2 ของการสลายสีของเมทิลอเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์

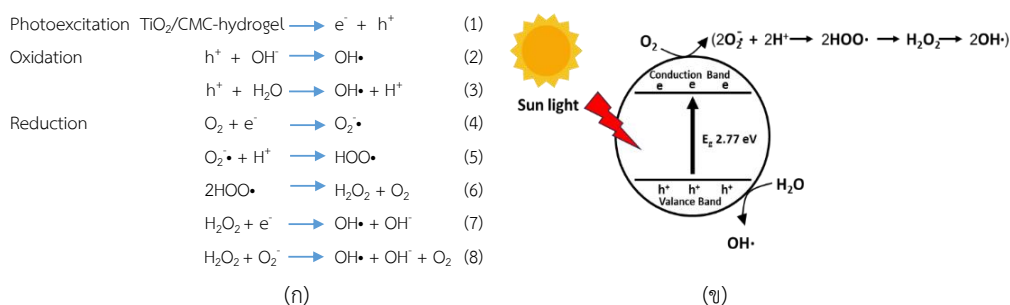
ตัวเร่งปฏิกิริยา	k_{app} (min^{-1})	R^2
Methyl orange (ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา)	0.0000	0.0017
CMC-hydrogel	0.0005	0.4201
0.5%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0038	0.9888
1.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0080	0.976
2.0%TiO ₂ /CMC-hydrogel	0.0217	0.9956

ตารางที่ 6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	สารอินทรีย์ที่ใช้ทดสอบ	เวลาที่ทำการทดสอบ	ประสิทธิภาพการกำจัดสี
TiO ₂ /Polylactic acid [26]	เมทิลีนบลู	ปฏิกิริยาแบบมีแสง UVC 90 นาที	แผ่นฟิล์ม TiO ₂ /PLA สามารถกำจัดสารเมทิลีนบลูได้ 80%
0.1 % Ag/TiO ₂ [27]	เมทิลีนบลู	12 ชั่วโมง ภายใต้การฉายแสงยูวีช่วงที่ตามองเห็น	ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน สลายสีของอินทรีย์ได้ 30%
TiO ₂ /Polyethylene terephthalate) [28]	เมทิลีนบลู	12 ชั่วโมง ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์	แผ่น TiO ₂ /PET ที่มี ประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลีนบลู 28.36%
2%TiO ₂ /CMC-hydrogel (งานวิจัยนี้)	เมทิลอเรนจ์	70 ชั่วโมง ภายใต้แสงอาทิตย์	แผ่นไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพการสลายสีได้ 78.11%

3) กลไกการสลายสีย้อม

กลไกการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบลอยตัว $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ ภายใต้แสงอาทิตย์ เริ่มจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะรับพลังงานและถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และสร้าง hole ไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณแถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโมเลกุลน้ำจะทำปฏิกิริยากับ hole เกิดเป็นสาร $\text{OH}\cdot$ ซึ่งมีความสามารถในการสลายโมเลกุลของสีย้อมให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น CO_2 และ H_2O ส่วนอิเล็กตรอนที่บริเวณแถบนำไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุล O_2 เกิดเป็น $\text{O}_2\cdot^-$ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อเป็น $\text{OH}\cdot$ [29] และมีความสามารถในการสลายสีย้อมได้เช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14. การเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) ปฏิกิริยา photo-oxidation และ (ข) กลไกการสลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้นำขานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลโดยใช้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟอนิก ได้ผลผลิตเท่ากับ 92.1% จากการศึกษาการบวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ พบว่าการเพิ่มปริมาณ TiO_2 ส่งผลให้การบวมตัวของแผ่นไฮโดรเจลลดลง จากผลสัณฐานวิทยาพบว่าอนุภาค TiO_2 มีการกระจายตัวดีในวัสดุรองรับไฮโดรเจล ผลการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ พบว่าวัสดุรองรับ CMC-hydrogel สามารถช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงในช่วงแสงวิซิเบิลได้ ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงอาทิตย์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบลอยตัว 2% $\text{TiO}_2/\text{CMC-hydrogel}$ มีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมได้ถึง 78.11% ที่เวลา 70 ชั่วโมง โดยมีกลไกการสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับ 1

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่สนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] อังศุมา ก้านจักร, รติกร แสงห้าว และเมตตา เก่งวงศ์. 2565. การบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนและร้านอาหารโดยการใช้ถังดักไขมันร่วมกับวัสดุธรรมชาติท้องถิ่น. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 27(3), 1648-1665. [Angsuma Kanchak, Ratikorn Sanghaw and Metta Kengchuwong. 2022. Wastewater Treatments from Household and Canteen by Applying Grease Trap Combined with Locally Available Natural Materials. *Burapha Science Journal (BSJ)*, 27(3), 1648-1665. (in Thai)]
- [2] องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ (อพวช.). 2564. ปัญหาน้ำเน่าเสียในประเทศไทย. แหล่งข้อมูล: <https://www.nsm.or.th/nsm/th/node/6251>. ค้นเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2567.
- [3] Simonic, M. 2021. Reverse Osmosis Treatment of Wastewater for Reuse as Process Water-A Case Study. *Membranes*, 11(976), 1-12, <https://doi.org/10.3390/membranes11120976>.
- [4] Sun, W. et al. 2017. Effective Treatment of High Phosphorus Pharmaceutical Wastewater by Chemical Precipitation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(8), 1585-1593, <https://doi.org/10.1002/cjce.22799>.
- [5] Leiknes, T. 2009. The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 8-12, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60003-6).
- [6] Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M. and Sillanpää, M. 2013. An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering*, 219, 499-511, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.038>.
- [7] Shin, D.C., Kim, J.S. and Park, C.H. 2019. Study on physical and chemical characteristics of microorganism immobilized media for advanced wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 29(100784), 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100784>.
- [8] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ และสิริรัตน์ พานิช. 2563. การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยตัวดูดซับจากวัสดุชีวภาพ. รายงานการวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. [Woravith Chansuvarn and Sirirat Panich. 2020. Bioadsorbents for the removal of heavy metals from an aqueous solution. Research project report, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)]
- [9] จุรีพร วงศ์จันดา. 2562. การกำจัดสีย้อมมาลาไท์กรีนจากสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. [Jureeporn Wongjunda. 2019. Removal of malachite green dye from aqueous

- solution by adsorption process with photocatalysis process using titanium dioxide immobilized montmorillonite clay. Thesis, Major in environmental engineering, Faculty of engineering, Ubon Ratchathani University. (in Thai)]
- [10] Jiang, D., Xu, Y., Hou, B., Wu, D. and Sun, Y. 2007. Synthesis of visible light-activated TiO_2 photocatalyst via surface organic modification. *Journal of Solid State Chemistry*, 180(5), 1787-1791, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2007.03.010>.
- [11] Sugashini, S. et al. 2022. Nanochitosan/carboxymethyl cellulose/ TiO_2 biocomposite for visible-light-induced photocatalytic degradation of crystal violet dye. *Environmental Research*, 204, 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112047>.
- [12] อัจฉมาน อาแดร์ ฮาซันดอปอ และสุรเดช มัจฉาเวช. 2564. การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลเย็นเคลือบยางพาราสำหรับลดไข้. รายงานการวิจัย, คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. [Ajaman Adair Hasan Daupor and Suradet Matchawet. 2021. Preparation of Cooling Pads Hydrogel Coated Natural Rubber for Reducing Temperature. Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University. (in Thai)]
- [13] Cui, L., Wang, Y., Niu, M., Chen, G. and Cheng, Y. 2009. Synthesis and visible light photocatalysis of Fe-doped TiO_2 mesoporous layers deposited on hollow glass microbeads. *Journal of Solid State Chemistry*, 182(10), 2785-2790, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.07.045>.
- [14] Singh, S., Mahalingam, H. and Singh, P.H. 2013. Polymer-supported titanium dioxide photocatalysts for environmental remediation: A review. *Applied Catalysis A: General*, 462-463, 178-195, <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.04.039>.
- [15] Matias, M.L. et al. 2022. Floating TiO_2 -Cork Nano-Photocatalysts for Water Purification Using Sunlight. *Sustainability*, 14(9645), 1-22, <https://doi.org/10.3390/su14159645>.
- [16] Wang, X. et al. 2018. Adsorption-photocatalysis Functional Expanded Graphite C/C Composite for In-Situ Photocatalytic Inactivation of *Microcystis aeruginosa*. *Chemical Engineering Journal*, 341, 516-525, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.054>.
- [17] Xing, Z. et al. 2018. Recent advances in floating TiO_2 -based photocatalysts for environmental. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225, 452-467, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.005>.
- [18] ทิฆัมพร จันทร์สุข, เบญจวรรณ บุญยะสิงห์ และพิเชษฐ อนุรักษอุดม. 2562. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเปลือกข้าวโพด. การประชุมวิชาการระดับชาติของภาควิชาชีพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม วันที่ 3-4 ธันวาคม 2562, 3022-3027. [Tikhamporn Chansuk, Benjawan Boonyasing and Piched Anuragudom. 2019. Carboxymethyl Cellulose from Corn Peel. Proceedings of 16th National Academic Conference, Chemistry division, Faculty of Liberal Arts and

- Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, December 3-4, 3022-3027. (in Thai)]
- [19] นิภาพร แสงชู, ชุฬีพร พุฒนวล, วณิดา พงษ์ศักดิ์ชาติ, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ และอารักษ์รา แสงนาค. 2551. วิธีการและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากฟางข้าว, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 31(4), 797-809. [Nipaporn Saengchu, Chuleeporn Puttmual, Vanida Pongsakchat, Kullaya Limroongreungrat and Arpathsra Sangnark. 2007. Optimum Method and Conditions of Carboxymethyl Cellulose Production from Rice Straw. *KMUTT Research and Development Journal*. 31(4), 797-809. (in Thai)]
- [20] Scheufele, F.B. et al. 2015. Assessment of Drying Temperature of Sugarcane Bagasse on Sorption of Reactive Blue 5G Dye. *Fibers and Polymers*, 8, 1646–1656, <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5087-2>.
- [21] Wulandari, W.T., Rochliadi, A. and Arcana, I.M. 2016. Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. *Materials Science and Engineering*, 107, 1–7, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012045>.
- [22] Abdel-Halim, E.S. 2013. Chemical modification of cellulose extracted from sugarcane bagasse: Preparation of hydroxyethyl cellulose. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3), 362–371, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.006>.
- [23] Fattima, N. et. al. 2021. Carboxymethyl Cellulose Hydrogel from Biomass Waste of Oil Palm Empty Fruit Bunch Using Calcium Chloride as Crosslinking Agent. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 1–16, <https://doi.org/10.3390/polym13234056>.
- [24] Rozali, M.L.H., Ahmad, N.H. and Isa, M.I.N. 2015. Effect of Adipic Acid Composition on Structural and Conductivity Solid Biopolymer Electrolytes Based on Carboxy Methylcellulose Studies. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(2), 39–45.
- [25] Paris Junior J.A. et al. 2021. Chemical, spectroscopic characterization, molecular modeling and antibacterial activity assays of a silver (I) complex with succinic acid. *Eclética Química Journal*, 46(2), 26–35, <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v46.2.2021.p26-35>.
- [26] สุปรีดา หอมกลิ่น. 2562. การกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยใช้แผ่นฟิล์ม TiO₂/PLA. วิทยานิพนธ์, หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยพะเยา. [Supeeda Homklin. 2018. Removal of methylene blue by photocatalytic process using TiO₂/PLA, Master of Engineering in Environmental Engineering, University of Phayao. (in Thai)]
- [27] ณัฐนันท์ รุ่งฟ้า. 2564. การพัฒนาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือรวมเพื่อใช้เป็น ส่วนผสมในสารเคลือบผิว. วิทยานิพนธ์, หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

- ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. [Nutthanun Rungfa. 2021. Co-doped Titanium Dioxide Nanoparticle Development for Additives in Surface Coated Solutions, Master of Science in Applied Chemistry, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)]
- [28] เกรียงไกร ทองลิ้ม, สิริลักษณ์ เจียรกร และประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล. 2558. ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสของฟิล์มกรองแสงเคลือบด้วยฟิล์มไททาเนียและเงิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 34 มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 27 มีนาคม 2558 คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 165-171. [Kriangkrai Thonglim, Siriluk Chiarakorn and Prapat Pongkiatkul. 2015. Photocatalytic Reaction of Light Filter Film Coated by Silver doped Titania. Proceedings of 34th National Graduate Research Conference, Faculty of Medicine, Khon Kaen University March 27, 165-171. (in Thai)]
- [29] Ajmal, A., Majeed, I., Malik, R. N., Idriss, H. and Nadeem, M. A. 2014. Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *RSC Advances*, 4, 37003–37026, <https://doi.org/10.1039/C4RA06658H>.