

การสลายตัวเชิงแสงของเมทิลีนบลูโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครง

Photodegradation of Methylene Blue Using CaO Derived from Cockle Shell

ชัชวาลย์ สุขมัน

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Email address: chatchawan.s@rmutk.ac.th, james2517@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงเหลือทิ้งด้วยวิธีแคลไซน์ เพื่อใช้ในการสลายตัวเชิงแสงของเมทิลีนบลูร่วมกับแสง นำแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค XRD, XRF และ BET แคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยแครงปดมีพื้นที่ผิวเฉลี่ยเท่ากับ $5.51 \text{ m}^2/\text{g}$ catalyst จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค BET การทดสอบการสลายตัวเชิงแสงของเมทิลีนบลูร่วมกับแสง ศึกษาโดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังวัตต์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง และระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าการใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 6 ppm ปริมาณตัวเร่ง 0.4 g/L โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 20 W และระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา 180 นาที ให้ร้อยละการสลายตัวเชิงแสงของเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 31.57

คำสำคัญ : แคลเซียมออกไซด์ การแตกสลายเชิงแสง เมทิลีนบลู เปลือกหอยแครง

Abstract

This research studied preparation process of calcium oxide from cockle shell by calcination process for photodecomposing methylene blue. Obtained calcium oxide was characterized by XRD, XRF and BET techniques. Cockle shell gave the average surface areas of $5.51 \text{ m}^2/\text{g}$ catalyst that examined by BET. Then it was selected for study of methylene blue photodegradation. The initial concentration of methylene blue, volume of catalyst, watt power fluorescent of light source and reaction time were the influence photodegradation of methylene blue. The results showed that the initial concentration of methylene blue at 6 ppm, 0.4 g/L of catalyst using 20 W of fluorescent and reaction time at 180 min gave the highest efficiency of methylene blue photodegradation at 31.57 %.

Keywords : Calcium oxide, Photodegradation, Methylene blue, Cockle shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมีมากขึ้น โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งมีการใช้น้ำในหลายขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็น ขั้นตอนการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อม โดยใช้วัตถุเคมีเป็น สีย้อมผ้า และ สารเคมี ปัญหาที่พบนั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือมีการปล่อยน้ำจากกระบวนการผลิตลงสู่แม่น้ำ ซึ่งน้ำที่ถูกละลายออกมาโดยมากมีมลสารจากสี ฟอกย้อม สีบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดไม่ละลายน้ำ ทำให้น้ำมีการแปรสภาพเป็นน้ำเสียเกิดผลกระทบโดยตรงกับแหล่งน้ำ ทำให้ค่าบีโอดี และซีโอดี มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำ ส่วนผลกระทบรองลงมาจะทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพทางแหล่งน้ำ โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียจะใช้วิธีการดูดซับหรือวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะต้องเปลี่ยนสีย้อมจากสถานะของเหลวให้กลายเป็นของแข็งก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป เป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะลำดับที่ 2 ขึ้น [1-4] ดังนั้นการย่อยสลายโดยใช้แสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยบำบัดน้ำเสียในขั้นแรกได้ ปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นแทนไททาเนียเพิ่มมากขึ้น [5-9] เพราะสามารถช่วยลดต้นทุนในกระบวนการได้มาก เนื่องจากไททาเนียเป็นสารที่มีราคาแพง สารที่ถูกนำมาใช้แทนไททาเนียในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง อาทิ เช่น $Zn_xCd_{1-x}S$ [10], $InVO_4$ [11], Bi_2WO_6 [12] เป็นต้น สารที่กล่าวมาข้างต้นเหล่านี้ล้วนมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) กว้างทั้งสิ้น ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำงานวิจัยมีความคิดที่จะนำแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยแครงเหลือทิ้ง [13-15] มาทำการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งน่าจะมีความเป็นไปได้สูง เพราะแคลเซียมออกไซด์มีความกว้างแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ประมาณ 7.1 eV [16] ซึ่งใกล้เคียงกับสารที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกหอยแครงเหลือทิ้งอีกด้วย

2. การทดลอง

2.1 การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงด้วยวิธีแคลไซน์

งานวิจัยนี้ใช้เปลือกหอยแครงจากจังหวัดสมุทรปราการ โดยนำเปลือกหอยแครงมาล้างให้สะอาด ตากให้แห้งและทำการบดเปลือกหอยแครงให้ละเอียดจากนั้นนำเปลือกหอยแครงที่บดได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $650^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของอากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการคัดขนาดอนุภาคที่ได้โดยเลือกเฉพาะอนุภาคที่รอดผ่านตะแกรงเบอร์ 80 Mesh ตามมาตรฐาน ASTM E 11 นำอนุภาคที่คัดได้ไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD รุ่น X' Pert Pro PW 3040/60) และ เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (XRF รุ่น HORIBA MESA-500 W) และการดูดซับทางกายภาพของไนโตรเจน (BET รุ่น Autosorb-1 Quantachrome)

2.2 ปฏิกริยาการแตกสลายเชิงแสงของเมธิลีนบลูในชุดทดสอบ

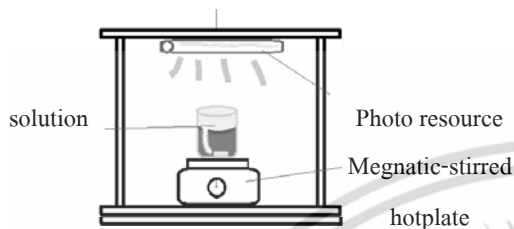
สร้างชุดทดสอบสำหรับการสลายตัวเชิงแสงของเมธิลีนบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงดังรูปที่ 1 นำสารละลายเมธิลีนบลูความเข้มข้น 10 ppm ปริมาณ 250 mL ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 mL หลังจากนั้นใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป 0.2 g/L กวนสารละลายอย่างต่อเนื่องแล้วทิ้งไว้ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูในที่มีดเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเปิดหลอดฟลูออเรสเซนซ์กำลัง 14 วัตต์และทำการเก็บตัวอย่างเมธิลีนบลู ปริมาณ 3 mL ทุกๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลา 90 นาที นำสารละลายเมธิลีนบลูที่เก็บได้ในแต่ละช่วงเวลาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Aquamate QA 130301) ที่ความยาวคลื่น 664 nm และทำการทดลองซ้ำโดย 1) เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของเมธิลีนบลูเป็น 4, 6 และ 8 ppm 2) เปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์เป็น 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 g/L และ 3) เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงของหลอดฟลูออเรสเซนซ์ ที่กำลังวัตต์ต่าง ๆ กันคือ 14, 20 และ 23 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

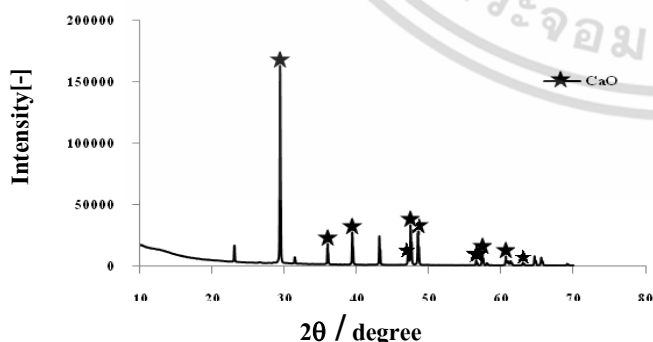
3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์

หลังจากนำเปลือกหอยแครงบดมาทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 °C ภายใต้บรรยากาศของอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการแคลไซน์เป็นไปดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1 ชุดทดสอบการสลายตัวเชิงแสงของเมธิลินบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

ผลการตรวจสอบอนุภาคที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.37, 35.94, 39.41, 47.11, 47.50, 48.47, 56.56, 57.38, 60.64 และ 63.21 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ทำให้ทราบปริมาณธาตุที่มีอยู่ในอนุภาคเปลือกหอยแครงบดที่ผ่านการแคลไซน์ แสดงดังตารางที่ 1 โดยพบว่ามีธาตุแคลเซียมอยู่ร้อยละ 69.2 ขณะที่พื้นที่ผิวเฉลี่ยจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค BET มีค่าเท่ากับ 5.51 m²/g catalyst

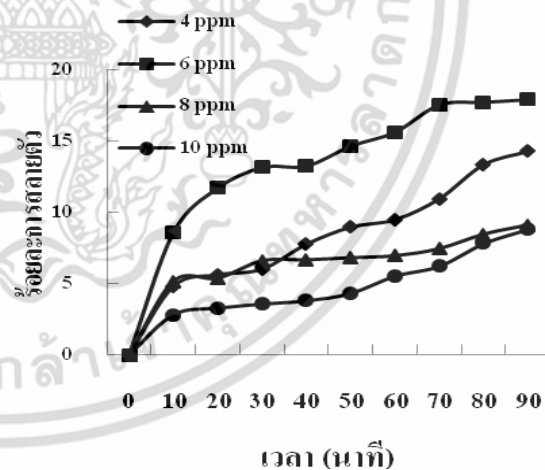


รูปที่ 2 สเปกตรัม XRD เปลือกหอยแครงบดที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 °C ภายใต้บรรยากาศของอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ปฏิริยาการแตกสลายเชิงแสงของสารละลายเมธิลินบลูโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

เมื่อนำสารละลายเมธิลินบลูที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 4, 6, 8 และ 10 ppm มาทำการทดสอบการสลายตัวเชิงแสงจากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่าสารละลายเมธิลินบลูที่มีความเข้มข้น 6 ppm มีค่าร้อยละการสลายตัวสูงสุดเมื่อใช้เวลาในการสลายตัว 90 นาที แต่ถ้าเพิ่มเวลาในการสลายตัวเป็น 120 นาที มีโอกาสสูงที่ค่าร้อยละการสลายตัวของสารละลายเมธิลินบลูความเข้มข้น 4 และ 6 ppm จะมีค่าใกล้เคียงกัน จากรูปพบว่าร้อยละการสลายตัวจะแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของเมธิลินบลู และสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของเมธิลินบลูสูงขึ้น โมเลกุลเมธิลินบลูจำนวนมากจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งขัดขวางการดูดซับ OH⁻ ที่บริเวณแอคทีฟไซต์ (Active site) ซึ่ง OH⁻ จะเข้าไปจับกับ h⁺_{VB} กลายเป็น OH[•] ดังนั้นการเกิดอนุมูลอิสระ OH[•] จะลดลง ในขณะที่เดียวกันการดูดซับออกซิเจนบนพื้นผิวของแคลเซียมออกไซด์จะถูกขัดขวางมีผลทำให้เกิด O₂⁻ ลดลงเป็นผลทำให้ค่าร้อยละการสลายตัวของเมธิลินบลูลดลงไปด้วย

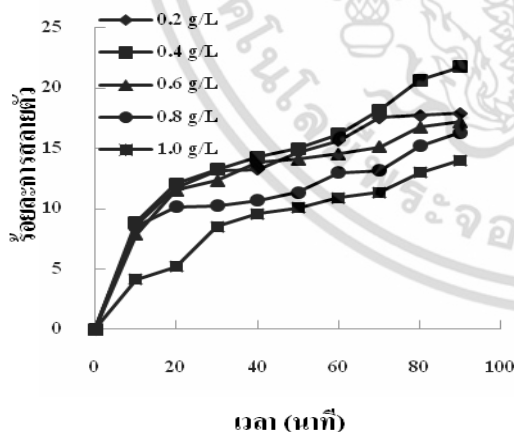


รูปที่ 3 ค่าร้อยละการสลายตัวของสารละลายเมธิลินบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ เทียบกับเวลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO 0.2 g/L และหลอดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 14 W

ตารางที่ 1 ผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีอยู่ในอนุภาคเปลือกหอยบดที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 650 °C ภายใต้บรรยากาศของอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค XRF

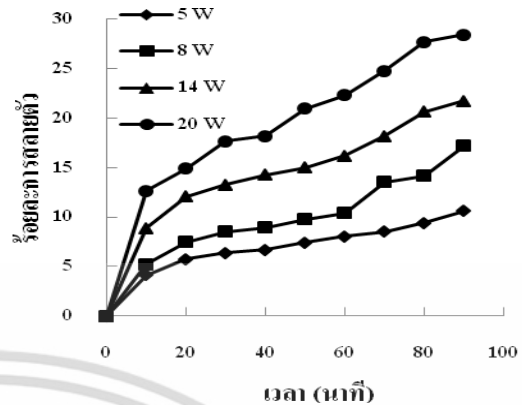
Element	Concentration (%)
Ca	69.2
Fe	0.59
Si	0.52
Sr	0.41
P	0.11
K	0.08
Ti	0.06
S	0.06
Mn	0.04
W	0.04
Cl	0.03

จากการศึกษาความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ต่อการสลายตัวของสารละลายเมธิลีนบลู พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.4 g/L มีค่าร้อยละการสลายตัวสูงสุด และเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นค่าร้อยละการสลายตัวจะลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าร้อยละการสลายตัวของสารละลายเมธิลีนบลูเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันเทียบกับเวลา โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลูที่ 6 ppm และหลอดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 14 W

จากรูปที่ 4 ค่าร้อยละการสลายตัวจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ อธิบายได้ว่า

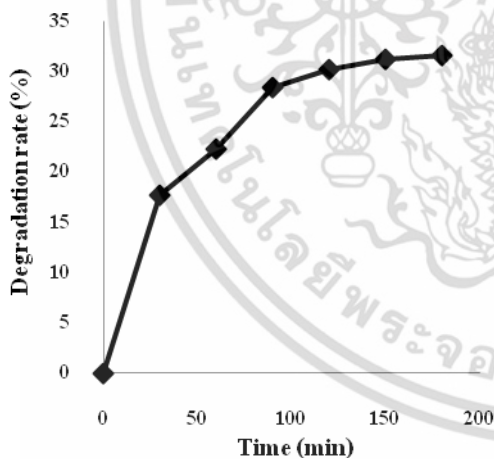


รูปที่ 5 ค่าร้อยละการสลายตัวของสารละลายเมธิลีนบลูเมื่อใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีกำลังวัตต์ต่างกัน โดยใช้ CaO 0.4 g/L และใช้สารละลายความเข้มข้น 6 ppm

เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไปทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลงซึ่งอาจเกิดจากโฟตอนถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งไม่ดีพอ ทำให้ค่าร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูลดลงตามไปด้วย สำหรับผลการศึกษาค่าของกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิดแสงในการสลายตัวของสารละลายเมธิลีนบลูร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ พบว่าแหล่งกำเนิดแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 20 W ได้ค่าร้อยละการสลายตัวสูงสุด ดังรูปที่ 5 ซึ่งค่าร้อยละการสลายตัวจะแปรผันตรงกับแหล่งกำเนิดแสงเมื่อใช้หลอด ฟลูออเรสเซนต์ที่มีกำลังวัตต์สูงขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่ออนุภาคแคลเซียมออกไซด์ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Eg) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคแคลเซียมออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนที่อยู่จากวาเลนซ์แบนด์ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ขึ้นเรียกว่า โฮล (Hole) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน (e) และโฮล (h+) ขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน โดยอิเล็กตรอนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารละลายเมธิลีนบลูทำให้เกิดการลดของออกซิเดชันสเตตลง ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของสารละลายเมธิลีนบลูลดลงได้ และเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังวัตต์สูงขึ้นความเข้มและความถี่ของแสงก็จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น ร้อยละการสลายตัวจึงสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ค่าความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง 5, 8, 14 และ 20W คือ 235, 440, 620, 1,200 ลูเมน ตามลำดับ ในส่วนของการนำตัวแปรที่ทำให้ค่าการสลายตัวเชิงแสงของสารละลายเมธิลีนบลูสูงสุดในแต่ละภาวะมาศึกษาค่าร้อยละการสลายตัวเชิงแสงต่อเวลาพบว่าเวลา 180 นาที จะมีค่าร้อยละการสลายตัวสูงสุด ดังรูปที่ 6 โดยค่าร้อยละการสลายตัวจะแปรผันตรงกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า การได้รับแสงนานขึ้นทำให้แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายเมธิลีนบลูได้ดีขึ้น ค่าร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาที่ได้รับแสงมากกว่า 150 นาที แนวโน้มค่าร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูจะค่อย ๆ คงที่ เนื่องจากถึงจุดสมดุลของการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 6 ค่าร้อยละการสลายตัวเชิงแสงของสารละลายเมธิลีนบลูที่เวลาต่างๆ โดยใช้เมธิลีนบลูความเข้มข้น 6 ppm ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO 0.4 g/L และหลอดฟลูออเรสเซนต์กำลัง 20 W

4. สรุปผลการทดลอง

จากการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมออกไซด์จากการแคลไซน์เปลือกหอยแครงด้วยเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XRF พบว่า เปลือกหอยแครงที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณของธาตุแคลเซียมอยู่ร้อยละ 69.2 และเมื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลซิสของแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สารละลายเมธิลีนบลูเป็นแบบจำลองพบว่า การใช้สารละลายเมธิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 6 ppm จะมีร้อยละการสลายตัวดีและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีร้อยละการสลายตัวดีที่สุดคือ 0.4 g/L ซึ่งถ้าใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีกำลังวัตต์สูงจะช่วยเพิ่มร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูให้สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูจะแปรผันตรงกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาที่ได้รับแสงมากกว่า 150 นาที แนวโน้มร้อยละการสลายตัวของเมธิลีนบลูจะค่อย ๆ คงที่ เนื่องจากถึงจุดสมดุลของการทำปฏิกิริยา และพบว่าการใช้เวลาในการสลายตัวเชิงแสงที่เวลา 180 นาที ให้ค่าร้อยละการสลายตัวเชิงแสงสูงสุดเท่ากับ 31.57

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. G. Boer, L. Obici, C. G. Marques de Souza and R. M. Peralta, "Decolorization of synthetic dyes by solid state cultures of *lentiniula (lentinus) edodes* producing manganese peroxidase as the main ligninolytic enzyme," *Bioresource Technol.*, Vol.94, pp. 107–112, 2004.
- [2] O. Yesilada', D. Asma and Seval Cing, "Decolorization of textile dyes by fungal pellets," *Process Biochemistry*, Vol.38, pp.933-938, 2003.
- [3] Q. Yang, M. Yang, K. Pritsch, A. Yediler, A. Hagn, M. Schloter and A. Kettrup, "Decolorization of synthetic dyes and production of manganese-dependent peroxidase by new fungal isolates," *Biotechnology Letter*, Vol.25, pp.709-713, 2003.

- [4] R. K. Sani and U. C. Banerjee, "Decolorization of triphenylmethane dyes and textile and dye stuff effluent by *Kurthia* sp.," *Enzyme and Microbial Technology*, Vol.24, pp.433-437, 1999.
- [5] H. Czili and A. Horva th, "Photodegradation of chloroacetic acids over bare and silver-deposited TiO₂: Identification of species attacking model compounds, a mechanistic approach," *Applied Catalysis B: Environmental*. Vol.89, pp.342-348, 2009.
- [6] J. Yun, D. Jin, Y.-S. Lee and H.-I. Kim, "Photocatalytic treatment of acidic waste water by electrospun composite nanofibers of pH-sensitive hydrogel and TiO₂," *Materials Letters*, Vol.64, pp.2431-2434, 2010.
- [7] M. Nikazar, K. Gholivand and K. Mahanpoor, "Photocatalytic degradation of azo dye Acid Red 114 in water with TiO₂ supported on clinoptilolite as a catalyst," *Desalination*, Vol.219, pp.293-300, 2008.
- [8] W.-T. Tsai, M.-K. Leeb, T.-Y. Suc and Y.-M. Changa, "Photodegradation of bisphenol-A in a batch TiO₂ suspension reactor." *Journal of Hazardous Materials*, Vol.168, pp.269-275, 2009.
- [9] C. Adan, J. Carbajo, A. Bahamonde and A. Martinez-Arias, "Phenol photodegradation with oxygen and hydrogen peroxide over TiO₂ and Fe-doped TiO₂," *Catalysis Today*, Vol.143, pp.247-252, 2008.
- [10] Z.-f. JIA, F.-m. WANG and F. XIN, "Hydrothermal synthesis of monodisperse Zn_xCd_{1-x}S spheres and their photocatalytic properties," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 1767-1772, 2011.
- [11] H.-b. FANG, M.-x. XU, L. GE and Z.-y. HE, "Synthesis and photocatalytic properties of InVO₄ sol containing nanocrystals by mild hydrothermal processing," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, pp.s373-s376, 2006.
- [12] Y.-L. Min, K. Zhang, Y.-C. Chen and Y.-G. Zhang, "Enhanced photocatalytic performance of Bi₂WO₆ by graphene supporter as charge transfer channel," *Separation and Purification Technology*, Vol.86, pp.98-105, 2012.
- [13] M. C. Barros, P. M. Bello, M. Bao and J. J. Torrado, "From waste to commodity: transforming shells into high purity calcium carbonate," *Cleaner Production*, Vol.17, pp.400-407, 2007.
- [14] F. Garc-Labiano, J. Adanez, A. Abad, L. F. deDiego and P. Gayan, "Calcination of calcium-based sorbents at pressure in a broad range of CO₂ concentrations," *Chemical Engineering Science*, Vol.57, pp.2381-2393, 2002.
- [15] M. Sun, D. Li, Y. Chen, W. Chen, W. Li, Y. He and X. Fu, "Synthesis and Photocatalytic Activity of Calcium Antimony Oxide Hydroxide for the Degradation of Dyes in Water," *J. Phys. Chem.*, Vol.13, pp.13825-13831, 2009.
- [16] S.K. Medeiros, E.L. Albuquerque, F.F. Maia Jr, E.W.S. Caetano, G.A. Farias, V.N. Freireb, B.S. Cavada, M.L. Pessatid and T.L.P. Pessati, "Structural and optical properties of CaO," *Microelectronics Journal*, Vol.36, pp.1058-1061, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้