

# ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

Activated Carbon from *Tamarind* Wood Supported TiO<sub>2</sub>

for Methylene Blue Dye Removal in Wastewater by Photocatalytic Process

ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล<sup>1\*</sup> นาถลดา คำซ้ายอาจ<sup>2</sup> และ ญาณิศา ตันติपालกุล<sup>2</sup>

Theeradit Phothitontimongkol<sup>1\*</sup>, Natlada Kumaiard<sup>2</sup> and Yanisa Tantipalukul<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

<sup>2</sup> สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

<sup>1</sup> Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

<sup>2</sup> Industrial Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

Received : 11 March 2016

Accepted : 15 September 2016

Published online : 20 September 2016

## บทคัดย่อ

ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามสามารถรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียได้โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นำถ่านจากไม้มะขามกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบค่าไอโอดีน และค่าเมทิลีนบลู ตามลำดับ พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านจากไม้มะขาม ค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลูเป็น 700 และ 120 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ศึกษาคุณสมบัติการเผา และจำนวนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส จำนวนการเคลือบ 10 ชั้น ของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสตามตำแหน่งมุม 2-θ เท่ากับ 25.32 37.80 48.05 และ 55.06 องศา ตามลำดับ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียเท่ากับ 97.76 โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ ไม้มะขาม สีย้อมเมทิลีนบลู ไทเทเนียมไดออกไซด์ การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

\*Corresponding author. E-mail : QDUKDIKQ@gmail.com

### Abstract

The activated carbon from *Tamarind Wood* supported  $\text{TiO}_2$  for the application of Methylene Blue (MB) removed in wastewater by photocatalytic process. The carbon from *Tamarind Wood* was activated by the chemical activation with  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . The characterization of the activated carbon from *Tamarind Wood* were determined by Scanning Electron Microscope (SEM) Iodine number and MB test, respectively. The results were found that the activated carbon from *Tamarind Wood* provided higher surface area and more porosity when compared to that of the carbon from *Tamarind Wood*. Iodine number and MB test were 700 and 120 mg/g, respectively. The studies of calcined temperature and the number of  $\text{TiO}_2$  coating cycle on the activated carbon from *Tamarind Wood* were characterized by X-ray diffraction (XRD) and SEM. The calcined temperature at  $500^\circ\text{C}$  with 10 coating cycles of  $\text{TiO}_2$  generated the catalyst of anatase  $\text{TiO}_2$  on the activated carbon from *Tamarind Wood*. The XRD patterns of anatase  $\text{TiO}_2$  catalyst showed the presence of peaks at  $2\theta$  of  $25.32^\circ$   $37.80^\circ$   $48.05^\circ$  and  $55.06^\circ$ , respectively. The experiment of MB removal in wastewater of the  $\text{TiO}_2$  coated on the activated carbon from *Tamarind Wood* was performed using photocatalytic process. It was found that the efficiency percentage of MB removal in wastewater was 97.76 with the  $\text{TiO}_2$  coated on the activated carbon from *Tamarind Wood* via photocatalytic process.

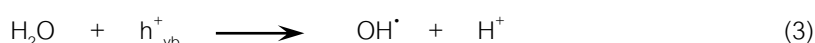
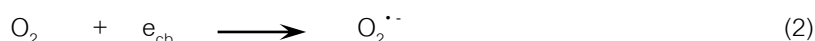
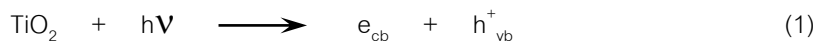
**Keywords:** activated carbon, tamarind Wood, methylene blue dye, titanium dioxide, photocatalytic

### บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มของประเทศไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทต่อมูลค่าเพิ่มของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ และยังคงขับเคลื่อนไปตามแผนแม่บทการพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทย พ.ศ. 2555 – 2559 (Thailand Textile Institute, 2011) ซึ่งมีแนวโน้มการขยายตัวมากขึ้น ทั้งในส่วนภาคการผลิตและการส่งออก โดยมีตลาดในกลุ่มอาเซียนรองรับเป็นส่วนใหญ่ (Office of Industrial Economics, 2014) กระบวนการผลิตมีการใช้สารให้สี หรือเรียกว่า สีย้อม (dye) ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะมลพิษทางแหล่งน้ำ ถ้ามีปริมาณของสีย้อมมากเกินไปจะทำให้เกิดทัศนียภาพไม่สวยงาม รวมถึงเกิดการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO) ลดต่ำลง ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตไม่สามารถดำรงชีวิตได้ในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อน (Chooaksorn, 2012) อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ และระบบห่วงโซ่อาหารในสิ่งแวดล้อม (Farida *et al.*, 2013)

น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากอุตสาหกรรมดังกล่าว จำเป็นต้องได้รับการกำจัดและควบคุมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม การกำจัดน้ำเสียจากสีย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) การบำบัดด้วยโอโซน (ozone treatment) เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (membrane technology) การดูดซับ (adsorption) และกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalytic process) เป็นต้น (Foo & Hameed, 2010;

Chooaksorn, 2012) ซึ่งวิธีการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยการใช้สารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ได้รับความสนใจอย่างมาก (Chih & Hung, 2009; Foo & Hameed, 2010; Hoang *et al.*, 2012; Wuyi *et al.*, 2012) เนื่องจาก  $\text{TiO}_2$  มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จนอิเล็กตรอนมีพลังงานไม่น้อยกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป (band gap) ประมาณ 3.0 - 3.2 eV ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radicals,  $\text{OH}^\cdot$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals,  $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) ดังสมการเคมี (1) – (3) (Sangchay, 2012)



$\text{OH}^\cdot$  และ  $\text{O}_2^{\cdot-}$  สามารถย่อยสลาย (degradation) สารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย ได้แก่ สีย้อม (dyes) ฟีนอล (phenol) ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสฟอรัส (organophosphorus pesticides) และ โทลูอีน (toluene) (Foo & Hameed, 2010; Omri *et al.*, 2014; Zhaohong *et al.*, 2014) ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) นอกจากนี้  $\text{TiO}_2$  สามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรสูง (Chih & Hung, 2009; Hoang *et al.*, 2012; Meng-xiong *et al.*, 2013; Ragupathy *et al.*, 2015) แต่เนื่องจาก  $\text{TiO}_2$  มีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโน ทำให้มีพื้นที่ผิว active site สูง ซึ่งขณะเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะรวมตัวเป็นก้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงลดลงเนื่องจาก พื้นที่ผิวในการสัมผัสแสงของ  $\text{TiO}_2$  น้อยลง รวมถึงการแยกอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ออกจากสารแขวนลอย (suspension) หลังการบำบัดในน้ำเสียเพื่อนำ  $\text{TiO}_2$  กลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากเพราะ อนุภาค  $\text{TiO}_2$  มีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการกระจายตัวสูงในน้ำเสีย (Bifen *et al.*, 2011; Tarek *et al.*, 2012; Hao *et al.*, 2014; Omri *et al.*, 2014)

ปัญหาของการใช้  $\text{TiO}_2$  ดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารรองรับของแข็ง (solid support) เช่น ซิลิกา (silica) ซีโอไลต์ (zeolite) อลูมินา (alumina) คาร์บอน (carbon) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) โดยนำ  $\text{TiO}_2$  เคลือบบนสารรองรับของแข็ง ซึ่งสารรองรับของแข็งที่ได้รับความสนใจ คือ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากพื้นที่ผิวสูงทำให้  $\text{TiO}_2$  สามารถเคลือบลงบนถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น (Bifen *et al.*, 2011; Meltem & Sadiye, 2012; Omri *et al.*, 2014; Ragupathy *et al.*, 2015) นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่ใช้อย่างสามารถเตรียมได้เองจากวัสดุทางธรรมชาติ เช่น ไม้มะกอก (Ould-Idriss *et al.*, 2011) ซึ่งได้มาจากไม้สน (Meltem & Sadiye, 2012) ไม้เนื้อแข็ง (Emine *et al.*, 2013) ลำต้นอินทผลัม (Hadoun *et al.*, 2013) เปลือกแอลมอนต์ (Omri *et al.*, 2014) และเปลือกมะม่วงหิมพานต์ (Ragupathy *et al.*, 2015) เป็นต้น นอกจากนี้ไม้มะขามจัดเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นไม้เนื้อแข็ง มีโครงสร้างทางเคมีที่ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว ขนาดและโครงสร้างรูพรุนตามที่ต้องการได้ (Emine *et al.*, 2013) และไม้มะขามยังสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็นสารรองรับ  $\text{TiO}_2$  เพื่อกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมาเคลือบ  $\text{TiO}_2$  ศึกษาการแปรผันคุณสมบัติในการเผา และจำนวนชั้นการเคลือบ  $\text{TiO}_2$

ลงบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  มาใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาจากแสง

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1 วัสดุ และสารเคมี

ถ่านไม้มะขาม สารเคมีชนิดกรดดิโครมาท์ ได้แก่ กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) เข้มข้นร้อยละ 85 ไทเทเนียมเตตระไฮไดรอกไซด์ ( $\text{Ti}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{KOH}$ ) และสารเคมีชนิดกรดห้องปฏิบัติการ ได้แก่ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เข้มข้นร้อยละ 65 โพรพานอล ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ) และสีย้อมเมทิลีนบลู

### 2 เครื่องมือ

เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ (UV/VIS) รุ่น UV/VIS 916 ยี่ห้อ GBC Scientific Equipment เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker AXS Model เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น S-4700 ยี่ห้อ Hitachi และตู้เผาอุณหภูมิสูง รุ่น AAF1100 ยี่ห้อ Carbolite

### 3 วิธีวิจัย

#### 3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

นำถ่านไม้มะขามไปล้างด้วยน้ำสะอาด อบไล่ไอน้ำและความชื้นที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เย็นลงและเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จากนั้นนำมาแช่ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 ในอัตราส่วนการแช่ถ่านไม้มะขามต่อกรดฟอสฟอริก 1:3.5 โดยมวล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่ 105–110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นลงในโถดูดความชื้น พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ทดสอบค่าไอโอดีน (Iodine number) และทดสอบค่าเมทิลีนบลู

#### 3.2 ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการเผาในการสร้างผลึกอนาเทส และจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ดังต่อไปนี้

##### อุณหภูมิการเผาในการสร้างผลึกอนาเทส

ซึ่งถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม และนำ  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล เทลงในภาชนะที่มีถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ซึ่งไว้ จนปริมาตรของ  $\text{TiO}_2$  เต็มพอดีกับถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 100–105 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นเท  $\text{TiO}_2$  ลงอีกครั้งโดยทำการทดลองเหมือนเดิมจนครบ 20 ครั้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น และเก็บใส่ภาชนะที่บดแสงหรือขวดแก้วสีชา พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD และเครื่อง SEM

##### จำนวนการเคลือบ $\text{TiO}_2$ บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  เหมือนกับการศึกษาอุณหภูมิการสร้างผลึกอนาเทส แต่แปรผันจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็น 1 5 10 15 และ 20 ครั้ง ตามลำดับ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น และเก็บใส่ภาชนะที่บดแสงหรือขวดแก้วสีชา พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD และเครื่อง SEM

ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่จำนวนการเคลือบต่างๆ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยซึ่งถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  ที่แปรผันจำนวนการเคลือบต่าง ๆ จำนวน 0.40xx กรัม ปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พร้อมฉายแสงจากหลอดไฟยูวี-ซี 10 วัตต์ จำนวน 3 หลอด (germicidal lamp) และปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ใช้สกัดครั้งละ 5 มิลลิลิตร ทุกๆ 3 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที จนครบ 12 ชั่วโมง ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ตรวจวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยเครื่อง UVVIS และคำนวณหาค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด (% removal) ดังสมการ (1)

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้น

$C_t$  = ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลือในแต่ละช่วงเวลา

### 3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยระบบกะ (batch system)

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู และนำไปใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย ดังการทดลองต่อไปนี้

#### ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

ซึ่งถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 0.40xx กรัม เติลงในบีกเกอร์ปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็น 1 3 5 7 9 และ 11 ตามลำดับ ด้วยสารละลายกรดไนตริก และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พร้อมฉายแสงจากหลอดไฟยูวี-ซี 10 วัตต์ จำนวน 3 หลอด และปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ใช้สกัดครั้งละ 5 มิลลิลิตร ทุกๆ 3 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที จนครบ 12 ชั่วโมง ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ตรวจวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยเครื่อง UVVIS และคำนวณหาค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด (% removal)

#### สีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  มาซึ่งโดยแปรผันจำนวนเป็น 0.20xx 0.40xx 2.00xx และ 4.00xx กรัม ปิเปตน้ำเสียที่มีสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พร้อมฉายแสงจากหลอดไฟยูวี-ซี 10 วัตต์ จำนวน 3 หลอด และปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ใช้สกัด 5 มิลลิลิตร นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4,500 รอบต่อนาที จนครบ 12 ชั่วโมง ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ตรวจวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยเครื่อง UVVIS และคำนวณหาค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด (% removal)

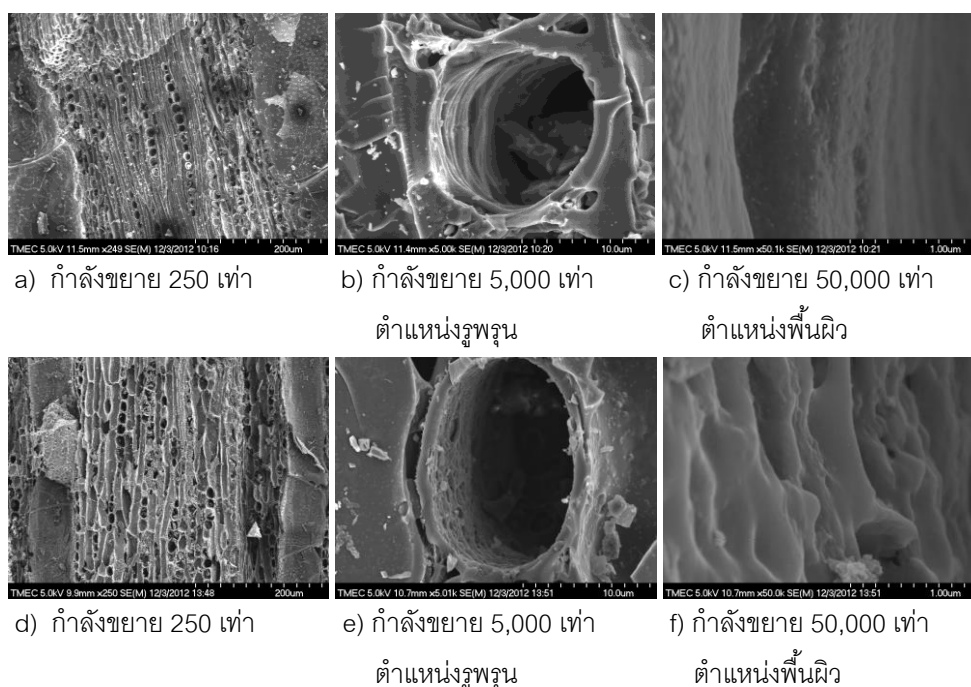
## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ทดสอบค่าไอโอดีน และค่าเมทิลีนบลูตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของถ่านกัมมันต์ (มอก.900-2547) ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 1.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยเครื่อง SEM

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านไม้มะขาม ภาพที่ 1a-c ที่กำลังขยาย 250 5,000 และ 50,000 เท่า ตามลำดับ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่กำลังขยายเท่ากัน ดังภาพที่ 1d-f จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM สรุปได้ว่าสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามได้ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านไม้มะขาม (a-c) และถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (d-f) ที่กำลังขยาย 250 5,000 และ 50,000 เท่า

#### 1.2 ผลการทดสอบค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลู

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลูของถ่านไม้มะขามมีค่าเท่ากับ 182 และ 20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 700 และ 120 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม แสดงว่า พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ซึ่งผลการทดสอบค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลู มีความสอดคล้องกับผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM อย่างชัดเจน นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2547) จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM การทดสอบค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลูยืนยันได้ว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามประสบผลสำเร็จอย่างมีประสิทธิภาพ



ตารางที่ 1 ผลค่าไอโอดีนและค่าเมทิลีนบลู

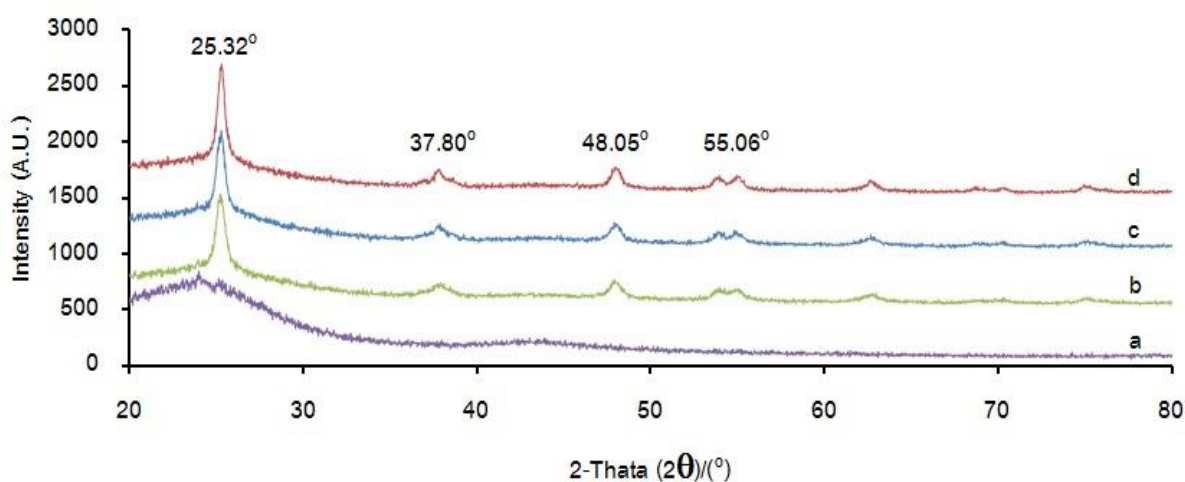
ตัวดูดซับ	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานมอก. (900-2547)	ไม่น้อยกว่า 600	-
ถ่านไม้มะขาม	182	20
ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม	700	120

## 2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบด้วย TiO<sub>2</sub>

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้เคลือบ TiO<sub>2</sub> โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการเผาในการสร้างผลึกอนาเทส และจำนวนการเคลือบ TiO<sub>2</sub> พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ตามลำดับ ได้ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ดังนี้

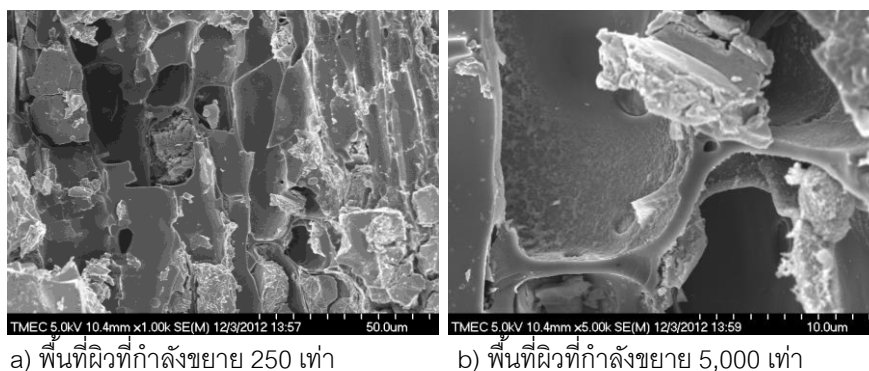
### 2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิการเผาในการสร้างผลึกอนาเทส

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบด้วย TiO<sub>2</sub> จำนวน 20 ชั้น เผาที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ไม่เคลือบ TiO<sub>2</sub> (ภาพที่ 2a) มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับ XRD pattern ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ TiO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2b-d ตามลำดับ ซึ่ง XRD pattern แสดงให้เห็นว่ามีการสร้างผลึก TiO<sub>2</sub> แบบผลึกอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ TiO<sub>2</sub> ของทั้ง 3 อุณหภูมิ เนื่องจากมีพีคที่ตำแหน่งมุม 2θ ที่ 25.32 องศา (Chi-Hsin *et al.*, 2008) นอกจากนี้ XRD pattern ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ TiO<sub>2</sub> (ภาพที่ 2b-d) แสดงให้เห็นว่าเกิดผลึก TiO<sub>2</sub> แบบอนาเทสเท่านั้นบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามตามตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 25.32 37.80 48.05 และ 55.06 องศา (Kumton *et al.*, 2011; Meltem & Sadiye, 2012; Omri *et al.*, 2014) ซึ่งผลึกอนาเทสนี้จะเกิดที่ผิวหน้าของโครงสร้างผลึก TiO<sub>2</sub> ทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนผิวหน้าได้ง่าย (Takashi & Masahito, 2006)

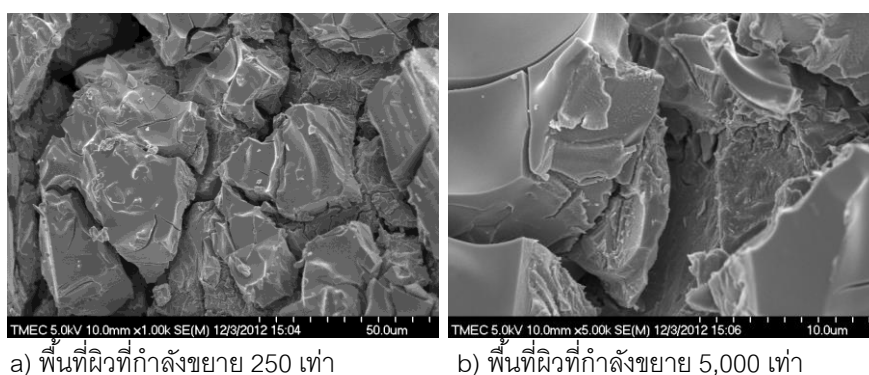


ภาพที่ 2 XRD pattern ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามไม่เคลือบ TiO<sub>2</sub> (a) ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ TiO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส (b-d) ตามลำดับ

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD ไม่สามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงอุณหภูมิในการสร้างผลึกอนาเทสของ  $\text{TiO}_2$  ดังนั้นจึงพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า ลักษณะการเกิดผลึกอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอและชัดเจนของผลึกอนาเทสที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเกิดผลึกอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามบางส่วนไม่มีการยึดจับของผลึกอนาเทส ทำให้ อาจส่งผลกระทบต่อการศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการบำบัดสีย้อมได้ ดังนั้นสรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างผลึกอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามคือ 500 องศาเซลเซียส (Sutha & Kurnruang, 2010)

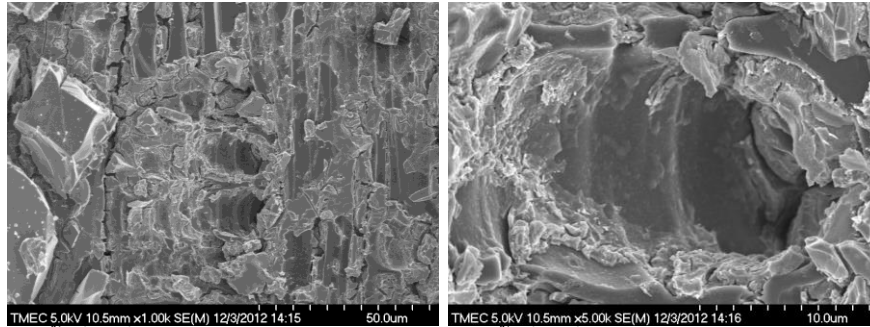


**ภาพที่ 3** ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  20 ชั้น ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



**ภาพที่ 4** ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  20 ชั้น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส





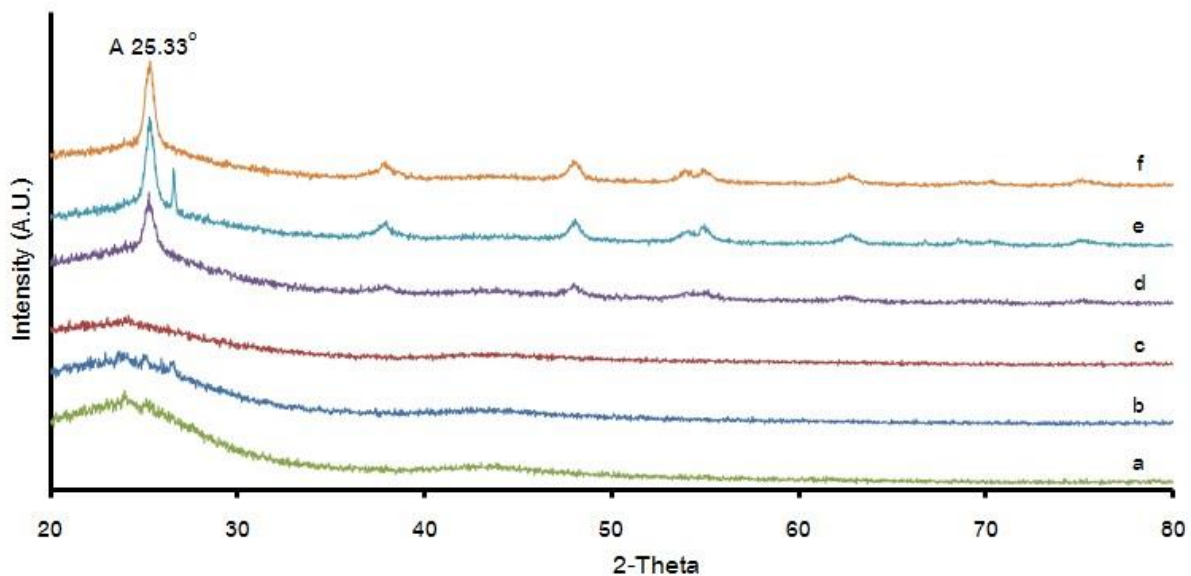
a) พื้นผิวที่ก้ำกัลงขยาย 250 เท่า

b) พื้นผิวที่ก้ำกัลงขยาย 5,000 เท่า

**ภาพที่ 5** ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  20 ชั้น ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

## 2.2 ผลการศึกษาจำนวนการเคลือบ $\text{TiO}_2$ บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

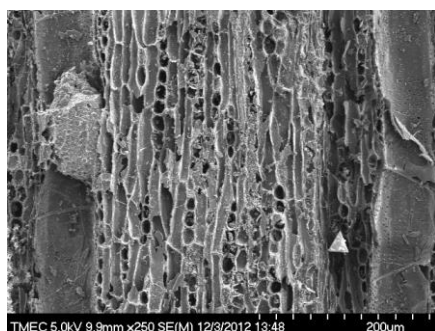
เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างผลึกอนาเทสของ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นแปรผันจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  เป็น 1 5 10 15 และ 20 ชั้น ตามลำดับ พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า XRD pattern ดังภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าผลการเคลือบจำนวน  $\text{TiO}_2$  ที่จำนวนชั้นต่างๆ มีผลต่อปริมาณการสร้างผลึกอนาเทสบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม พบว่า จำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดปริมาณผลึกอนาเทสสูงขึ้น สังเกตได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังภาพที่ 6a-c เป็น 0 1 และ 5 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งไม่พบผลึกอนาเทส ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $25.33^\circ$  เนื่องจากจำนวนการเคลือบสารละลาย  $\text{TiO}_2$  ไม่มากพอ ทำให้ปริมาณผลึกอนาเทส มีปริมาณไม่มากพอสำหรับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวผลึกอนาเทส (Kumton *et al.*, 2011) ส่วนผลจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  เป็น 10 15 และ 20 ชั้น ตามลำดับ พบว่า มีการพบผลึกอนาเทสอย่างชัดเจน ที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $25.33^\circ$  (ภาพที่ 6 d-f)



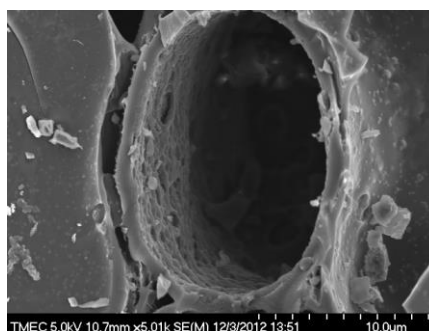
**ภาพที่ 6** รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ไม่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  (a) และเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้น (b) 5 ชั้น (c) 10 ชั้น (d) 15 ชั้น (e) และ 20 ชั้น (f) ตามลำดับ

จากเครื่อง XRD เมื่อพิจารณาค่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $25.33^\circ$  จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  10 15 และ 20 ชั้น (ภาพที่ 6 d-f) ตามลำดับ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 946 1,072 และ 1,066 ตามลำดับ แสดงว่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในการรองรับ  $\text{TiO}_2$  ในการเคลือบมีการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  และเกิดการสร้างผลึกอนาเทสเต็มพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

สำหรับผลพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ดังภาพที่ 7-12 ที่กำลังขยาย 250 และ 5,000 เท่า สังเกตได้ว่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 0 1 และ 5 ชั้น ตามลำดับ (ภาพที่ 7-9) เกิดการยึดจับของผลึกอนาเทสของ  $\text{TiO}_2$  บนพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 10-12 ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 15 และ 20 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งเกิดการยึดจับของผลึกอนาเทส กระจายตัวเต็มพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ซึ่งผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD และเครื่อง SEM มีความสอดคล้องกันและสรุปได้ว่าจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 10 ชั้น

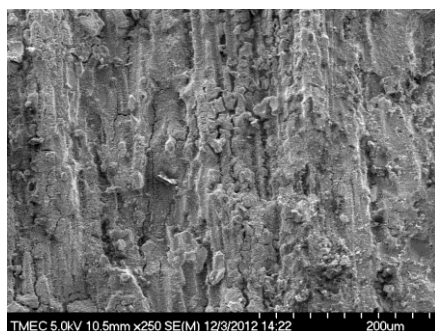


a) พื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า

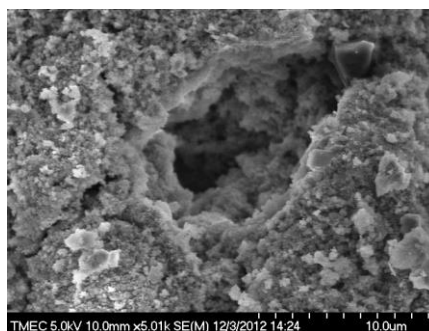


b) พื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ไม่เคลือบ  $\text{TiO}_2$

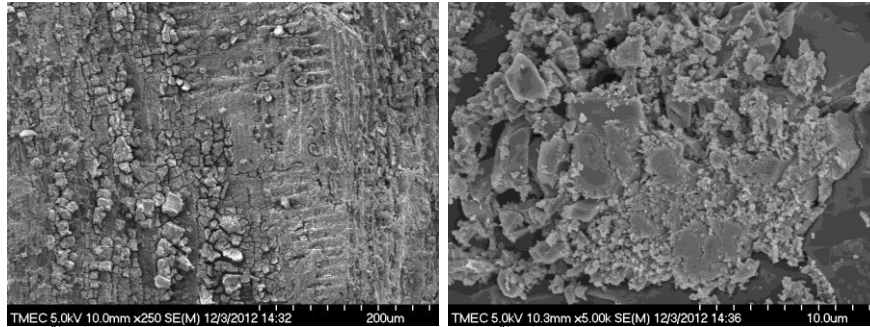


a) พื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า



b) พื้นที่ผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

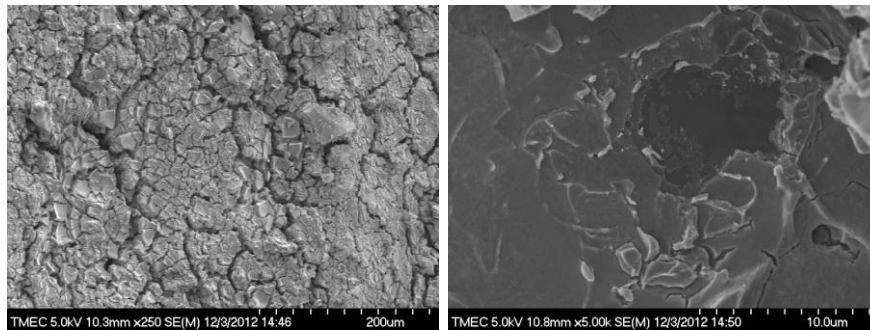
ภาพที่ 8 ลักษณะพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  1 ชั้น



a) พื้นผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า

b) พื้นผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

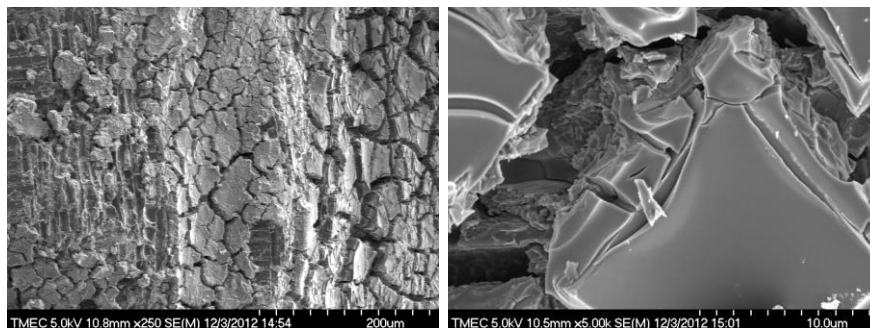
**ภาพที่ 9** ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  5 ชั้น



a) พื้นผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า

b) พื้นผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

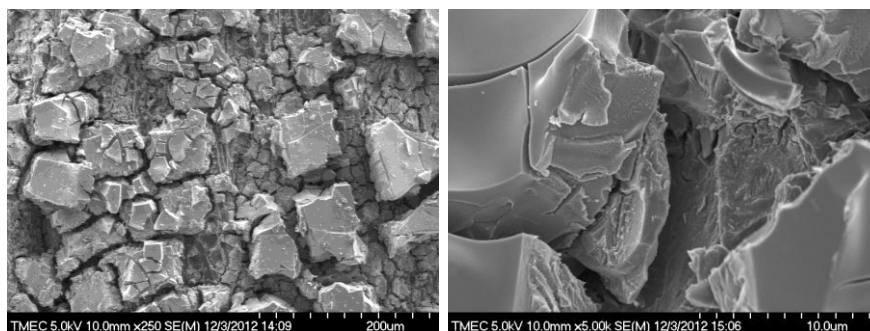
**ภาพที่ 10** ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  10 ชั้น



a) พื้นผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า

b) พื้นผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

**ภาพที่ 11** ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  15 ชั้น



a) พื้นผิวที่กำลังขยาย 250 เท่า

b) พื้นผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

**ภาพที่ 12** ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  20 ชั้น

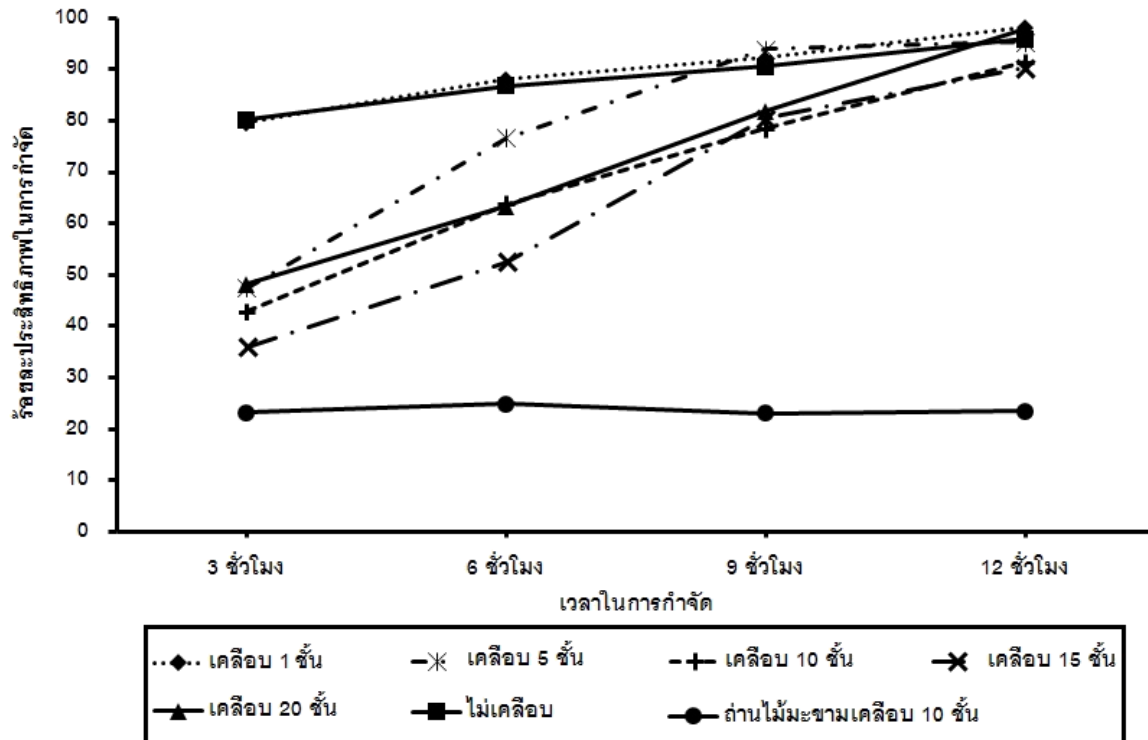


นอกจากนี้เมื่อนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 1 5 10 15 และ 20 ชั้นตามลำดับ มาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยระบบกะ โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำทุกๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 15 และ 20 ชั้น ตามลำดับ มีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัด เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังภาพที่ 13 เกิดจากกลไกการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเท่านั้น และมีความสอดคล้องกับผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ดังภาพที่ 10-12 ตามลำดับ เห็นได้ว่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  เต็มพื้นที่ผิวและรูพรุน (Chi-Hsin *et al.*, 2008)

ส่วนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบสารละลาย  $\text{TiO}_2$  5 ชั้น มีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 13 เนื่องจากพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณน้อย ทำให้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 5 ชั้น มีพื้นที่ผิวและรูพรุนเหลืออยู่มาก ซึ่งส่งผลให้เกิดกระบวนการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำ 2 กลไกร่วมกัน คือ กระบวนการดูดซับและกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ดังภาพที่ 9

สำหรับถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้น มีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ ดังภาพที่ 13 เนื่องจากพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณน้อยมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีมาก และมีความสอดคล้องกับผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง SEM ดังภาพที่ 7 ส่งผลให้เกิดกระบวนการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งสามารถยืนยันกระบวนการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้น ได้จากค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ไม่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  ที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 13 ซึ่งเกิดการกำจัดจากกระบวนการดูดซับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยการแปรผันจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเห็นได้ว่าจำนวนการเคลือบ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจำนวน 10 ชั้น มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน และสอดคล้องกับผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง XRD และเครื่อง SEM ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ผลร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำของถ่านจากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  10 ชั้น, ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามไม่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  และถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 5 10 15 และ 20 ชั้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อนำมาผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น เปรียบเทียบกับถ่านจากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  10 ชั้น พบว่า ร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 13 เนื่องจากพื้นที่ผิวและรูพรุนที่เพิ่มขึ้นของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ทำให้สามารถเคลือบ  $\text{TiO}_2$  ในปริมาณที่สูงขึ้นได้

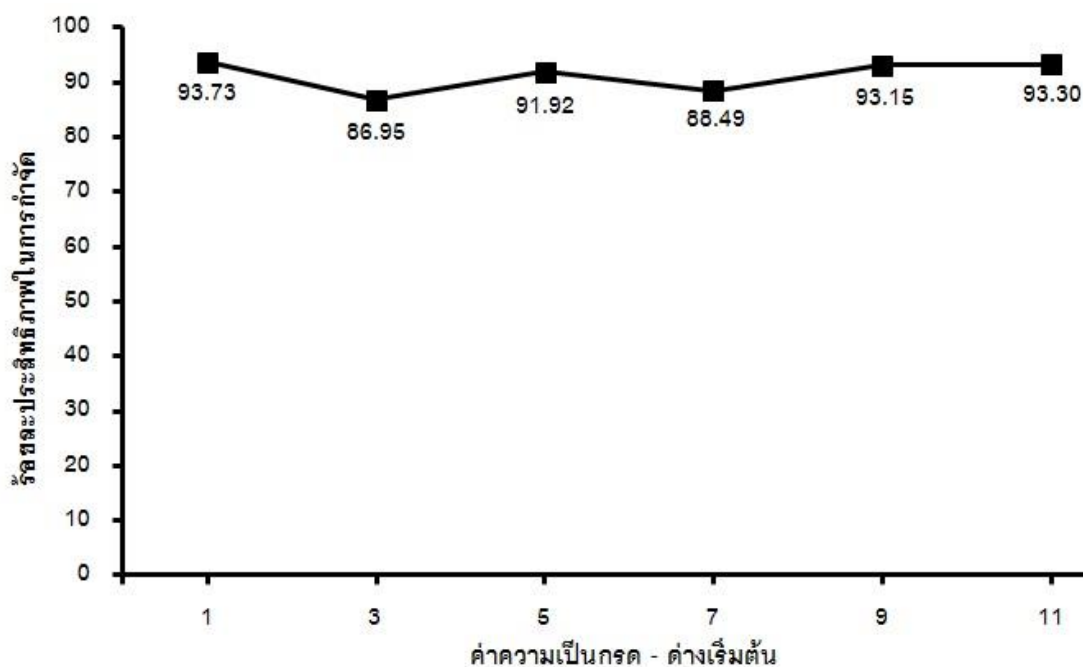
### 3. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยระบบกะ

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ และทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 1 3 5 7 9 และ 11 เวลาในการกำจัด 12 ชั่วโมง พบว่าค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำอยู่ในช่วง 86.95 ถึง 93.73 ดังภาพที่ 14 เห็นได้ว่าค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

ในน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากพื้นที่ผิวของ  $\text{TiO}_2$  เมื่อมีแสงมากระตุ้นทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซูเปอร์ออกไซด์ไอออน เรดิคัล ซูเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล และไฮโดรเจนเรดิคัลได้ทุกสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (Tianyong *et al.*, 2001; Chin-Chuan *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012) ทำให้สามารถใช้อยู่สลายโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูได้ ซึ่งกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  บนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามสำหรับใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำด้วยวิธีการย่อยสลายสามารถอธิบายได้ดังนี้

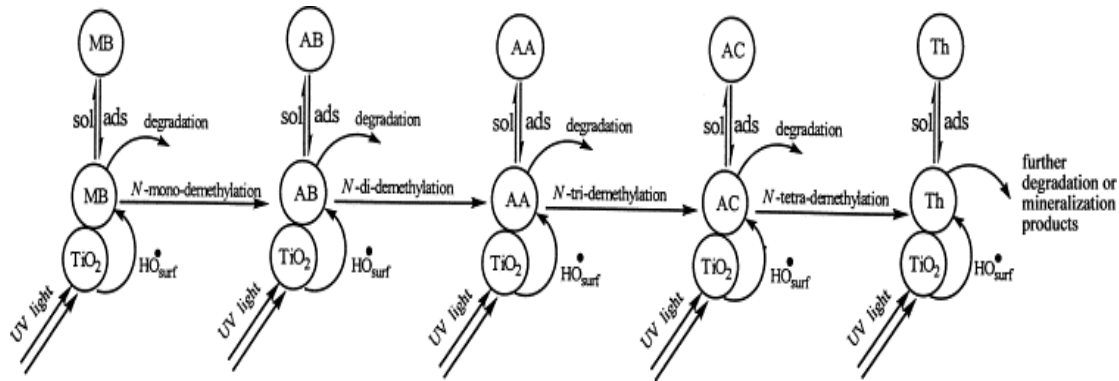


ภาพที่ 14 ผลร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเข้มข้นกรด-ด่าง เท่ากับ 1 3 5 7 9 และ 11 ตามลำดับ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้  $\text{TiO}_2$  ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสงภายใน  $\text{TiO}_2$  จะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันโดยมีแถบช่องว่างพลังงานชั้นอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง เมื่อ  $\text{TiO}_2$  ได้รับพลังงานแสงที่มากกว่าแถบช่องว่างพลังงานอิเล็กตรอนใน  $\text{TiO}_2$  จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชัน ทำให้เกิดเป็นโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งส่งผลให้เกิดการดึงอิเล็กตรอนจากออกซิเจนในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูและเกิดการแตกตัวของน้ำทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลไปดึงหมู่เมทิลของเมทิลีนบลูตรงตำแหน่งไนโตรเจน ครั้งที่ 1 เรียกว่า N-mono-demethylation ทำให้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Azure B (AB) เกิดปฏิกิริยาครั้งที่ 2 เรียกว่า N-di-demethylation คือ การดึงหมู่เมทิลของเมทิลีนบลูตรงตำแหน่งไนโตรเจน ทำให้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Azure A (AA) เกิดปฏิกิริยาดึงหมู่เมทิลของเมทิลีนบลูตรงตำแหน่งไนโตรเจนครั้งที่ 3 เรียกว่า N-tri-demethylation ทำให้สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ



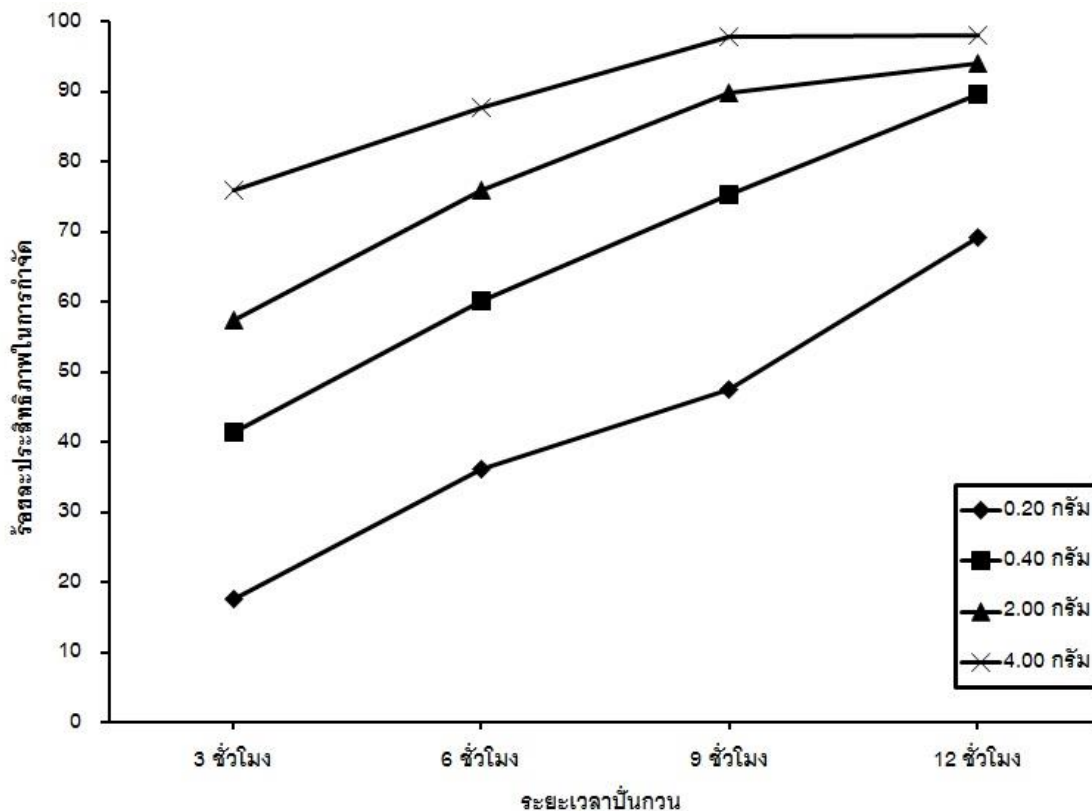
Azure C (AC) และเกิดปฏิกิริยาดังหมู่เมทิลของเมทิลีนบลูตรงตำแหน่งไนโตรเจนครั้งที่ 4 เรียกว่า N-tetra-demethylation ทำให้สารละลายสีของเมทิลีนบลูเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Th (thionine) ดังภาพที่ 15 เมื่อสารละลายเมทิลีนบลูถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ Th จะถูกย่อยสลายจนหมดอยู่ในรูปของกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Tianyong *et al.*, 2001)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยน N-demethylation ของเมทิลีนบลู และสมดุลของเมทิลีนบลู และชนิด N-demethylated ระหว่างสารละลายและผิวของ  $\text{TiO}_2$  ระหว่างกระบวนการลดสีของเมทิลีนบลู (ที่มา: Tianyong *et al.*, 2001)

### 3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมทิลีนบลูในน้ำเสีย

เมื่อทราบผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ ในสารละลายสีของเมทิลีนบลูที่สามารถใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ได้ในทุกช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่าง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ปริมาณ 0.20 0.40 2.00 และ 4.00 กรัม ตามลำดับ บั่นกวนในน้ำเสีย ที่มีสารละลายสีของเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีของเมทิลีนบลูในน้ำเสียได้ มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการบั่นกวนเพิ่มขึ้นจาก 3 ชั่วโมง เป็น 12 ชั่วโมง ตามลำดับ รวมถึงค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าสูงขึ้น ที่เวลาในการบั่นกวนเท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ดังภาพที่ 16



**ภาพที่ 16** ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ในน้ำเสีย โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น ที่ปริมาณต่างๆ

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 16) พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น จำนวน 4.00 กรัม เวลาในการบ่งกวน 9 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 97.76 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่เวลาในการบ่งกวน 12 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้นเท่ากัน ซึ่งมีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 98.01

### สรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามสามารถใช้เคลือบ  $\text{TiO}_2$  ได้ โดยอุณหภูมิในการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดผลึกอนาเทสที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จำนวนชั้นที่เคลือบเท่ากับ 10 ชั้น จากนั้นนำมาทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะได้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเป็น 91.56 เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้มะขามที่สภาวะการเคลือบแบบเดียวกันมีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 23.55 เวลาในการบ่งกวน 12 ชั่วโมง นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น สามารถใช้กำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูได้ในทุกสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่าง และสามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย ได้โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีค่า

ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 97.76 โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเคลือบ  $\text{TiO}_2$  จำนวน 10 ชั้น หนัก 4.00 กรัม เวลาในการป่นกวน 9 ชั่วโมง ซึ่งนับได้ว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็นสารรองรับ  $\text{TiO}_2$  ประสบความสำเร็จในการใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และเป็นทางเลือกหนึ่งในการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้วัสดุธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำให้เกิดประโยชน์มากขึ้นนอกจากนี้ยังไม่พบงานวิจัยที่ใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็นสารรองรับ  $\text{TiO}_2$  เพื่อใช้กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ทำให้สามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนางานวิจัยต่อไปได้

### เอกสารอ้างอิง

- Bifen G., Pow S.Y., Tuti M.L., Teik-Thye L. (2011). Adsorption-photocatalytic degradation of Acid Red 88 by supported  $\text{TiO}_2$ : Effect of activated carbon support and aqueous anions. *Chemical Engineering Journal*, 171, 1098–1107.
- Chih-Chung M., Hung-Shan W. (2009). Promoting effect of adding carbon black to  $\text{TiO}_2$  for aqueous photocatalytic degradation of methyl orange. *Journal of Chemical Engineering*, 155, 744–749.
- Chi-Hsin W., Jin-Fang S., Chu-Fu W., Chien-Te H. (2008). Synthesis and photocatalytic characterization of titania-supported bamboo charcoals by using sol-gel method. *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 326-332.
- Chin-Chuan L., Yung-Hsu H., Pao-Fan L., Chia-Hsin L., Chao-Lang K. (2006). Photodegradation treatment of azo dye wastewater by UV/ $\text{TiO}_2$  process. *Journal of Dyes and Pigment*, 68, 191-195.
- Chooaksorn W. (2012). Color removal technology in industrial wastewater. *Burapha Science Journal*, 17(1), 181–191. (in Thai)
- Emine Y., Mehmet S. T., Anthony B., Zeki A. (2013). Preparation of activated carbon from autohydrolysed mixed southern hardwood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 470-478.
- Farida K., Salim B., Tarek B., Mohamed T., Zoubida B. (2013). Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by  $\text{H}_3\text{PO}_4$  for the removal of Basic Red 46. *Journal of Cleaner Production*, 54, 296-306.
- Foo K.Y, Hameed B.H. (2010). Decontamination of textile wastewater via  $\text{TiO}_2$ /activated carbon composite materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159, 130–143.
- Hadoun H., Sadaoui Z., Souami N., Sahel D., Toumert I. (2013). Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by  $\text{H}_3\text{PO}_4$  chemical activation. *Applied Surface Science*, 280, 1-7.
- Hao M., Wei H., Xinxin X., Junli X., Xia Z. (2014).  $\text{TiO}_2$ -loaded activated carbon fiber: Hydrothermal synthesis, adsorption properties and photo catalytic activity under visible light irradiation. *Particuology*, 14, 38-43.

- Hoang A.L., Le T. L., Sungmin C., Jongsoo J. (2012). Photocatalytic degradation of methylene blue by a combination of TiO<sub>2</sub>-anatase and coconut shell activated carbon. *Journal of Powder Technology*, 225, 167–175.
- Kumton A., Kuanchertchoo N., Suphaphol P., Pavasant P., Lumbikanonda N. (2011). Characterization of sol-gel derived TiO<sub>2</sub> thin films. *The 12th Graduate Research Conference*. (pp. 1034-1041). Khon Kaen University. (in Thai)
- Li Y., Zhou X., Chen W., Li L., Zen M., Qin S., Sun S. (2012). Photodecolorization of Rhodamine B on tungsten-doped TiO<sub>2</sub>/activated carbon under visible-light irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 227–228, 25–33.
- Meltem A., Sadiye S. (2012). TiO<sub>2</sub>-activated carbon photocatalysts: Preparation, characterization and photocatalytic activities. *Chemical Engineering Journal*, 180, 354–363.
- Meng-xiong Z., You-ji L., Ming-yuan M., Wei C., Lei-yong L. (2013). Photocatalytic activity and kinetics for acid yellow degradation over surface composites of TiO<sub>2</sub>-coated activated carbon under different photocatalytic conditions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 1019–1027.
- Office of Industrial Economics. (2014). *The summary of economic circumstance industry A.D. 2014 and the tendency of A.D. 2015*. Ministry of Industry Thailand, Bangkok. (in Thai)
- Omri A., Lambert S.D., Geens J., Bennour F. Benzina M. (2014). Synthesis, surface characterization and photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> supported on almond shell activated carbon. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(9), 894-902.
- Ould-Idriss A., Stitou M., Cuerda-Correa E.M., Fernández-González C., Macías-García A., Alexandre-Franco M.F., Gómez-Serrano V. (2011). Preparation of activated carbons from olive-tree wood revisited. I. Chemical activation with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. *Fuel Processing Technology*, 92, 261-265.
- Ragupathy S., Raghu K., Prabu P. (2015). Synthesis and characterization of TiO<sub>2</sub> loaded cashew nut shell activated carbon and photocatalytic activity on BG and MB dyes under sunlight radiation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 138, 314–320.
- Sangchay W. (2012). Influence of temperature on crystallite size and phase content of TiO<sub>2</sub> powder by sol-gel method. *SKRU Academic Journal*, 5(1), 46–52. (in Thai)
- Sutha W., Kurnruang P. (2010). Treatment from textile industry wastewater on TiO<sub>2</sub> film coated rotor. *Senior Project of Environment Science Program*, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University. (in Thai)
- Takashi S., Masahito T. (2006). Enhancement of phage inactivation using photocatalytic titanium dioxide particles with different crystalline structures. *Journal of Biochemical Engineering*, 28, 303-308.

- Tarek S.J., Montaser Y.G., Nady A.F., Tarek A.A., Lars Ö. (2012). Enhancement of TiO<sub>2</sub> behavior on photocatalytic oxidation of MO dye using TiO<sub>2</sub>/AC under visible irradiation and sunlight radiation. *Separation and Purification Technology*, 98, 270-279.
- Thailand Textile Institute. (2011). *Thailand textile and clothes of industrial development road map A.D. 2010-2016*. Office of the Permanent Secretary, Bangkok. (in Thai)
- Tianyong Z., Toshiyuki O., Akio A., Hisao H., Jincai Z., Nick S. (2001). Photooxidative N-demethylation of methylene blue in aqueous TiO<sub>2</sub> dispersions UV irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 140, 163-172.
- Wuyi Z., Peng Z., Weian L. (2012). Anatase TiO<sub>2</sub> nanospindle/activated carbon (AC) composite photocatalysts with enhanced activity in removal of organic contaminant. *Journal of Photoenergy*, 1-7.
- Zhaohong Z., Fengyang Y., Lirong H., Jianaerguli J., Yuanyuan L., Lijun S., Ning Y., Dionysios D. D. (2014). Confirmation of hydroxyl radicals (<sup>•</sup>OH) generated in the presence of TiO<sub>2</sub> supported on AC under microwave irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 278, 152-157.