

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนสำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงที่มองเห็นได้



นายกษิเดช ประทักษ์นุกูล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis of nanoparticles for visible-light activated degradation of organic pollutants

Mr. Kasidet Prathaknukul

**A Report Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of
Bachelor of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2023**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การสังเคราะห์อนุภาคนาโนสำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงที่มองเห็นได้

โดย นายกษิเดช ประทักษ์นุกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

TEERAPORN

ประธานกรรมการ

(รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

จนวรรณ พินรัตน์

กรรมการ

(ผศ.ดร.จนวรรณ พินรัตน์)

ญาณีพร พชรวรโชติ

กรรมการ

(รศ.ดร.ญาณีพร พชรวรโชติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนสำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงที่มองเห็นได้
โดย	นายกษิตช ประทักษ์นุกูล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

บทคัดย่อ

การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยม เนื่องจากแสงเป็นพลังงานที่มีอยู่ทั่วไปและมีขั้นตอนไม่ซับซ้อน Titanium dioxide (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเสถียรทางเคมี ราคาถูก ไม่เป็นพิษ แต่ด้วยช่วง band gap ที่กว้างส่งผลทำให้ใช้งานได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีปริมาณจำกัด ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะสังเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจาก Bismuth oxyiodide (BiOI) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ TiO_2 แต่มีช่วง band gap ที่แคบกว่าและสามารถใช้งานได้กับแสงที่มองเห็นได้ เริ่มจากสังเคราะห์อนุภาคนาโน Silica (SiO_2) แล้วเคลือบผิวด้วย BiOI ได้เป็นอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$ ก่อนทำการสกัดอนุภาค SiO_2 ที่เป็นแกนกลางออกเป็นอนุภาคกลวง (H-BiOI) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถ multi-light scattering ภายในอนุภาคอันเนื่องมาจากค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน โดยศึกษาผลของตัวทำละลาย สัดส่วนโดยน้ำหนัก $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) : \text{SiO}_2$ ต่อโครงสร้างพื้นฐานของอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$ และศึกษาความสามารถในการเร่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงที่มองเห็นได้เปรียบเทียบกับระหว่างอนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@BiOI$ และ H-BiOI ผ่านการย่อยสลายกรดปาล์มมิติกภายใต้แสงที่มองเห็นได้

คำสำคัญ : ปิสมัทออกไซด์ไฮไดรด์; อนุภาคกลวง; ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง; แสงที่มองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Synthesis of nanoparticles for visible-light activated degradation of organic pollutants

By Kasidet Prathaknukul

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2023

Advisor Assoc. Prof. Dr. Teeraporn Suteewong

ABSTRACT

Removing organic matter in water can be done in several ways. TiO_2 was a popular catalyst for photocatalytic reactions in the past due to its chemical stability, low cost, and non-toxicity. Due to its wide gap, it can only be used under the activation of ultraviolet light. This research is interested in synthesizing and improving the efficiency of BiOI photocatalysts, which have similar properties to TiO_2 but can be activated by visible light. It starts by the synthesis of silica (SiO_2) nanoparticles and then coating them with BiOI, leading to BiOI-coated SiO_2 nanoparticles ($\text{SiO}_2@\text{BiOI}$). After extracting the SiO_2 core particles, hollow particles (H-BiOI) are expected. The hollow structure provides the ability of multi-light scattering inside the hollow core due to different refractive index values. Effects of solvents, weight ratio of $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ on morphologies of $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ are studied. The ability to accelerate the degradation of organic molecules under visible light of $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ and H-BiOI nanoparticles are investigated and palmitic acid is used as a organic model

Keyword : Bismuth oxyiodide; Hollow particle; Photocatalytic degradation; Visible light

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย และปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สามารเกิดได้เลยหากขาดคำปรึกษาจาก รศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาในการแนะนำปรึกษาให้ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจแก้ไขจนปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ และรศ.ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และให้แนวทางในการปรับปรุงงาน ทำให้สามารถพัฒนางานให้ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และศูนย์นาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ สถานที่ ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำปริญญาานิพนธ์ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ช่วยเหลือสนับสนุนตลอดมา

กษิเดช ประทักษ์นุกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic process).....	4
2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst).....	4
2.3 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา	5
2.4 บิสมัทออกไซด์.....	5
2.5 Refractive index.....	7
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	7
2.6.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction; XRD).....	7
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	7
2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM).....	8
2.6.4 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer).....	8
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	13
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	13
3.2 วิธีการทดลอง.....	13
3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO ₂ (≈500 nm).....	13
3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO ₂ @BiOI	13
3.2.3 การสกัดอนุภาค SiO ₂ ในอนุภาคนาโน SiO ₂ @BiOI.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4	การเตรียมสารเคลือบคอมพอลิติกของพอลิยูรีเทนและอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$	18
3.2.4	การวิเคราะห์และการทดสอบ.....	18
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล		20
4.1	การสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO_2	20
4.2	การสังเคราะห์อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@BiOI$	21
4.2.1	ผลของตัวทำละลาย.....	21
4.2.2	ผลของการเติม Additive	21
4.2.3	ผลของการปรับอัตราส่วนปริมาณ SiO_2 ต่อ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในตัวทำละลาย Ethanol.....	25
4.2.4	ผลของ reaction time ในตัวทำละลาย Ethanol.....	28
4.2.5	สมบัติทางแสงของอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$	30
4.3	ผลของการกำจัดแกนกลาง SiO_2 ออกจาก $\text{SiO}_2@BiOI$	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ		32
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	32
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	32
เอกสารอ้างอิง.....		33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 หลักการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อได้รับพลังงาน.....	4
รูปที่ 2 โครงสร้างสามมิติของอนุภาค BiOX.....	6
รูปที่ 3 โครงสร้างสามมิติของอนุภาค BiOI.....	6
รูปที่ 4 ภาพ SEM ลักษณะของอนุภาครูปทรงคล้ายดอกไม้.....	6
รูปที่ 5 หลักการหักเหของแสงผ่านตัวกลาง.....	7
รูปที่ 6 ผลเปรียบเทียบการย่อยสลาย MO ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
รูปที่ 7 รูป SEM ของ (a) H-SiO ₂ และอนุภาคที่มีสัดส่วนของปริมาณ SiO ₂ ต่อ Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O (b) 100:1, (c) 100:5, (d) 100:10, และ (e) 100:20.....	10
รูปที่ 8 ผลการย่อยสลาย ammonia nitrogen ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง.....	10
รูปที่ 9 รูป SEM ของสารตัวอย่าง : (a, b) flower-like microspheres; (c, d) hollow microspheres; (e, f) nanoplates.....	11
รูปที่ 10 ผลการย่อยสลายของสารละลาย RhB ด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (a) P25 (TiO ₂), (b) nanoplates; (c) hollow microspheres; and (d) flower-like microspheres.....	12
รูปที่ 11 ภาพตัวอย่างการเกิด multi-light scattering ภายในอนุภาค.....	12
รูปที่ 12 รูป SEM ของตัวอย่าง A B และ C ตามลำดับ.....	20
รูปที่ 13 รูป SEM ของตัวอย่างที่มีตัวทำละลายเป็น DI water (A,B) และ Ethanol (C,D).....	21
รูปที่ 14 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PVP ใน (A) Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O และ (B) SiO ₂	22
รูปที่ 15 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PEG ใน (A,B) Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O และ (C,D) SiO ₂	23
รูปที่ 16 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PVP ใน (A,B) Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O และ (C,D) SiO ₂	24
รูปที่ 17 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PEG ใน (A,B) Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O และ (C,D) SiO ₂	25
รูปที่ 18 รูป SEM อนุภาคที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนัก (Bi(NO ₃) ₃ · 5H ₂ O) : SiO ₂ (A,B,C) 1:1 และ (D,E,F) 3:1... 27	27
รูปที่ 19 รูป SEM ของอนุภาคที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-4 ชั่วโมงเรียงจาก A ถึง D ตามลำดับ.....	29
รูปที่ 20 แสดงผลการดูดกลืนแสงของอนุภาค SiO ₂ @BiOI ที่สังเคราะห์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง.....	30
รูปที่ 21 รูป TEM ของอนุภาค SiO ₂ @BiOI ก่อนและหลัง etching ตามสถานะต่างๆ.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายในการสังเคราะห์ตัวอย่าง A B และ C..... 20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนาทางอุตสาหกรรมในปัจจุบันส่งผลให้เกิดปัญหาทางมลภาวะทางน้ำที่มากขึ้นเป็นผลจากการสะสมสารอินทรีย์ปนเปื้อนจากน้ำทิ้งของภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของประชาชน และภาคการเกษตร การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับ การใช้สารเคมีบำบัด การทำให้ตกตะกอน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อัลตราฟิльтраชันและวิธีการทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น จากกระบวนการทั้งหมดนี้ การย่อยสลายสารอินทรีย์ปนเปื้อนโดยปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalytic reaction) เป็นหนึ่งในวิธีที่น่าสนใจ เพราะสามารถทำได้ง่าย ประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ในการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยารับพลังงานจากแสง อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ไปยังแถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction band) เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับอนุมูลอิสระเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไป

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสลายสารปนเปื้อนอินทรีย์ในการย่อยสลายด้วยแสง งานวิจัยที่ผ่านมานิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เพราะมีความเสถียรทางเคมี ราคาถูก ไม่เป็นพิษแต่ข้อเสียคือ TiO_2 มีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ที่กว้างประมาณ 3.2 eV สำหรับโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Anatase) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet; UV) ที่มีคลื่นความยาวแสงต่ำกว่า 387 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเพียง 4% จากแสงอาทิตย์ นำไปสู่การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ที่สามารถกระตุ้นด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible light)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบิสมัทเป็นส่วนประกอบ (Bismuth-based catalyst) มีสมบัติคล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์แต่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบกว่ามาก ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ งานวิจัยมีการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีบิสมัทเป็นส่วนประกอบหลายประเภทพบว่าบิสมัทออกซีไฮไลด์ (Bismuth oxyhalides; BiOX , $X=\text{Cl}$ Br และ I) มีความน่าสนใจเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานคือ 2.62 2.16 และ 1.51 eV ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้ แต่ข้อเสียหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาตระกูลบิสมัทคืออิเล็กตรอนจะเกิดการรวมตัวกลับที่โฮลที่มีความเป็นบวกได้เร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเพื่อสลายสารอินทรีย์ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาค BiOX ทำให้หลายวิธี อาทิ การปรับโครงสร้างผลึก การเจือ (Doping) ด้วยธาตุอื่น การปรับโครงสร้างสัณฐาน (Morphology) และการทำคอมโพสิตเป็นต้น สองวิธีหลังมีความซับซ้อนน้อยกว่าสองวิธีแรก ยกตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนตัวทำละลายในกระบวนการสังเคราะห์ BiOI ส่งผลให้อนุภาคที่ได้มีโครงสร้างสัณฐานแตกต่างกันเป็นต้น ในปฏิญานพนธ์นี้สนใจพัฒนาอนุภาคคอมโพสิตระหว่าง BiOI และซิลิกา (Silica; SiO_2) โดยสังเคราะห์หรือเคลือบ BiOI บนอนุภาค SiO_2 ($\text{SiO}_2@BiOI$) และทำการสกัด SiO_2 ออกเพื่อเตรียมอนุภาคกลาง h-BiOI ด้วย อนุภาค SiO_2 สังเคราะห์ง่าย ราคาถูก ทนสารเคมี และมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.43 และเท่ากับ 1.007 สำหรับอากาศ ซึ่งแตกต่างจาก BiOI ที่มีค่าดัชนีหักเห 2.55 ดังนั้นเมื่อแสงเดินทางตกกระทบอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$ และ h-BiOI จะเกิดการหักเหหลายครั้งในอนุภาคเป็นการเพิ่มการตกระทบ (Multi light scattering) ส่งผลให้เกิดการสะสมพลังงานมากกว่าการดูดซับแสงปกติ และเกิดการปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีมากขึ้น โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาค SiO_2 ด้วยวิธี sol-gel ใช้ Tetraethyl orthosilicate (TEOS) เป็นสารตั้งต้นและมี Ammonium hydroxide (NH_4OH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นแบ่งการเคลือบหรือหุ้ม BiOI บนอนุภาคเป็น 2 วิธีคือ 1. สังเคราะห์อนุภาค BiOI บนผิวของอนุภาค SiO_2 โดยตรงและ 2. ทำการเคลือบอนุภาค BiOI ขนาดเล็กบนอนุภาค SiO_2 จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายอินทรีย์ของอนุภาคนาโนที่มีขนาดต่างกันเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงและสุดท้ายคือการนำตัวแกนกลาง SiO_2 ออกเพื่อให้ได้อนุภาค h-BiOI และนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงกับอนุภาค $\text{SiO}_2@BiOI$ โดยใช้เครื่อง UV-vis diffuse reflectance spectroscopy เพื่อวิเคราะห์หาค่า band gap และค่าช่วงการดูดซับแสง ศึกษาโครงสร้างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) และตรวจสอบพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยการทดลองย่อยสลายสารเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในช่วงความเข้มของแสงที่มองเห็นได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิต $\text{SiO}_2@BiOI$ และ h-BiOI สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง
2. เพื่อศึกษาวิธีพัฒนาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์อนุภาค SiO_2 ขนาดประมาณ 500 nm
2. สังเคราะห์อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@BiOI$
3. สังเคราะห์อนุภาคนาโน h-BiOI จากอนุภาคที่เตรียมไว้ในข้อที่ 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาผลกระทบทางกายภาพ อาทิ การดูดกลืนแสง UV และโครงสร้างสัณฐาน
5. ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง
6. วิเคราะห์ผลของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของอนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ ผ่านการทดสอบการย่อยสลายกรดปาล์มมิติกด้วยแสงที่มองเห็นได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ ทั้งแบบกลางและไม่กลางสำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยแสงที่มองเห็นได้



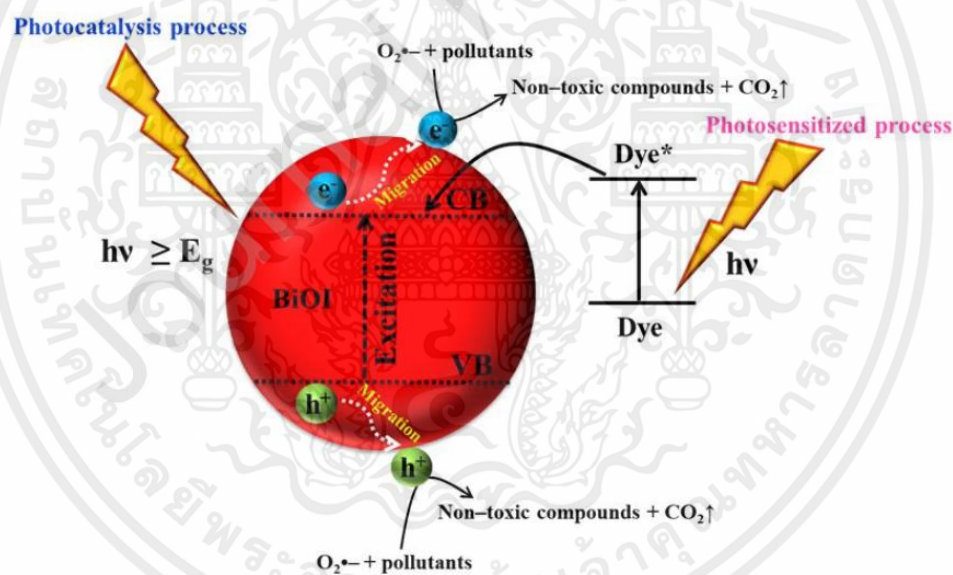
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic process)

การเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นหนึ่งในวิธีสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนแหล่งน้ำเช่น สีย้อม ยาปฏิชีวนะ และน้ำมัน เป็นต้น การย่อยสลายของสารอินทรีย์จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) ประกอบไปด้วย valence band และ conduction band คั่นระหว่างกันด้วย band gap เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสงมากกว่า band gap อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจาก valence band ไปยัง conduction band ส่งผลให้เกิด hole บน valence band ขึ้นซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ในขณะที่เดียวอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจาก conduction band และไปจับคู่เกิดปฏิกิริยารีดักชันกับสารอินทรีย์เช่นกัน [1]



รูปที่ 1 หลักการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเมื่อได้รับพลังงาน

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือสารที่เร่งปฏิกิริยาทางเคมีโดยอาศัยพลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานแสงมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันให้เกิดเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีสองประเภท ประกอบด้วย 1. Single material photocatalysts มีสองแบบคือ n-type และ p-type semiconductor สามารถผลิตและใช้งานได้ง่าย แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำ 2. Semiconductor heterojunction photocatalysts เป็นสารกึ่งตัวนำหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

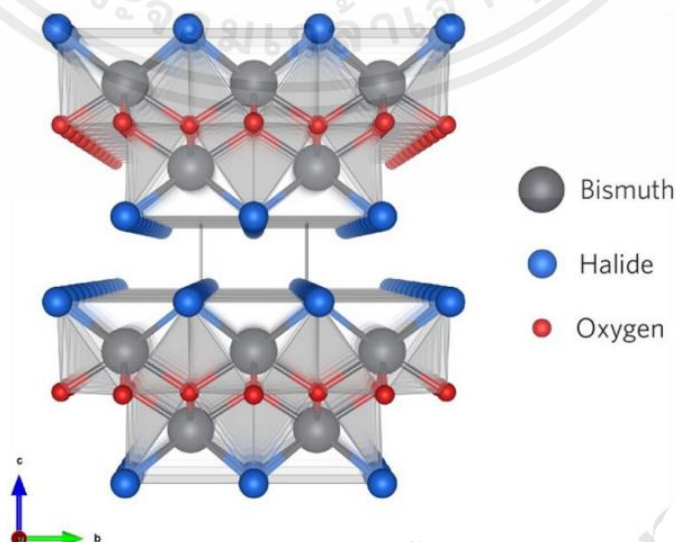
สารอื่นๆ ที่ผสมกับสารอื่นๆ เช่น สารโลหะ สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้นเพื่อเพิ่มค่าการดูดกลืนแสงให้อยู่ถึงในช่วงแสงที่มองเห็นได้ โดยไม่ลดความสามารถในการรวมตัวของ electron และ hole เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีความซับซ้อนในการผลิต [2]

2.3 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย การเจือปนที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ปรับโครงสร้างสัณฐานและแถบช่องว่างพลังงาน เป็นต้น การเจือ (Doping) ด้วยธาตุอื่นคือการเคลื่อนสารจำพวกโลหะลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแสงและลดแถบช่องว่างพลังงานลงผ่านการให้สารเคลือบโลหะจับอิเล็กตรอนที่ปล่อยมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ในช่วง excited state โดย Semiconductor coupling คือการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผสมด้วยการจับคู่กับสารโลหะ สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสง ปรับโครงสร้างผลึกคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอนุภาคเพื่อลดความเร็วที่อิเล็กตรอนจะเกิดการรวมตัวกลับที่โฮลที่มีความเป็นบวก [3]

2.4 บิสมัทออกซีเฮไลด์

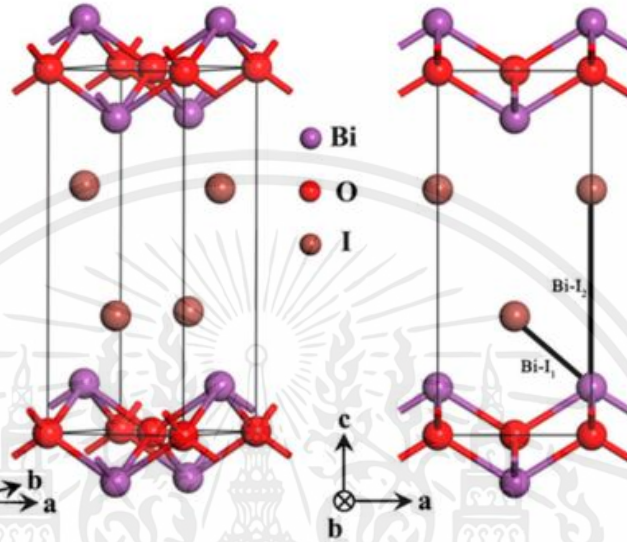
สารกึ่งตัวนำบิสมัทออกซีเฮไลด์ (Bismuth oxyhalides; BiOX โดยที่ X=Cl Br และ I) มีโครงสร้างผลึกแบบ tetragonal matlockite โครงสร้างผลึกประกอบด้วยชั้นฟลูออไรต์ประกบอยู่ระหว่างชั้นฮาโลเจนสองชั้นและเป็นรูปทรงแบบ [X-Bi-O-Bi-X] ที่เชื่อมกันด้วย nonbonding van der Waals สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่าง Bi O กับ X ส่งเสริมการแยกมีประสิทธิภาพมากขึ้นและเกิดคู่อิเล็กตรอนและ hole มากขึ้น มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดี จากการทดลองหาค่า band gap พบว่าบิสมัทออกซีคลอไรด์มีค่า 3.51 eV อยู่ในช่วงแสง ultraviolet บิสมัทออกซีโบรมไนด์มีค่า 2.91 eV และบิสมัทออกซีไอโอดไนด์มีค่า 1.92 eV ซึ่งทั้งคู่อยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

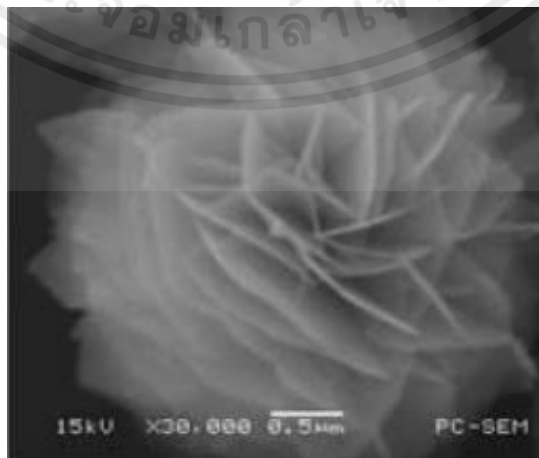
รูปที่ 2 โครงสร้างสามมิติของอนุภาค BiOX

บิสมัทออกไซด์ไอโอไดด์ (Bismuth oxyiodide; BiOI) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ที่มีโครงสร้างดังรูป 3 มีแถบช่องว่างพลังงานแคบที่สุดในบิสมัทออกไซด์ไอโอไดด์ที่ประมาณ 1.8 – 2.1 eV แต่ข้อเสียคือ อิเล็กตรอนจะเกิดการรวมตัวกลับที่โฮลที่มีความเป็นบวกรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกของตัวอนุภาค



รูปที่ 3 โครงสร้างสามมิติของอนุภาค BiOI

ปกติแล้วการสังเคราะห์อนุภาค BiOI จะทำด้วยวิธี hydrothermal-solvothermal อนุภาคที่ได้จะมีลักษณะคล้ายดอกไม้ทรงกลมที่เกิดจากแผ่นอนุภาคผิวเรียบมาเกาะกันดังรูปที่ 4 เมื่อเปลี่ยนสภาวะการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ ตัวทำละลายและ pH จะได้อนุภาคที่แตกต่างกันไปตามจุดประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้งานได้ อาทิ nanofibers, flake-like, square-like, nanosheets, microspheres, h-microspheres และ nanorods เป็นต้น [5] [6] [7]

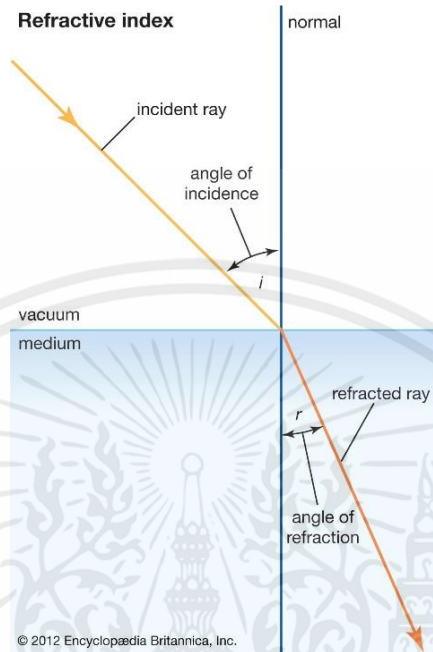


รูปที่ 4 รูป SEM ลักษณะของอนุภาครูปทรงคล้ายดอกไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Refractive index

Refractive index คือค่าที่ใช้บ่งบอกการเบี่ยงเบนของแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่ไม่ใช่สุญญากาศ



รูปที่ 5 หลักการหักเหของแสงผ่านตัวกลาง

ในกรณีที่อนุภาคมีหลายชั้นที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดการหักเหของแสงภายในอนุภาคและเกิดการตกกระทบหลายครั้ง multi-light scattering ซึ่งนำไปสู่การสะสมของพลังงานที่มากกว่าการตกกระทบครั้งเดียว scattering [8]

2.6 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction; XRD)

เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray) โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของอะตอมภายในผลึก รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมภายในผลึก ชนิดของอะตอม และทิศทางการตกกระทบของรังสีเอกซ์

2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20-800,000 เท่า ทำงานโดยลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสไปที่พื้นผิวของตัวอย่าง อิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนจะกระเด็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับออกจากพื้นผิวของตัวอย่างในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยเครื่องตรวจจับและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกประมวลผลและแสดงผลเป็นภาพ

2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะผ่านทะลุผ่านตัวอย่างไปยังเครื่องตรวจจับ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 มิติ กำลังขยาย 50-600,000 เท่า ทำงานโดยลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสไปที่ตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนที่ผ่านทะลุผ่านตัวอย่างไปยังเครื่องตรวจจับจะถูกตรวจจับและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณไฟฟ้าจะถูกประมวลผลและแสดงผลเป็นภาพ

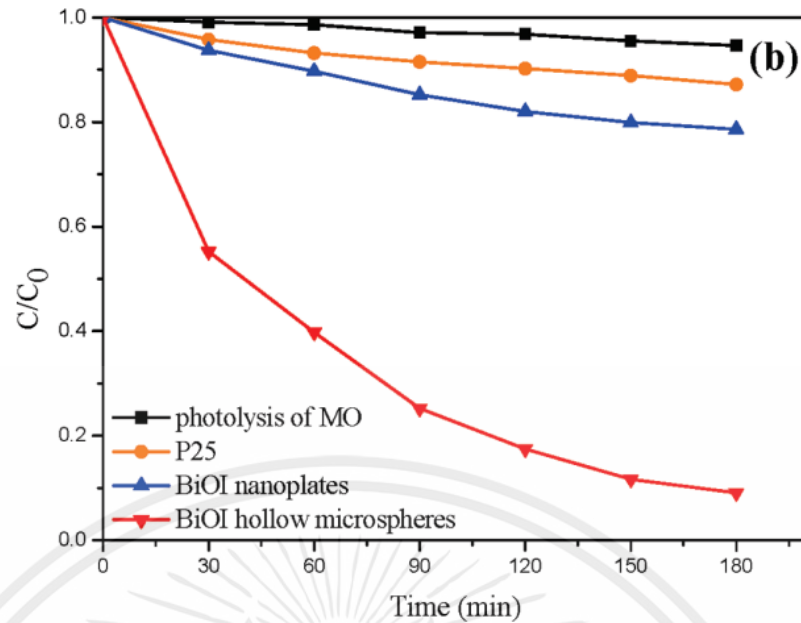
2.6.4 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm โดยอาศัยหลักการของกฎ Beer-Lambert ซึ่งกล่าวว่าปริมาณการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารและความยาวทางแสงที่ผ่านสาร

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

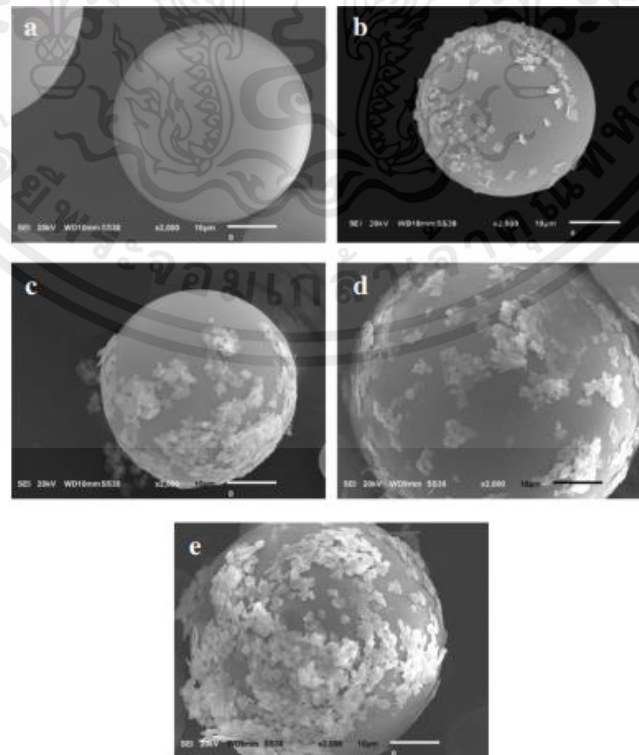
Jiexiang Xia และคณะ [9] ได้ทำการวิจัยประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงของอนุภาค h-BiOI microspheres ที่สังเคราะห์โดยใช้ reactable ionic liquid เป็นแหล่งไอโอดีนและตัวทำละลายผ่านวิธี solvothermal สังเคราะห์อนุภาคขึ้นมาและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยากับ Methyl orange ระหว่าง h-BiOI, nanoplate BiOI และ TiO₂ (Degussa, P25) ได้ผลออกมาว่าการที่มีโครงสร้างสัณฐานเป็น hollow ส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 ผลเปรียบเทียบการย่อยสลาย MO ของตัวเร่งปฏิกิริยา

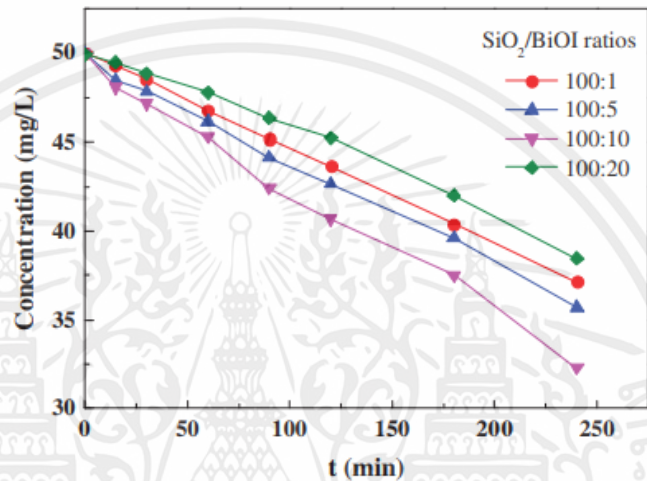
Xiaoqing Lu และคณะ [10] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาค Hollow SiO₂ microsphere-supported bismuth oxyiodide (BiOI) nanocomposites ด้วยวิธี liquid chemical deposition เริ่มจากสังเคราะห์อนุภาค hollow SiO₂ จากนั้นเคลือบด้วยอนุภาค BiOI ที่มีสัดส่วนของปริมาณ SiO₂ ต่อ BiOI แตกต่างกันได้อนุภาคลักษณะดังรูปที่ 7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7 รูป SEM ของ (a) H-SiO₂ และอนุภาคที่มีสัดส่วนของปริมาณ SiO₂ ต่อ Bi(NO₃)₃ · 5H₂O (b) 100:1, (c) 100:5, (d) 100:10, และ (e) 100:20.

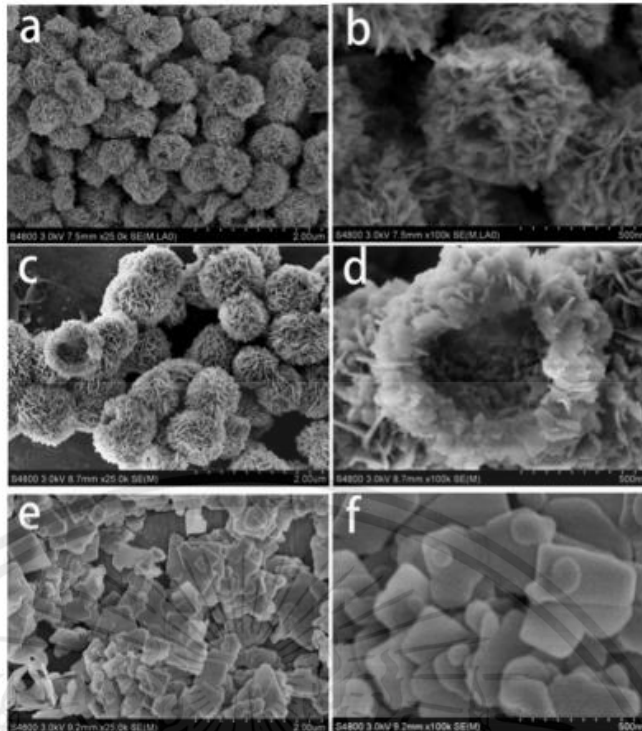
นำอนุภาคที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยากับ ammonia nitrogen สรุปได้ว่าความสามารถในการย่อยสารอินทรีย์ของอนุภาคตัวอย่างเรียงลำดับดังนี้ SiO₂@BiOI(100:10) > SiO₂@BiOI(100:5) > SiO₂@BiOI(100:1) > SiO₂@BiOI(100:20) โดยสาเหตุที่ SiO₂@BiOI(100:20) มีประสิทธิภาพต่ำสุดเป็นผลมาจากการรวมตัวซ้อนกันของ BiOI ที่ผิวของอนุภาคตัวอย่าง



รูปที่ 8 ผลการย่อยสลาย ammonia nitrogen ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง

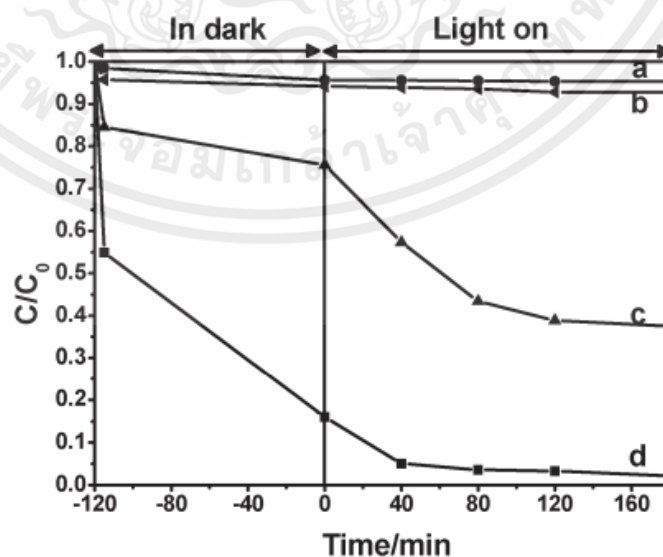
Kuaixia Ren และคณะ [11] ได้สังเคราะห์อนุภาค BiOI microspheres แบบ nanoplate, hollow และ flower-like ด้วยวิธี Facile precipitation ด้วยตัวทำละลายผสม water-ethanol โดยมี PVP และ citric acid (CA) เป็นตัวช่วยที่อุณหภูมิต่ำ (70°C) สารตัวอย่างถูกทดสอบการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยการย่อยสลาย RhB ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ อนุภาคตัวอย่างมีรูปร่างดังรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 รูป SEM ของสารตัวอย่าง : (a, b) flower-like microspheres; (c, d) hollow microspheres; (e, f) nanoplates

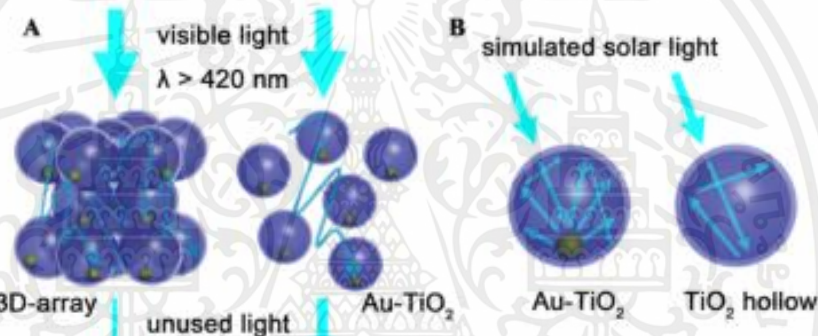
นำสารตัวอย่างทั้งสามโครงสร้างไปทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงกับสารละลาย RhB ได้ผลดังรูปที่ 10 สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของสารตัวอย่างที่มีโครงสร้าง flower-like microspheres (500-800 nm) สูงกว่า hollow microspheres (800-1000 nm) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าที่ส่งผลให้อัตราการคืนกลับที่เดิมของคู่อิเล็กตรอนกับโฮลที่เป็นบวกลดลงและเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชันมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 10 ผลการย่อยสลายของสารละลาย RhB ด้วยแสงที่มองเห็นได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (a) P25 (TiO_2), (b) nanoplates; (c) hollow microspheres; and (d) flower-like microspheres.

Xiaowei Shi และคณะ [12] สังเคราะห์อนุภาค Au-TiO₂ Yolk-Shell เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงผ่านการเกิด multi-light scattering สำหรับใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการเกิด H₂ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ผลที่ได้คืออนุภาคตัวอย่างมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงมากกว่าอนุภาคธรรมดาถึง 3.5 เท่า อนุภาคตัวอย่างถูกทดสอบโดย finite difference time domain (FDTD) Calculations และได้ข้อสรุปถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงที่ให้ประสิทธิภาพมากกว่าอนุภาคธรรมาคือตัวของ Au ภายในอนุภาคได้โอกาสในการดูดซับพลังงานแสงมากขึ้นส่งผลให้สามารถสร้างอิเล็กตรอนได้มากขึ้น อันเกิดมาจากการเกิดการสะท้อนของพลังงานแสง multiscattering ภายในอนุภาคระหว่าง Au และ TiO₂ นำไปสู่ปริมาณการเกิด H₂ ที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 11 ภาพตัวอย่างการเกิด multi-light scattering ภายในอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- Tetraethoxysilane (TEOS \geq 99.0% (GC), Aldrich)
- Bismuth(III) nitrate pentahydrate ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Potassium Iodide (KI)
- Deionized Water (DI water)
- Polyvinylpyrrolidone (PVP)
- Ethanol (Ethanol AR, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, RCI Labscan)
- Ammonium hydroxide (NH_4OH) (NH_4OH , Ammonia 30%)
- Ethylene glycol (CH_2OH)₂
- Polyethylene glycol (PEG)
- Palmitic acid (PA)
- Polyurethane (PU)
- Sodium hydroxide (NaOH, Pellets)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO_2 (≈ 500 nm)

อนุภาคนาโน SiO_2 สังเคราะห์ด้วยวิธี sol-gel เริ่มจากการกวน $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 28.15 ml กับ NH_4OH 2.32 ml เข้าด้วยกันเป็นเวลา 10 นาที เติมสารตั้งต้น TEOS 0.8 ml ลงไปและกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นค่อยๆเติมสารตั้งต้น TEOS ครั้งละ 17 μl เป็นจำนวน 10 ครั้งทุกๆ 5 นาที เมื่อเติมครบให้กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 8 ชั่วโมง กำจัดสารเคมีส่วนเกินด้วยการ Centrifugation ที่ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 10 นาทีเป็นจำนวน 2-3 ครั้ง จากนั้นเก็บอนุภาค SiO_2 ไว้ใน $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ [13]

3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$

I. ผลของการใช้ DI water เป็นตัวทำละลาย [14]

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.0438 g ใน DI water 9 ml

2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน DI water 9 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังระบบออนไลน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน DI water 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

II. ผลของการใช้ Ethanol เป็นตัวทำละลาย

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g ใน Ethanol 9 ml
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน Ethanol 9 ml
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน Ethanol 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

● ผลของการเติม PVP ใน $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g และ PVP 0.233 g ใน Ethanol 9 ml
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน Ethanol 9 ml
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน Ethanol 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80°C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

- ผลของการเติม PVP ใน SiO_2

- เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g ใน Ethanol 9 ml
- เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน Ethanol 9 ml
- นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g และ PVP 0.233 g มาละลายใน Ethanol 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 °C
- เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

- ผลของการเติม PEG ใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

- เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g และ PEG 0.233 g ใน Ethanol 9 ml
- เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน Ethanol 9 ml
- นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน Ethanol 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 °C
- เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

- ผลของการเติม PEG ใน SiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.0438 g ใน Ethanol 9 ml
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน Ethanol 9 ml
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g และ PEG 0.233 g มาละลายใน Ethanol 3 ml ได้สารละลาย C นำไปกวนและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 °C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C และกวนด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนต่อด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคนาโนที่ได้ใน Ethanol

III. ผลของการใช้ Ethylene glycol (EG) เป็นตัวทำละลาย [15]

● ผลของการเติม PVP ใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.0438 g และ PVP 0.233 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน EG 3 ml ได้สารละลาย C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาทีและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 °C
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคที่ได้ในตัวทำละลาย Ethanol

● เติม PVP ใน SiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g และ PVP 0.233 g มาละลายใน EG 3 ml ได้สารละลาย C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาทีและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 °C
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคที่ได้ในตัวทำละลาย Ethanol

● **เติม PEG ใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$**

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g และ PEG 0.233 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g มาละลายใน EG 3 ml ได้สารละลาย C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาทีและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 °C
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคที่ได้ในตัวทำละลาย Ethanol

● **ผลของการเติม PEG ใน SiO_2**

1. เตรียมสารละลาย A โดยละลาย $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.0438 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เตรียมสารละลาย B โดยละลาย KI 0.015 g ใน EG 9 ml นำไปกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำอนุภาคนาโน SiO_2 จากข้อ 3.2.1 จำนวน 0.0146 g และ PEG 0.233 g มาละลายใน EG 3 ml ได้สารละลาย C
4. เติมสารละลาย A ลงในสารละลาย C นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาทีและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ $120\text{ }^\circ\text{C}$
5. เติมสารละลาย B ลงในสารละลายผสม A และ C และกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ $120\text{ }^\circ\text{C}$
6. นำสารตัวอย่างที่ได้ไป centrifuge ด้วย Ethanol และ DI water ก่อนจะเก็บอนุภาคที่ได้ในตัวทำละลาย Ethanol

3.2.3 การสกัดอนุภาค SiO_2 ในอนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$

เติมสารละลาย NaOH ลงในสารตัวอย่าง $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ที่อยู่ใน DI water ที่สัดส่วนโดยน้ำหนัก NaOH : $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ที่กำหนด จากนั้นกวนเป็นเวลา 15-60 นาที แล้วนำไป centrifuge ก่อนจะเก็บในตัวทำละลาย Ethanol [17] [18]

3.2.4 การเตรียมสารเคลือบคอมพอสิตของพอลิยูรีเทนและอนุภาค $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$

1. นำอนุภาค $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ใน Ethanol มาผสมลงในพอลิยูรีเทนให้ได้ความเข้มข้น 5% w/w โดยใช้เครื่องกวนสารละลายให้อนุภาคกระจายตัวในเมทริกซ์ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 20 นาที
2. เตรียมแผ่นพลาสติกใสโดยการเช็ดให้สะอาดด้วย Ethanol
3. นำสารเคลือบที่ได้ไปเคลือบลงบนแผ่นสไลด์ที่เตรียมเอาไว้โดยการหยดลงบนแผ่น ควบคุมให้ปริมาตรเท่ากันและทำให้สารกระจายด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุน
4. ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.2.4 การวิเคราะห์และการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer; XRD)
2. วิเคราะห์การดูดซับรังสี UV ของอนุภาคด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer
3. ศึกษาโครงสร้างสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
4. ศึกษาโครงสร้างสัณฐานภายในอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารด้วยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)
6. วิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงผ่านการทดสอบย่อยสลายกรดปาล์มมิติกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

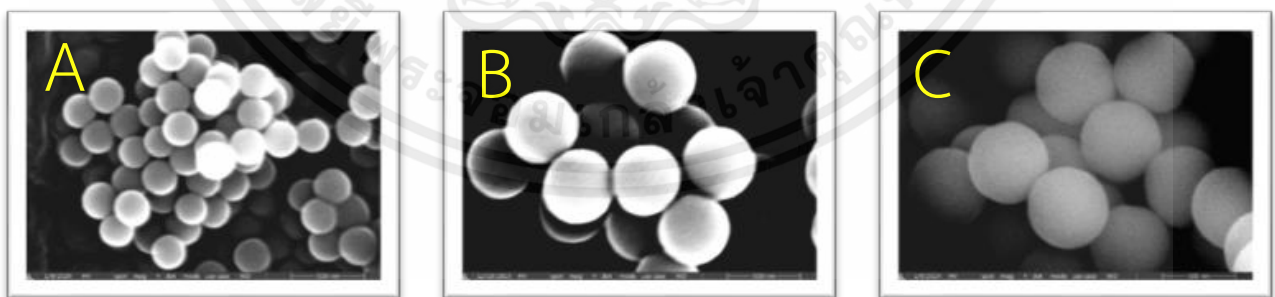
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO₂

ในการทดลองนี้ ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน SiO₂ ที่ขนาดต่างๆผ่านการปรับปริมาตรของ Ethanol ในระบบจากรูปที่ 12 พบว่าเมื่อปริมาตร Ethanol ลดลง อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 239 ± 12 nm เป็น 475 ± 18 nm ความเข้มข้นของระบบโดยรวมเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Weihong Gao และคณะ [19] ที่ทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆเพื่อควบคุมขนาดในการสังเคราะห์อนุภาค SiO₂ แล้วพบว่าหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นปริมาตรของระบบโดยรวม ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาล้วนส่งผลต่อขนาด ทว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดของ SiO₂ ใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ผู้ทำการทดลองได้เลือกอนุภาคนาโน SiO₂ ที่ขนาดประมาณ 500 nm เพื่อศึกษาต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายในการสังเคราะห์ตัวอย่าง A B และ C

Sample	EtOH (ml)	TEOS 1 st (ml)	TEOS aliquot (μL)	[TEOS] (M)	[NH ₄ OH] (M)	Size (nm)
A	28.15	0.8	17	0.13817	1.91638	239 ± 12
B	18.15	0.8	17	0.20262	2.81022	475 ± 18
C	8.15	0.8	17	0.37973	5.26671	549 ± 10

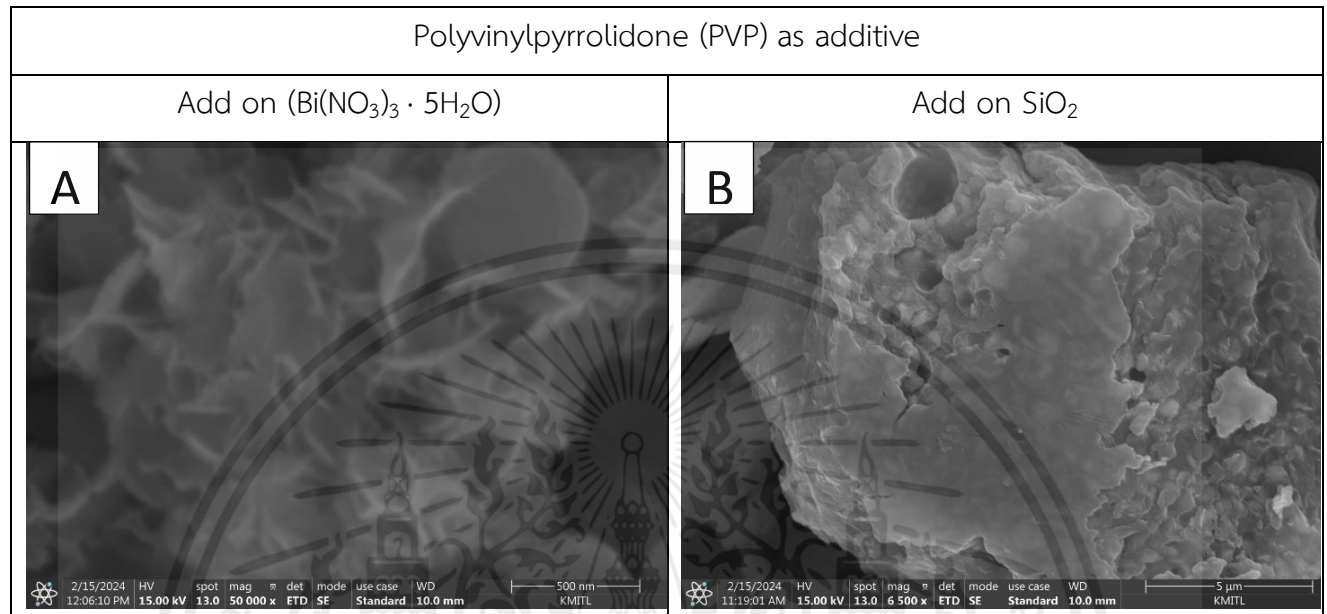


รูปที่ 12 รูป SEM ของตัวอย่าง A B และ C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ EG โดยศึกษาผลของลำดับการเติมคือเติมใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และในอนุภาค SiO_2 ต่อการเกิด BiOI บนอนุภาค SiO_2

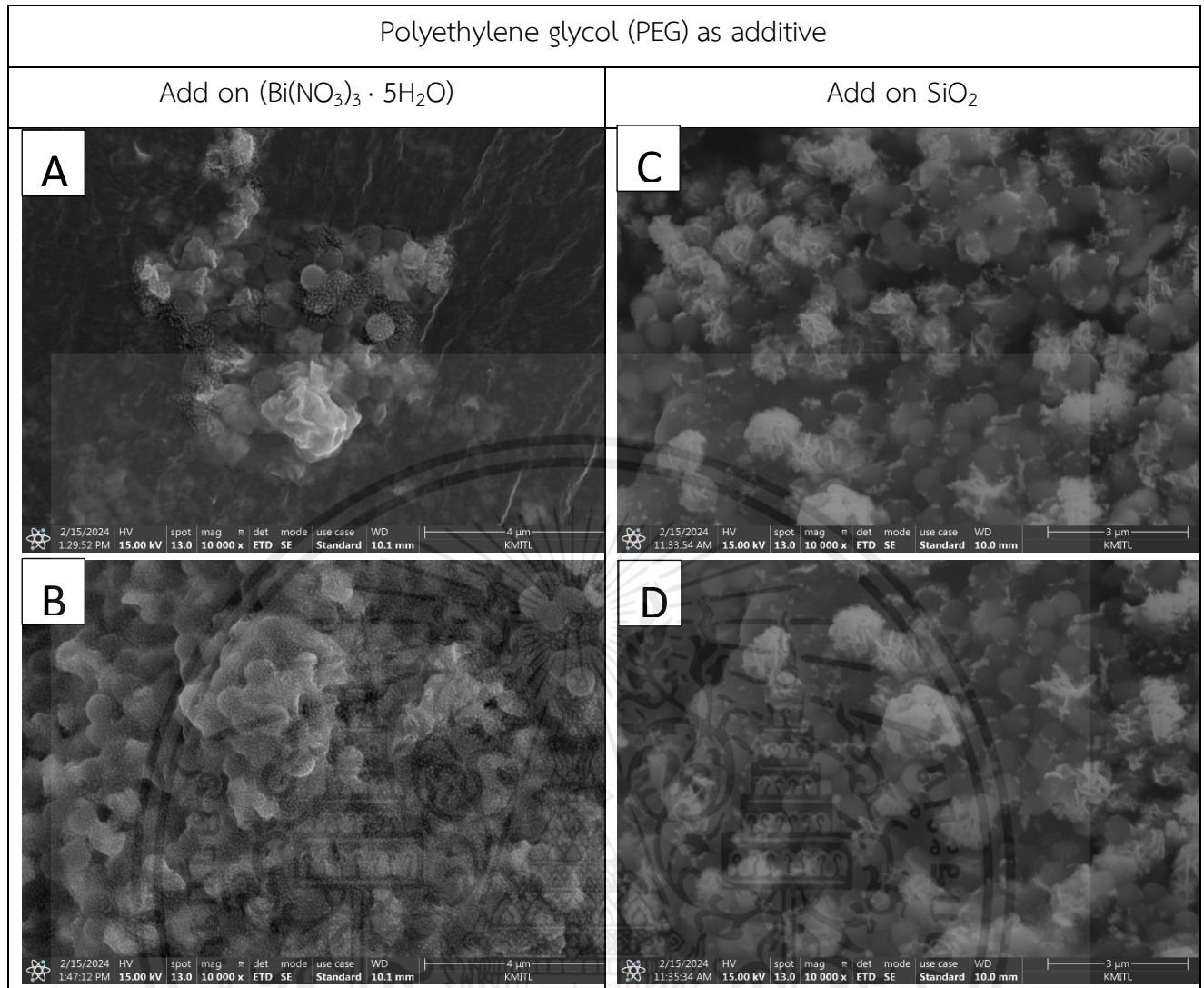
I. ตัวทำละลาย Ethanol



รูปที่ 14 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PVP ใน (A) $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ (B) SiO_2

จากรูปที่ 14 พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ Ethanol เป็นตัวทำละลายและใส่ coating agent ใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ มีอนุภาคคล้ายดอกไม้ (flower-like structure) ของ BiOI บนผิวของอนุภาค SiO_2 และมี BiOI อิสระอยู่จำนวนหนึ่งที่จับตัวกันเอง ไม่เกาะบนผิวของ SiO_2 ในขณะที่การเติม PVP ในสารแขวนลอย SiO_2 พบอนุภาคที่ได้เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $1 \mu\text{m}$ จากงานวิจัยของ Murthi S. Kandanapitiye และคณะ [16] ในการสังเคราะห์อนุภาค BiOI พบว่าการเติม PVP จะลดหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis ของ Bi^{3+} ทำให้เกิด nucleation ของ BiOI ได้ช้า ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กลง ดังนั้นสอดคล้องกับการเติม PVP ใน $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในการทดลองนี้ ที่ได้ BiOI มาเกาะบน SiO_2 ถึงแม้จะมีขนาดใหญ่ต่างจากการเติมลงบนอนุภาค SiO_2 ที่ได้ aggregate ขนาดใหญ่ขึ้น อาจเพราะปริมาณหรือน้ำโมเลกุลของ PVP ไม่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

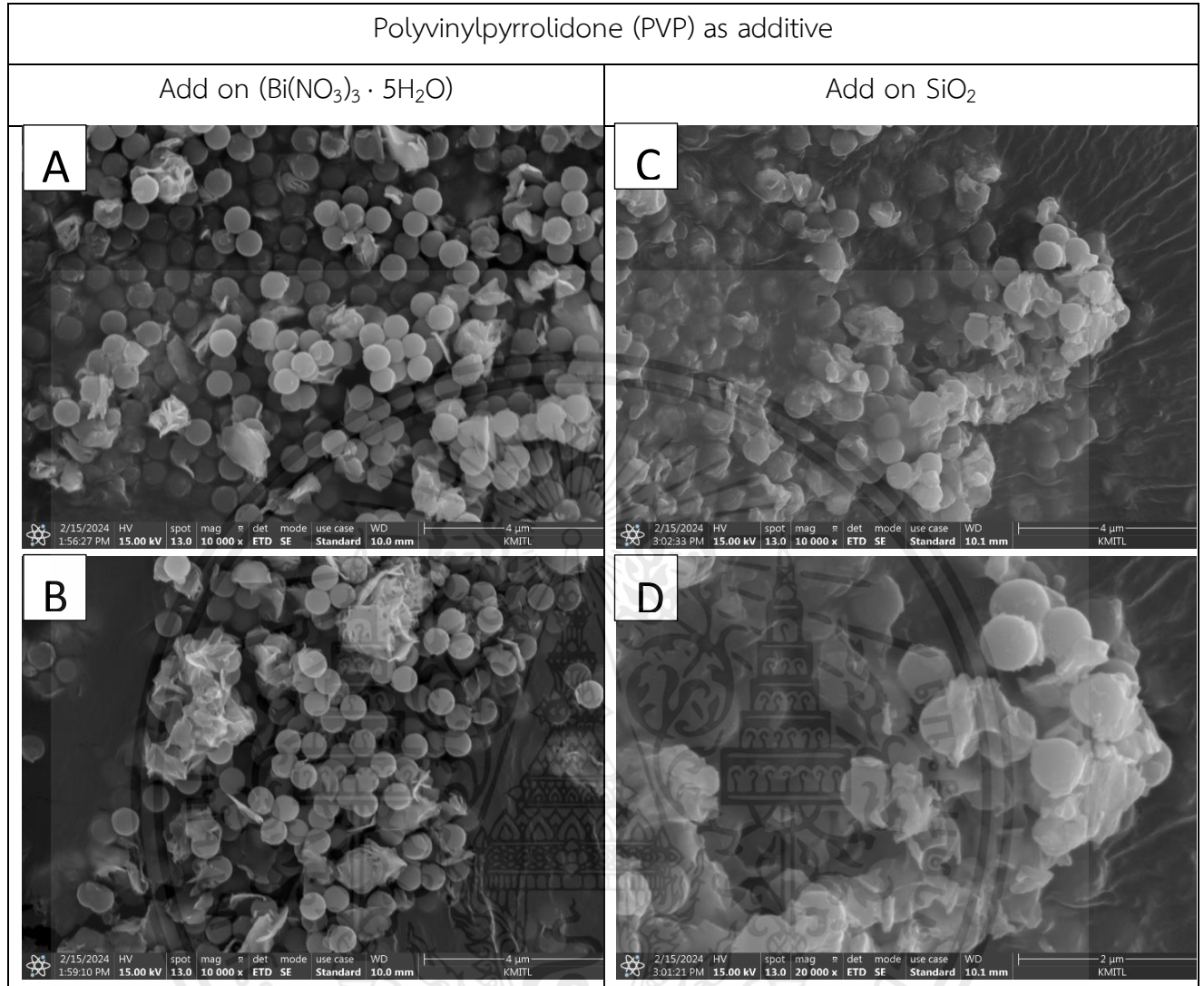


รูปที่ 15 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PEG ใน (A,B) $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ (C,D) SiO_2

การใช้ PEG เป็น coating agent ในกระบวนการสังเคราะห์ $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ โดยมี Ethanol เป็นตัวทำละลาย เมื่อนำอนุภาคที่ได้ไม่ว่าจะมี coating agent อยู่สารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ หรือ SiO_2 ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ด้วย SEM พบว่าอนุภาค BiOI ที่ควรเกาะอยู่บนผิว SiO_2 ส่วนใหญ่เกิดการเกาะและรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีขนาดมากกว่า $1 \mu\text{m}$ หรือเกิดเป็นอนุภาค BiOI อิสระจำนวนมากซึ่งถือว่าไม่ตรงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนั้นจากการทดลองทั้งหมดการเติม PVP เป็น coating agent ในสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ถือเป็นวิธีที่ดีที่สุดในตัวทำละลาย Ethanol ซึ่งจะมีการปรับปรุงสัดส่วนของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่อไปเพื่อลด BiOI อิสระให้น้อยที่สุด

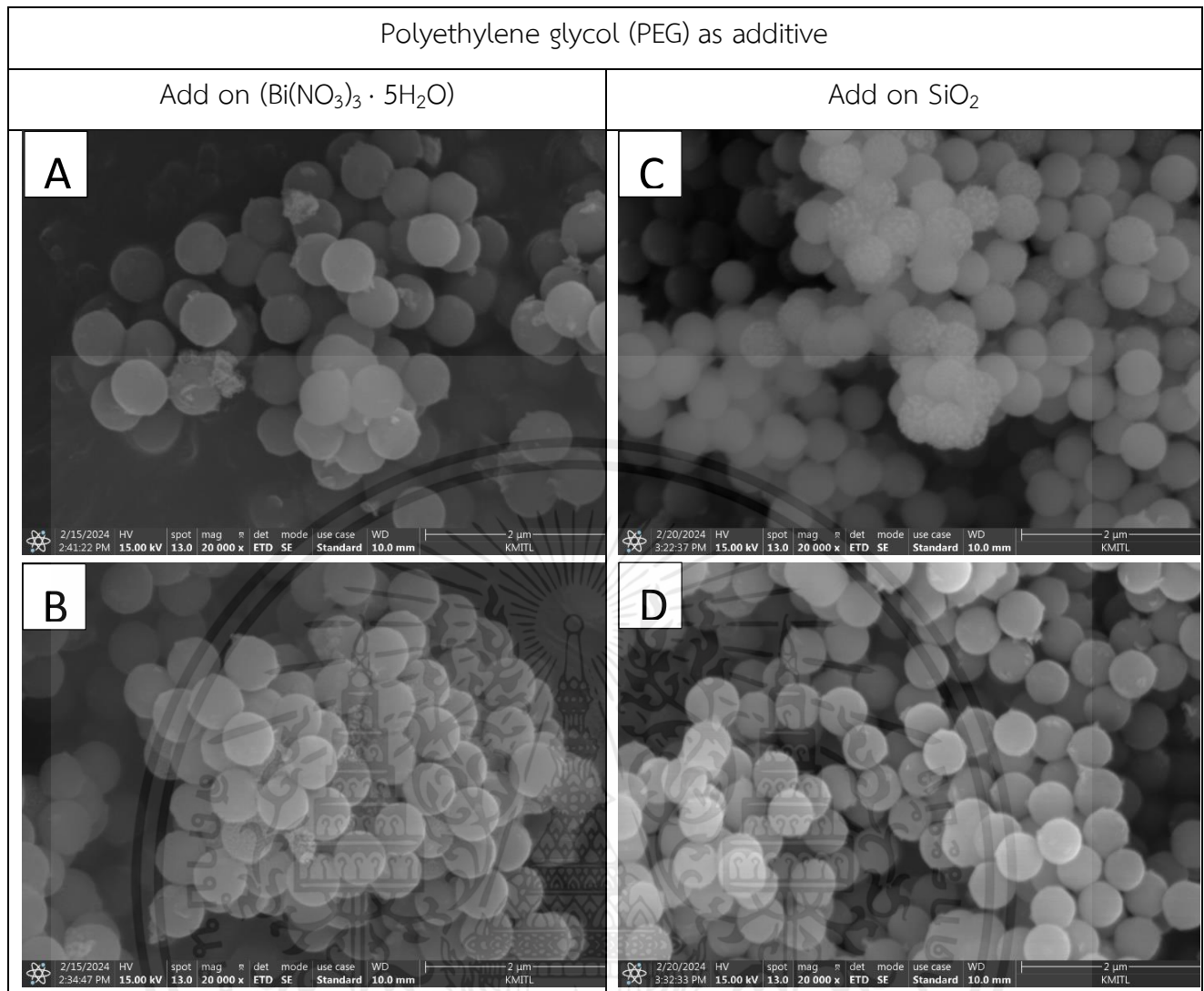
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II ตัวทำละลาย EG



รูปที่ 16 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PVP ใน (A,B) $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ (C,D) SiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 รูป SEM ของอนุภาคที่ได้จากการเติม PEG ใน (A,B) $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ (C,D) SiO_2

สำหรับในส่วนนี้ใช้ coating agent คือ PVP และ PEG ในสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ หรือ SiO_2 เหมือนขั้นตอนก่อนหน้าแต่เปลี่ยนตัวทำละลายเป็น EG แทน พบว่าอนุภาคที่ได้ส่วนใหญ่แทบไม่มีการเกาะของ BiOI บน SiO_2 อนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดเป็น BiOI อิสระแยกกับอนุภาค SiO_2 ในสารละลายอย่างชัดเจน จากรูป C อาจมีบางส่วนที่คล้ายจะมีการเคลือบเกิดขึ้น ทว่าจากรูป D การตรวจในจุดอื่นๆเพิ่มเติมของอนุภาคที่พบการเคลือบ แสดงให้เห็นว่ามีเพียงส่วนน้อยมากที่ถูกเคลือบผิว ซึ่งถือว่าอัตราส่วนการเคลือบต่ออนุภาคทั้งหมดยังน้อยเกินไปกว่าจะยืนยันได้ว่าสามารถเคลือบได้ดีและนำอนุภาคไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น EG ไม่ใช่ตัวทำละลายที่เหมาะสม

4.2.3 ผลของการปรับอัตราส่วนปริมาณ SiO_2 ต่อ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ในตัวทำละลาย Ethanol

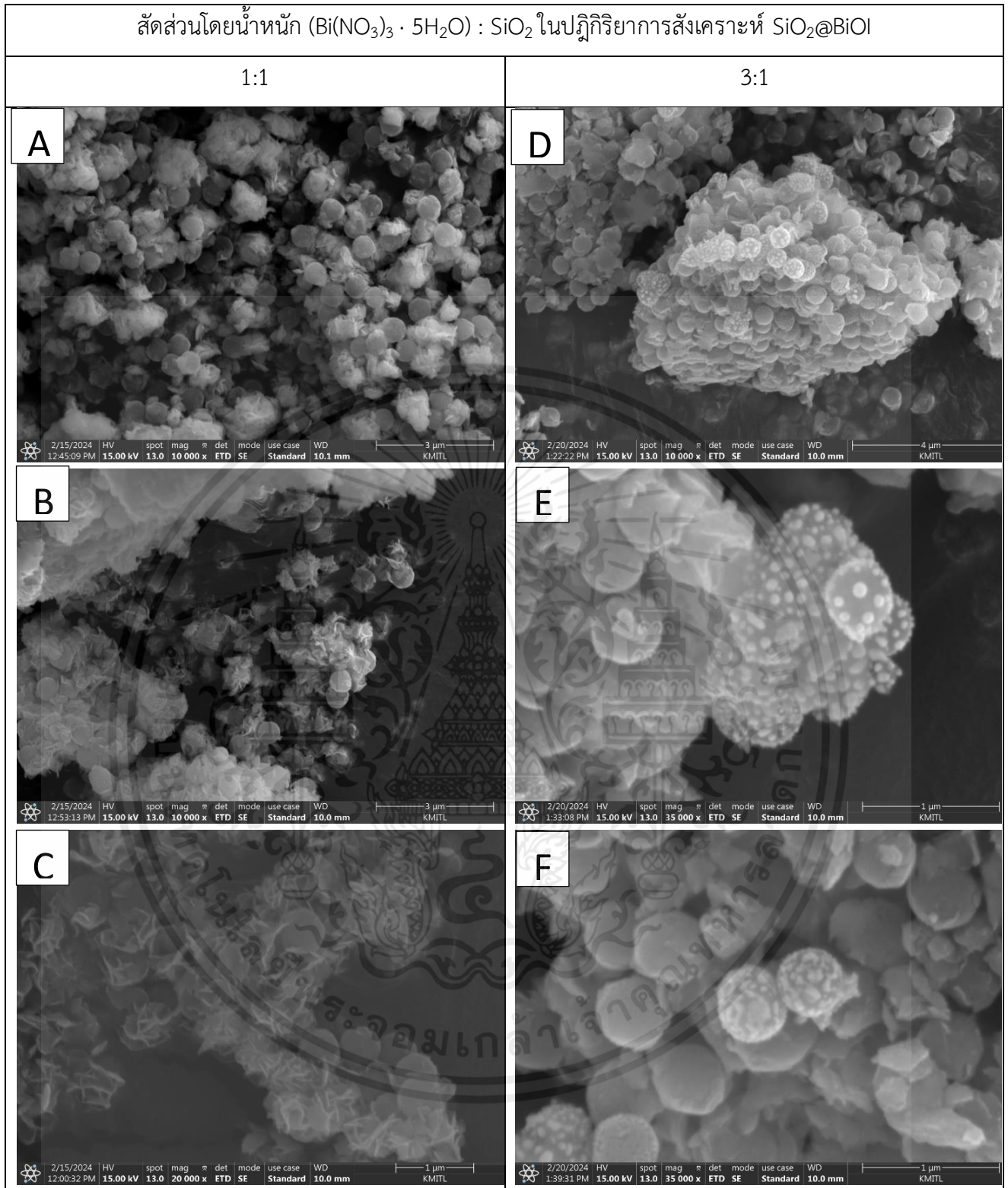
จากการทดลอง 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าตัวทำละลาย Ethanol และการเติม PVP ในสารละลาย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ให้อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@(\text{BiO})_2$ ได้ดีที่สุด แต่ปริมาณการเคลือบยังน้อยและไม่สม่ำเสมอ จึงทำการศึกษาผลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ ต่อ SiO_2 ต่อโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ โดยทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 รูป SEM อนุภาคที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนัก ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) : SiO_2 (A,B,C) 1:1 และ (D,E,F) 3:1

การปรับสัดส่วนของปริมาณสารตั้งต้น ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่ใช้ต่อปริมาณของอนุภาค SiO_2 ส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานของอนุภาคที่ได้ ถ้าปริมาณของ BiOI ที่สังเคราะห์ขึ้นมา มีปริมาณมากกว่า SiO_2 มากจะส่งผลให้มี BiOI อิสระมากขึ้นตามมา ซึ่งถือเป็นอนุภาคที่ไม่ตรงวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เนื่องจากต้องการ $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ อีกทั้งหากเอ็กสตรันเป็นเอ็กสตรันที่ส่งวนเวียนสำหรับวงเวียนเพื่อการพักอาศัยเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

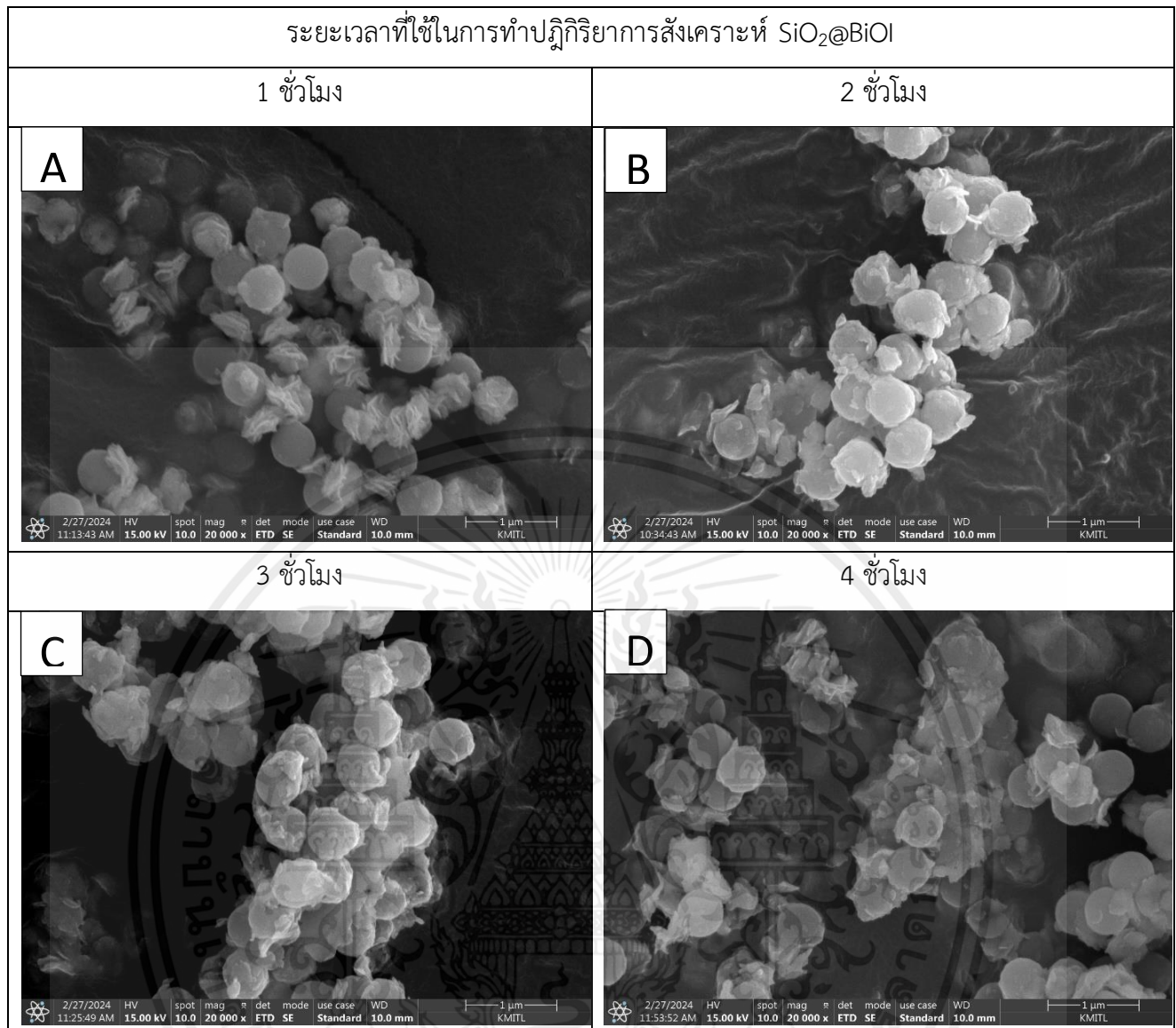
ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาต่อตามธรรมชาติของอนุภาค BiOI จะเลือกที่จะรวมกลุ่มกันเองมากกว่าไปรวมกลุ่มกันบนผิวของ SiO_2 และเกาะกันจนเป็นอนุภาค BiOI ขนาดใหญ่ที่จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแยกลง จากรูปที่ 18 อนุภาคที่ได้จากสัดส่วน 1:1 มีปริมาณของ BiOI อิสระจับกลุ่มกันเองเป็นจำนวนมาก ในขณะที่อัตราส่วน 3:1 ที่สังเคราะห์ด้วยสภาวะเดียวกันมีปริมาณของ BiOI อิสระน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดย BiOI ส่วนใหญ่เกาะอยู่บนพื้นผิวของ SiO_2 ดังนั้นการปรับอัตราส่วนให้เป็น 3:1 ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ $\text{SiO}_2@BiOI$ มากกว่าอัตราส่วน 1:1

4.2.4 ผลของ reaction time ในตัวทำละลาย Ethanol

นอกเหนือจากตัวทำละลาย additive และสัดส่วนของสารตั้งต้นต่อ SiO_2 แล้ว ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาก็มีผลต่อโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคที่ได้เช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

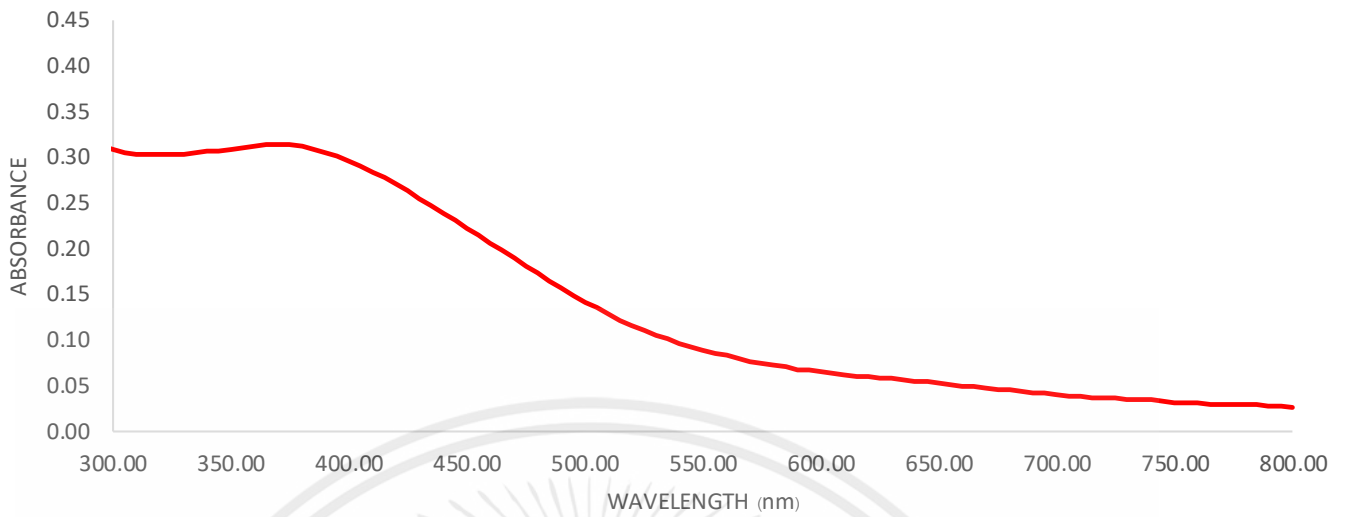


รูปที่ 19 รูป SEM ของอนุภาคที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-4 ชั่วโมงเรียงจาก A ถึง D ตามลำดับ

การปรับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์อนุภาค BiOI จะส่งผลต่อขนาดของอนุภาค BiOI ยิ่งใช้เวลานานขึ้นอนุภาค BiOI จะเกิดการ aggregation ส่งผลให้อนุภาคเกาะกันเป็นกลุ่มและมีขนาดใหญ่ขึ้น จากผลการทดลองปรับเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 1 – 4 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อนำอนุภาคไปตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า BiOI บนผิวของ SiO_2 ในรูปที่ 19 จากตัวอย่าง A ไป B จะเห็นได้ BiOI อิสระหายไปและไปเกาะกลุ่มทับซ้อนกันอยู่บน BiOI ที่อยู่บนผิว SiO_2 แทนแต่ในขณะที่ตัวอย่าง C และ D ไม่มีความแตกต่างจาก B อันเนื่องมาจากการปรับสัดส่วนในขั้น 4.2.3 ซึ่งลดปริมาณของ BiOI อิสระ ดังนั้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ ต่อ SiO_2 ต่อโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ที่ 1:1 ระยะเวลาที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยา คือ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 สมบัติทางแสงของอนุภาค $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$

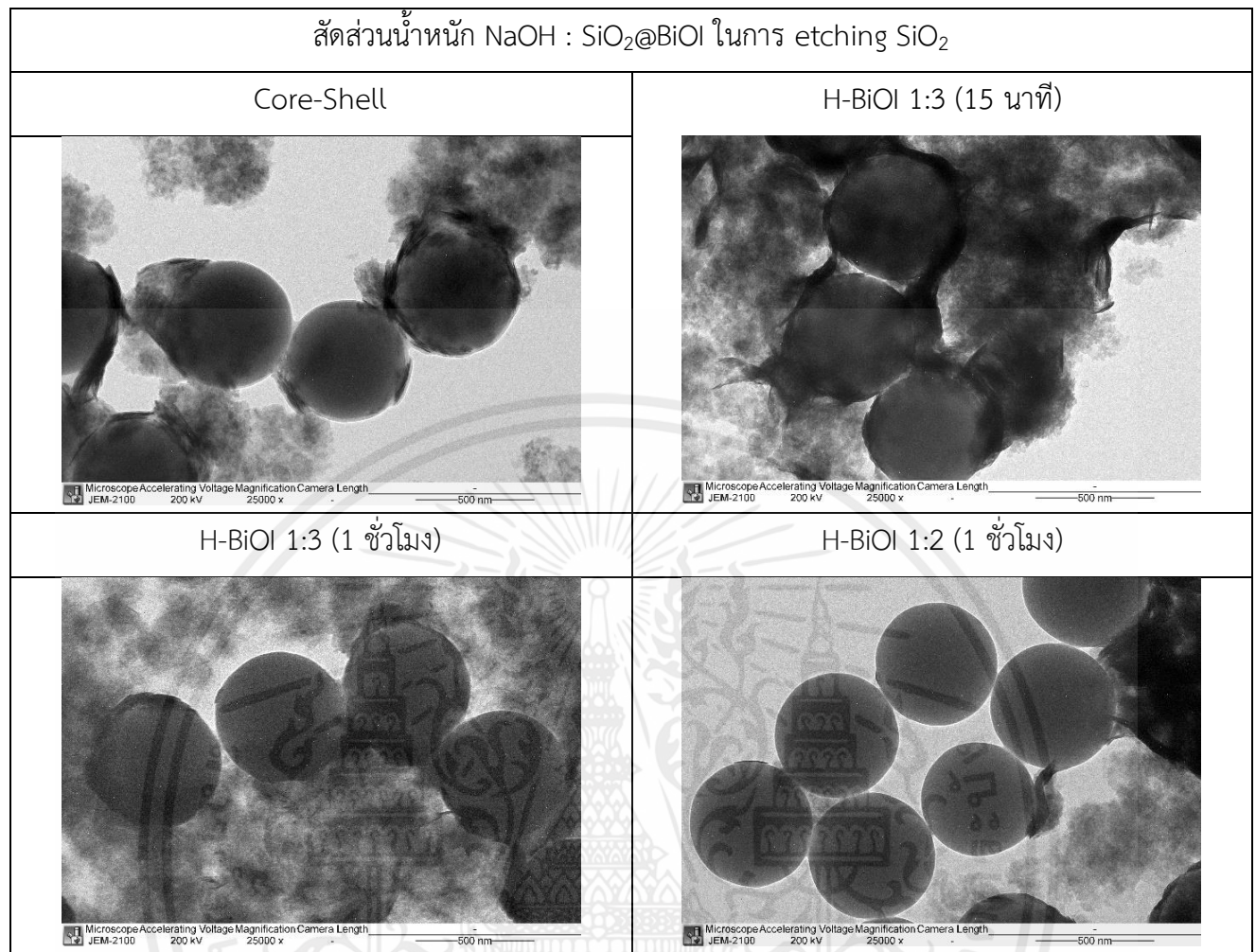


รูปที่ 20 แสดงผลการดูดกลืนแสงของอนุภาค $\text{SiO}_2@\text{BiOI}$ ที่สังเคราะห์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

จากกราฟพบ peak การดูดกลืนแสงในช่วง 300-500 nm ซึ่งอยู่ในช่วงความกว้างของแสงที่มองเห็นได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Yumei Su และคณะ [20] ที่ได้ทำการศึกษาช่วง peak ที่อนุภาค BiOI สามารถดูดกลืนแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของการกำจัดแกนกลาง SiO₂ ออกจาก SiO₂@BiOI



รูปที่ 21 รูป TEM ของอนุภาค SiO₂@BiOI ก่อนและหลัง etching ตามสถานะต่างๆ

จากรูปที่ 21 อนุภาค SiO₂@BiOI ที่ถูกนำไป etching โดย NaOH ไม่ได้ส่งผลต่อการสกัด SiO₂ แต่พบว่าการละลาย NaOH ทำปฏิกิริยากับ BiOI บนผิวของ SiO₂ ละลายสารเคลือบออกและกลายเป็น BiOI อิสระ ไม่เกิดอนุภาค H-BiOI ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและพัฒนาอนุภาคนาโนสำหรับย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงที่มองเห็นได้ สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโน $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ขึ้นมาได้สำเร็จโดยใช้หลักการสังเคราะห์อนุภาค BiOI ลงบนผิวของ SiO_2 จากการทดลองเคลือบสารละลาย BiOI ผ่านการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันพบว่าตัวทำละลาย Ethanol ส่งผลให้สามารถเคลือบ BiOI ลงบนผิวได้ดีกว่าตัวทำละลายที่เป็นน้ำอันเป็นผลจากสภาพความเป็นขั้วของ Ethanol ที่ต่ำกว่าน้ำ ทว่าการเคลือบก็ยังไม่สม่ำเสมอ ต่อมาจึงได้มีการเลือกสาร additional เป็น PVP และ PEG เพื่อช่วยในการเคลือบสาร BiOI ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเติม coating agent ลงในปฏิกิริยาพบว่า BiOI เริ่มเกาะตัวอยู่บนผิวของ SiO_2 มากขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ แต่การใช้ coating agent เป็น PVP ให้ผลการเคลือบที่ดีกว่า PEG คาดว่าเป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนในสาร PVP ที่ดีกว่าพันธะไฮดรอกซิลใน PEG หลังจากที่ได้สภาวะการเคลือบที่ค่อนข้างดีแล้วแต่ยังคงมี BiOI อิสระในระบบเป็นจำนวนหนึ่งอยู่ ถัดมาได้ทำการปรับสัดส่วนโดยน้ำหนัก $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) : \text{SiO}_2$ ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจากเดิม 1:1 เป็น 3:1 ส่งผลให้ปริมาณ BiOI อิสระในระบบลดลง ซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว BiOI จะเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าเกาะอยู่บนผิวของ SiO_2 การลดปริมาณ BiOI อิสระส่งผลให้ BiOI ไปเกาะซ้อนทับกันกับ BiOI ที่อยู่บนผิวของซิลิกามากขึ้น ต่อไปได้ทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาพบว่าที่เวลาดั้งเดิม 2 ชั่วโมงขึ้นไปอนุภาคที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกันอันเนื่องมาจากการปรับสัดส่วนในขั้นก่อนหน้า ดังนั้นการสังเคราะห์ที่มีตัวทำละลายเป็น Ethanol ใช้สาร coating agent เป็น PVP และมีสัดส่วนโดยน้ำหนัก $(\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}) : \text{SiO}_2$ เป็น 1:1 จะใช้เวลาทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 2 ชั่วโมง หลังจากได้อนุภาค $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ได้ทดลองนำไป etching โดยใช้ NaOH แต่พบว่า NaOH เข้าไปทำปฏิกิริยากับ BiOI บนผิวและละลาย BiOI ออกเป็น BiOI อิสระมากกว่าจะไปกำจัด SiO_2 ออกและสร้างอนุภาคนาโน H-BiOI ทว่าการนำ $\text{SiO}_2@ \text{BiOI}$ ที่สังเคราะห์ได้หาสมบัติการดูดกลืนแสงพบว่าอยู่ที่ช่วง 300-500 nm อยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ซึ่งถือว่าตรงวัตถุประสงค์ส่วนหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในส่วนของการ etching ซึ่งตัวของ NaOH ได้เข้าไปทำปฏิกิริยาละลาย BiOI ออกจากผิว ดังนั้นหนทางอื่นในการทำ H-BiOI คาดว่าต้อง etching ตัว SiO_2 ก่อนทำการเคลือบสารละลาย BiOI
- การตรวจ FT-IR โดยใช้กรดปาล์มมิติกเป็นสารอินทรีย์และใช้ polyurethane เป็นสารเคลือบไม่สามารถทำบนแผ่นพลาสติกแทนกระจกสไลด์ได้เนื่องจาก peak ของกรดปาล์มมิติกจะซ้อนกับ peak ของแผ่นพลาสติกและไม่สามารถเห็นผลการทดลองได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กัญยาพร ไชยวงศ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ขจรศักดิ์ โสภากาจารย์, “Utilization of solar - Photocatalytic process for cascade reactor to treat methylene blue in wastewater”, 2004, p. 2-3.
- [2] Aleksandra B. Djurišić, Yanling He, and Alan M. C. Ng, “Visible-light photocatalysts: Prospects and challenges”, APL Materials, 2020, Vol. 8, Issue 3, p. 2-6, <https://doi.org/10.1063/1.5140497>
- [3] Nasir Shehzad , Muhammad Tahir , Khairiraihanna Johari, “A critical review on TiO₂ based photocatalytic CO₂ reduction system: Strategies to improve efficiency”, Journal of CO₂ Utilization, 2018, vol. 26, p. 107-110, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.04.026>
- [4] Wen Lai Huang , Qingshan Zhu, “Structural and electronic properties of BiOX (X = F, Cl, Br, I) considering Bi 5f states”, Computational Materials Science, Vol. 46, Issue 4, 2009, p. 1076-1084, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.05.016>
- [5] Malathi Arumugam, Myong Yong Choi, “Recent progress on bismuth oxyiodide (BiOI) photocatalyst for environmental remediation”, Journal of Industrial and Engineering Chemistry , Vol. 81, 2020, P. 237-268, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.09.013>
- [6] Xin Xiao and Wei-De Zhang, “Facile synthesis of nanostructured BiOI microspheres with high visible light-induced photocatalytic activity”, Journal of Materials Chemistry , Issue 28, 2010, p. 5866-5870 <https://doi.org/10.1039/C0JM00333F>
- [7] Wen-Wu Dai and Zong-Yan Zhao, “Electronic structure and optical properties of BiOI as a photocatalyst driven by visible light”, Catalysts, 2016, p. 1-4 <https://doi.org/10.3390/catal6090133>
- [8] Zixian Jia , Jiantao Li , Lin Gao , Dezheng Yang and Andrei Kanaev, “Dynamic light scattering: A powerful tool for in situ nanoparticle sizing”, Colloids and Interfaces, 2023, p. 1-7 <https://doi.org/10.3390/colloids7010015>
- [9] Jiexiang Xia, Sheng Yin, Huaming Li, Hui Xu, Yongsheng Yan, and Qi Zhang, “Self-Assembly and enhanced photocatalytic properties of BiOI hollow microspheres via a reactable ionic liquid”, Langmuir article , Volume 27, Issue 3, 2011, P.863-1244, <https://doi.org/10.1021/la104054r>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Kuaixia Ren, Kun Zhang, Jie Liu, Hongde Luo, Yunbo Huang and Xibin Yu, “Controllable synthesis of hollow/flower-like BiOI microspheres and highly efficient adsorption and photocatalytic activity”, *CrystEngComm*, Issue 13, 2012, p. 4384–4390, <https://doi.org/10.1039/c2ce25087j>
- [11] Xiaoqing Lu, Qin Zhou, Amei Cao, Aili Wang, and Hengbo Yin, “Preparation of hollow SiO₂@BiOI nanocomposites and their photocatalytic performance in ammonia nitrogen degradation”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 20, Number 10, 2020, p. 6368-6375 <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18507>
- [12] Xiaowei Shi, Zaizhu Lou, Peng Zhang, Mamoru Fujitsuka, and Tetsuro Majima, “3D-Array of Au-TiO₂ Yolk-Shell as plasmonic photocatalyst boosting multi-scattering with enhanced hydrogen evolution”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8, 46, p. 31738–31745, <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12940>
- [13] Rafael S. Fernandes, Ivo M. Raimundo Jr., M. Fernanda Pimentel, “Revising the synthesis of stöber silica nanoparticles: A multivariate assessment study on the effects of reaction parameters on the particle size”, *Colloids and Surfaces A*, Vol. 577, 2019, P. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.053>
- [14] Xiaoqing Lu, Qin Zhou, Amei Cao, Aili Wang, and Hengbo Yin, “Preparation of hollow SiO₂@BiOI nanocomposites and their photocatalytic performance in ammonia nitrogen degradation”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 20, Number 10, 2020, p. 6368-6375, <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18507>
- [15] Hongxuan Qiu, Run Zhang, Yichang Yu, Rong Shen, Hongwen Gao, “BiOI-on-SiO₂ microspheres: A floating photocatalyst for degradation of diesel oil and dye wastewater”, *Science of the Total Environment*, Volume 706, 2020, p. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136043>
- [16] Murthi S. Kandanapitiye, Min Gao, Joseph Molter, “Synthesis, characterization, and X-ray attenuation properties of ultrasmall BiOI nanoparticles: Toward renal clearable particulate CT contrast agents”, *Inorganic chemistry*, Vol. 53, Issue 19, 2014, p. 9983-10780, <https://doi.org/10.1021/ic5011709>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Ji Bong Joo , Ilkeun Lee , Michael Dahl , Geon Dae Moon , Francisco Zaera , and Yadong Yin, “Controllable synthesis of mesoporous TiO₂ hollow shells: Toward an efficient photocatalyst”, *Advanced functional materials* , Vol. 23, Issue34, 2013, P. 4246-4254, <https://doi.org/10.1002/adfm.201300255>
- [18] Naphat Thiwakornkitkul and Teeraporn Suteewong, “Effect of morphology of titanium dioxide nanoparticles on photocatalytic activity”, *Applied Sciences and Technology* 2019, Sci. Eng. 639 012021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/639/1/012021>
- [19] Weihong Gao & Muriel Rigout & Huw Owens, “Facile control of silica nanoparticles using a novel solvent varying method for the fabrication of artificial opal photonic crystals”, *Journal of Nanoparticle Research*, Volume 18, article number 387, (2016), DOI 10.1007/s11051-016-3691-8
- [20] Yumei Su , Xiang Yu , Xionghui Fu, “Embedding Ag nanoparticles to construct BiOI/Ag/PANI with enhanced photoelectrocatalytic activity: A demonstration of the switch from type-II to Z-scheme”, *Electrochimica Acta* Volume 344, 1 June 2020, 136144, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136144>