



การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโดยการใช้นุภาคทองคำนาโนเติมใน
ไทเทเนียมไดออกไซด์



วีรศักดิ์ จอมกิตติชัย
พงศ์เทพ จันทร์สันเทียะ
วารุณี จอมกิตติชัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ปีงบประมาณ 2559
พ.ศ.2561

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่ให้ทุนสนับสนุนงบประมาณการทำวิจัยในครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณหลักสูตรสาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งอุปกรณ์และสถานที่การทำวิจัยที่ให้ความอนุเคราะห์ ตลอดเวลาในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณะวิจัยทุกท่านได้แก่ อาจารย์ ดร.พงศ์เทพ จันทร์สันเทียะ และอาจารย์ ดร. วารุณี จอมกิตติชัย ที่ร่วมกันทำงานวิจัยในเรื่องนี้ให้สำเร็จไปด้วยดี และต้องขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ณัฐกฤตา บุณณประกอบ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในเรื่องต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ฝ่ายต่างๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ผู้ทำวิจัย



โครงการวิจัย การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโดยการใช้อุณหภูมิของนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์

ชื่อผู้วิจัย นายวีรศักดิ์ จอมกิตติชัย (หัวหน้าโครงการวิจัย)

นายพงศ์เทพ จันทร์สันเทียะ (ผู้ร่วมวิจัย)

นางวารุณี จอมกิตติชัย (ผู้ร่วมวิจัย)

สถาบัน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

ปีที่ทำวิจัย 2559

บทคัดย่อ

อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยทองที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 2.0 และ 3.0 โดยโมล ได้สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ตามลำดับ คุณสมบัติเฉพาะและขนาดอนุภาคได้ทำการวิเคราะห์อนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแสดงให้เห็นพื้นผิวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมด้วยทอง การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์สามารถยืนยันธาตุ ไทเทเนียม ออกซิเจน และ ทองในอนุภาคผงนาโน การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นโครงสร้าง อะนาเทสและรูไทร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านชนิดกำลังขยายสูงแสดงให้เห็นโลหะเกาะอยู่บนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสมีรูปร่างแบบกลม สำหรับขนาดทองที่เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

จากนั้นทำการศึกษาการสลายตัวของโรดามีน บี ด้วยอนุภาคนาโนทองเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ร้อยละ 1.00 โดยโมลของทองเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการย่อยสลายโรดามีน บี คือใช้ตัวเร่ง 0.6 กรัมต่อลิตร ในเวลา 120 นาที

Research Title Enhanced photocatalytic degradation of dyes by using gold nanoparticles loaded titanium dioxide

Authors Mr. Weerasak Chomkitichai (Researcher)
Mr. Pongthep Jansanthea (Co-researcher)
Mrs. Warunee Chomkitichai (Co-researcher)

Year of research 2016

Abstract

The 0.50, 0.75, 1.0 and 3.0 mol% gold (Au)-loaded TiO₂ nanoparticles were successfully synthesized by flame spray pyrolysis (FSP) technique. The morphology and particle sizes were analyzed by using scanning electron microscopy (SEM) and showed surface morphology of Au-loaded TiO₂ nanoparticles. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) can be confirmed to be titanium, oxygen, and gold element in nanoparticles. X-ray diffraction (XRD) patterns can be confirmed to be the anatase and rutile phases of TiO₂. High resolution transmission electron microscopy (HRTEM) showed that gold nanoparticles deposited on larger TiO₂ nanoparticles. It was found that nanoparticles synthesized by FSP showed spherical and platelet morphologies. For gold-loaded TiO₂ nanoparticles, very small metal nanoparticles were uniformly dispersed on the surface of larger TiO₂ particles.

The photocatalytic degradation of rhodamine B over gold-loaded titanium dioxide powder under UV light irradiation was studied. The influence of the amount of gold-loaded titanium dioxide powder and irradiation time was investigated. The concentration of rhodamine B was measured using UV-Vis spectrometry (UV-Vis). The optimum condition was obtained at 0.6 g.L⁻¹ for the amount of 1.0 mol % gold- loaded titanium dioxide powder and irradiation time was 120 min.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	3
2.2 อนุภาคทองนาโน	6
2.3 พลังงานแสง	8
2.4 วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.5 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	15
3.1 สารเคมี	15
3.2 อุปกรณ์เครื่องแก้ว	15
3.3 เครื่องมือที่ใช้	16
3.4 การเตรียมสาร	16
3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาค ทองนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	19
3.6 การทดสอบการย่อยสลายสีย้อมสารละลายโรดามีน บี ด้วยปฏิกิริยา แคทาไลติกของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองนาโนเติมใน อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	19
บทที่ 4 ผลการวิจัย	21
4.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์และ อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)	21
4.1.2 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) และเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (energy dispersive X-ray spectroscopy with SEM instrument, SEM-EDS)	23
4.1.3 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM)	26
4.1.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET)	27
4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic activity) ของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	28
4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณร้อยละของอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	28
4.2.2 ผลการศึกษาการใช้ปริมาณของอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	29
4.2.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	30
บทที่ 5 สรุป อธิบายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์	32
5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน บี	33
5.3 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	38
ประวัติผู้วิจัย	45

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า	
2.1	โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 เฟส ได้แก่ รูไทล์ (rutile) (ก) อะนาเทส (anatase) (ข) และบรูกไคท (brookite) (ค)	3
2.2	กระบวนการเมื่อสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง	4
2.3	กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	6
2.4	ภาพแสดงการเกิดเซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ โดยแสดงการสั่นของกลุ่มอิเล็กตรอนในแถบเหนี่ยวนำ เมื่อมีแสงจากภายนอกส่องผ่าน	6
2.5	การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีลักษณะรูปร่างต่างๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน	7
2.6	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	9
2.7	องค์ประกอบหลักของรังสียูวี	9
3.1	แผนภาพการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเฟลมสเปร์ไพโรไลซิส	17
3.2	รูปแบบการจัดอุปกรณ์ทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกของการย่อยสลายสีย้อมสารละลายโรดามีน บี ด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	20
4.1	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	22
4.2	ภาพถ่าย SEM อนุภาคนาโน TiO_2 (ก) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ (ข) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุไทเทเนียม (ค) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุออกซิเจน (ง)	24
4.3	ภาพถ่าย SEM ร้อยละ 1.0 โมล ของอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ (ข) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุไทเทเนียม (ค) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุออกซิเจน (ง) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุทอง (จ)	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า	
4.4	ภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กำลังขยาย 100,000 เท่า (ก) ร้อยละ 1.00 อนุภาคของนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 100,000 เท่า (ข) และร้อยละ 1.00 อนุภาคของนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 300,000 เท่า (ค)	26
4.5	แสดงผลการย่อยสลายโรดามีน บี ด้วยอนุภาคของนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	29
4.6	แสดงผลการศึกษาการใช้ปริมาณของร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคของนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	30
4.7	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของอนุภาคของนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี	31



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	15
3.2	แสดงรายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.3	สารละลายตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ด้วยเครื่องเพลมสเปร์โฟโรลิซิสของอัตราส่วน 0.5–3.0 โมลเปอร์เซ็นต์ของ อนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคไทเทเนียมนาโน	18
4.1	แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์	27



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

สีย้อมเป็นสารเคมีที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งการขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสิ่งเจือปนในน้ำที่เนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อม ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ โดยปล่อยน้ำทิ้งลงแม่น้ำลำคลองไม่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน เป็นสาเหตุทำให้น้ำเน่าเสียเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เป็นสาเหตุทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตาย เกิดกลิ่นเน่าเหม็นเป็นบริเวณกว้าง ทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ผู้ที่อาศัยอยู่ใกล้เคียงและผู้ที่ใช้แหล่งน้ำนั้นมีคุณภาพชีวิตต่ำ ชาวแหล่งอาหารตามธรรมชาติที่เคยจับสัตว์น้ำมาเป็นอาหารและต้องดมกลิ่นเน่าเหม็นจากน้ำเสีย ทำให้เกิดโรคต่างๆ ตามมา

องค์ประกอบของสีย้อมโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปเกลือ ซึ่งจะประกอบไปด้วยไอออนที่มีประจุบวกและประจุลบ สีย้อมจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สีย้อมที่เป็นด่าง (basic dye) และ สีย้อมที่เป็นกรด (acid dye) โดยไอออนตัวใดตัวหนึ่งจะเป็นตัวให้สี ไอออนตัวนี้จะต้องมีประจุตรงข้ามกับประจุในส่วนที่เหมาะสมกับเส้นใย ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง ฉะนั้นน้ำเสียจากโรงงานต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งอีกวิธีหนึ่งเริ่มเป็นที่สนใจใช้ในการกำจัดสีย้อมคือ การใช้โลหะออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการช่วยย่อยสลายสีย้อมให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทำให้ไม่ก่อมลพิษกับสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาและใช้กันแพร่หลาย สำหรับการบำบัดสารพิษอันตราย รวมไปถึงสีย้อมผ้าในโรงงานอุตสาหกรรมด้วย ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ (Photocatalytic) ซึ่งเป็นการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) หรือแสงวิสิเบิล (Visible) ใช้ในการกระตุ้นให้อนุภาคของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ให้ปลดปล่อยอนุภาคเรดิคัล (Radical) สามารถทำลายพันธะของสีย้อม โดยพบว่า การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงวิสิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแคตาไลสต์ (Catalyst) สามารถเพิ่มอัตราการเกิดสลายตัวของสีย้อมได้มากกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงวิสิเบิลเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียโดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกส์ อาศัยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงวิสิเบิล ร่วมกับสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กำจัดสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งยังสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ได้จากแหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่งที่ไม่เป็นอันตรายและเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการและสามารถนำมากำจัดสีย้อมได้เมื่อถูกแสง จะทำให้สีย้อมเกิดการสลายตัวกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Wetchakun, 2008) โดยคณะผู้วิจัยต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายสีย้อมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและไวขึ้น โดยการเติมอนุภาคทองนาโนบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งคุณสมบัติของอนุภาคทองนาโนสามารถเกิดพลาสมอนบนพื้นผิว (surface plasmon resonance) ของอนุภาคทอง (Buso, 2007; Pillai, 2010) ทำให้หลายงานวิจัยมีการนำอนุภาคทองนาโนเติมบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าในการเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การใช้อุณหภูมิทองนาโนเพิ่มประสิทธิภาพสารกึ่งตัวนำใน

การตรวจวัดแก๊ส (Chomkitichai, 2012; Manera, 2008) และในงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ (Gao, 2012; Ninsonti, 2013)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมผ้าโดยใช้ไทเทเนียมที่เติมอนุภาคทองคำนาโนในปริมาณต่างๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาปริมาณอนุภาคทองคำนาโนที่เหมาะสมเติมในไทเทเนียมเพื่อใช้ย่อยสลายสีย้อม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมของอนุภาคทองคำนาโนที่เติมในไทเทเนียมเพิ่มเมื่อเทียบกับไทเทเนียมที่ไม่ได้เติมอนุภาคทองคำนาโน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ขอบเขตด้านประชากร/ผู้ให้ข้อมูลหลัก/หน่วยทดลอง
แบบจำลองน้ำเสียสีย้อมในห้องปฏิบัติการและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อม
- 1.3.2 ขอบด้านตัวแปร/ขอบเขตด้านเนื้อหา
 - 1.3.2.1 ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมที่เติมและไม่เติมอนุภาคทองคำนาโนโดยใช้วิธีเฟลมสเปร์ยไพโรลิซิส
 - 1.3.2.2 ทำการหาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายน้ำเสียจากสีย้อมด้วย
 1. เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน สเปกโทรสโคปี
 2. เทคนิคการหาขนาดอนุภาค
 3. เทคนิคการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว
 4. เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบชนิดส่องผ่าน
 5. เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบชนิดส่องกราด
- 1.3.3 ขอบเขตด้านพื้นที่และระยะเวลาที่ทำการวิจัย
ขอบเขตด้านพื้นที่: จังหวัดอุดรดิตถ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมเพื่อลดผลกระทบการปล่อยน้ำเสียลงสู่สิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ย่อยสลายสีย้อม
- 1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้
- 1.4.4 เป็นฐานข้อมูลบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อลดผลกระทบน้ำเน่าเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมย้อมผ้า

บทที่ 2

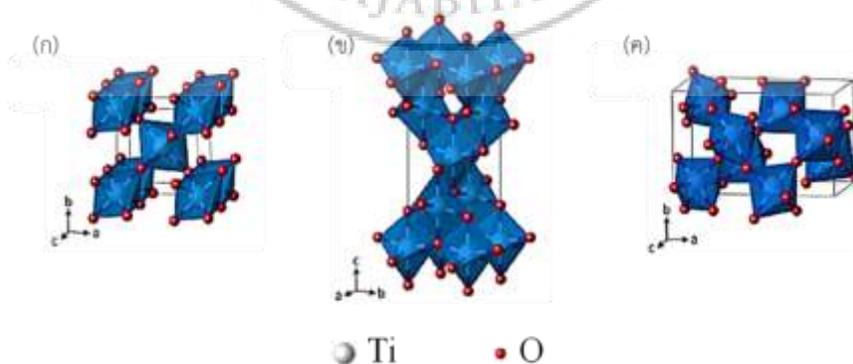
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้แสดงถึงข้อมูลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเติมอนุภาคทองคำโนในการย่อยสลายโรดามีน บี ได้เสนอดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania) ซึ่งเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชัน จัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก แต่มักจะอยู่ในรูปสารประกอบของแรและจะต้องสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งก็มีวิธีการแตกต่างกันไป ไทเทเนียมบริสุทธิ์มีเลขอะตอมคือ 22 ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนคือ $[\text{Ar}] 3d^2 4s^2$ และมีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิโคเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ 1667°C และ 3285°C ตามลำดับ ในขณะที่ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องคือ 4.50 g/cm^3 และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ $42.0 \mu\Omega/\text{cm}$ ลักษณะพิเศษของไทเทเนียมคือจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ(non-metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่งออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูงซึ่งสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ทางเคมีที่มักจะเกิดขึ้นมากที่สุด คือ $4+$ ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุดคือ โมเลกุลจำพวกไดออกไซด์และเตตระคลอไรด์เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น $4-$ ดังนั้นโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูป TiO_2 และ TiCl_4 เป็นส่วนใหญ่ (Landmann, 2012)

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีเฟส (phase) ที่สำคัญ 3 เฟสคือบรูคไคท์ (brookite) อะนาเทส (anatase) และรูไทล์ (rutile) ดังภาพที่ 2.1 แต่โอกาสที่จะเกิดเฟสบรูคไคท์นั้นมีน้อยมาก ซึ่งส่วนมากแล้วจะพบเฉพาะในลักษณะสองเฟสหลัง โดยแต่ละเฟสจะถูกนำไปใช้งานในด้านที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละเฟสจะมีการจัดเรียงตัวของออกไซด์ไอออน (TiO_6^{2-}) แตกต่างกัน จึงมีผลให้แต่ละเฟสมีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน และโดยทั่วไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์นั้นจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติแต่จะได้อาจมาจากการสกัดแร่ อิลเมนไนท์ (Ilmenite)



ภาพ 2.1 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 เฟส ได้แก่ รูไทล์ (rutile) (ก) อะนาเทส (anatase) (ข) และบรูคไคท์ (brookite) (ค) (Landmann, 2012)

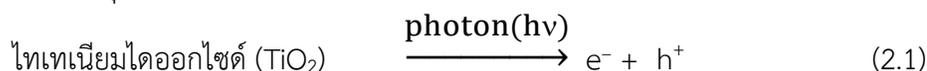
เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิด ไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานของแถบช่องว่างพลังงานความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้ นั่นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (excited electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบวาเลนซ์ (valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว ดังรูป 2.2



ภาพ 2.2 กระบวนการเมื่อสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง (ตะวัน สุขน้อย, 2543)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ 2.1

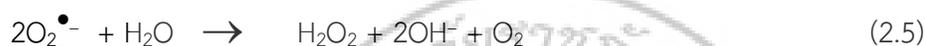
ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



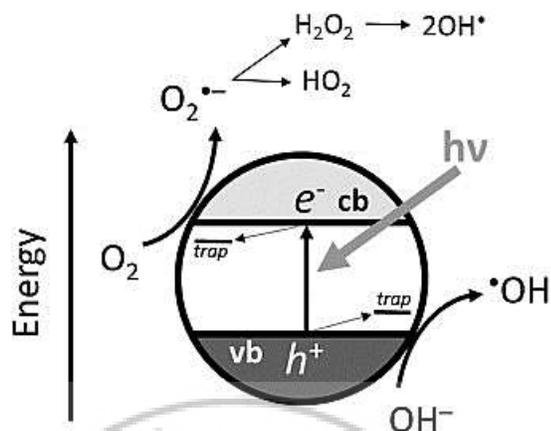
ปฏิกิริยารีดักชัน



ปฏิกิริยาการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole recombination)



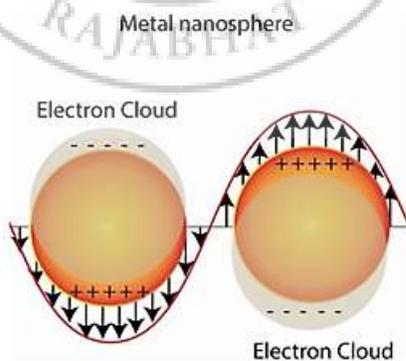
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งมีโฮล จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยที่โฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล (hydroxyl radical, OH^\bullet) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ 2.2–2.3 ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ อีกทางด้านหนึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แถบการนำไฟฟ้า คืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (superoxide radical, $\text{O}_2^{\bullet-}$) เป็นตัวรีดิวซ์ ดังสมการ 2.4–2.6 ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ นอกจากนั้นแล้วเมื่อซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลทำปฏิกิริยาต่อจะสามารถเกิดไฮดรอกไซด์แรดิคัลขึ้นได้และการรวมตัวกันใหม่ ของอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดเป็นพลังงานความร้อนดังสมการ 2.7 ผลกระทบที่สุดท้ายจากการย่อยสลายสารอินทรีย์คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (พฤษชัยพงษ์วัน, 2555) ดังแสดงในภาพ 2.3 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ



ภาพ 2.3 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (Vena, 2017)

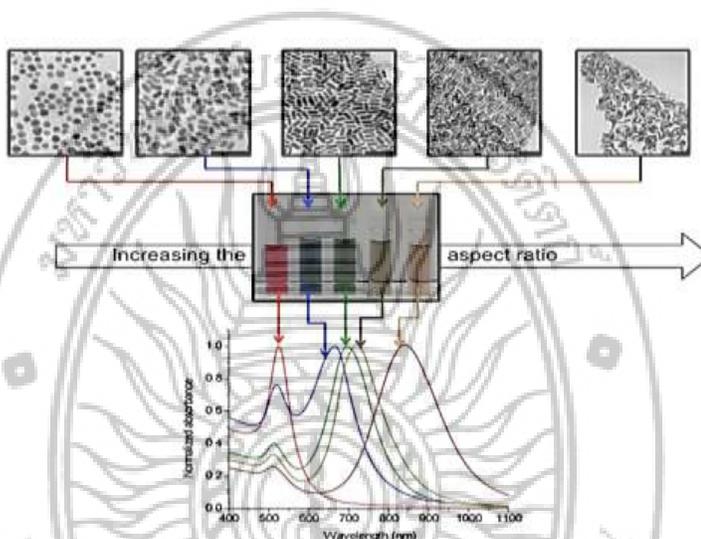
2.2 อนุภาคทองคำนาโน

ทองคำเป็นธาตุที่รู้จักกันโดยทั่วไป โดยมีลักษณะสมบัติที่เป็นธาตุเฉื่อย มักไม่ทำปฏิกิริยา และได้นำมาใช้กันในการแพทย์ในการเป็นสารป้องกันการอักเสบของเนื้อเยื่อในการรักษาโรค เมื่อทองคำมีขนาดเล็กลงในระดับนาโนที่มีขนาดตั้งแต่ 5 นาโนเมตรขึ้นไป อนุภาคนาโนของทองคำ ซึ่งมักเรียกกันสั้นๆ ว่า ทองคำนาโน เป็นอนุภาคทองที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากโลหะทองที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้อนุภาคทองคำนาโนมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างไปจากทองปกติ (Turner, 2008; Tsoli, 2005) ได้แก่ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเคมีน้ำไฟฟ้าได้ดีและมีสีที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของอนุภาค เช่น แดง ฟ้ำเขียว หรือน้ำตาล ซึ่งไม่ได้ปรากฏเป็นสีทองเหมือนกับทองคำทั่วไป สีที่แตกต่างนี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในแถบของ conduction ในอนุภาคนาโนโลหะกับสนามไฟฟ้าที่มาจากแสงที่ตกกระทบ จะเกิดการสั่นของอนุภาค ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดของอิเล็กตรอนใน conduction band เกิดขึ้น ซึ่งการแทรกสอดนี้เรียกว่า โลคัลไรด์ เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ (localized surface plasmon resonance, LSPR) ดังแสดงในภาพ 2.4 (http://web.eng.nu.ac.th/eng2_0_1_2/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=9&p_id=258, 04/14/2561)



ภาพ 2.4 ภาพแสดงการเกิดเซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ โดยแสดงการสั่นของกลุ่มอิเล็กตรอนในแถบเหนี่ยวนำ เมื่อมีแสงจากภายนอกส่องผ่าน (ที่มา: ปรับปรุงจาก Cobley, 2011)

ซึ่ง LSPR จะสามารถถ่ายทอระหว่างรอยต่อของโลหะและไดอิเล็กทริก ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดอยู่บริเวณเปลือกชั้นนอกของโลหะนาโน เพราะแสงจากภายนอกไม่สามารถส่องทะลุผ่านเข้าไปภายในวัสดุได้ (Coble et al., 2011) แสงที่ตกกระทบที่พื้นผิวของวัสดุจะทำอันตรกิริยากับวัสดุสองแบบคือ การดูดกลืน และการกระเจิง โดยแสงที่ถูกดูดกลืนจะทำให้เกิดการสั่นภายในผลึกของวัสดุนาโนและจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายใต้สเปคตรัมของแสงวิซิเบิล และแสงใกล้รังสีเหนือม่วง โดยการเปล่งแสงสีต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของอนุภาคนาโนของทองคำ เช่น ทองคำในรูปของแท่งนาโนจะสามารถดูดซับแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 800-1200 นาโนเมตร เป็นต้น การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีรูปร่างแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.5 (Alkilany, 2010)



ภาพ 2.5 การเปล่งแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่มีลักษณะรูปร่างต่างๆ ตามความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (Alkilany, 2010)

ในช่วงระดับความยาวคลื่น 800–1,200 นาโนเมตรนี้ วัสดุหลายชนิดรวมถึงน้ำไม่สามารถดูดซับแสงได้ โดยหากร่างกายได้รับแสงความยาวคลื่นนี้ แสงจะสามารถส่องทะลุมายังเนื้อเยื่อภายในได้ โดยที่อนุภาคนาโนทองคำจะสามารถดูดซับแสงเหล่านี้ได้ จากลักษณะสมบัตินี้จึงได้มีการนำอนุภาคนาโนทองคำไปใช้งานทางการแพทย์ทั้งในส่วนของ การรักษาพยาบาล และการนำไปใช้เป็น imaging agent ในการสร้างภาพอวัยวะได้ (Jain, 2008; Lal, 2008; Murphy et al., 2008; Skrabalak et al., 2008) เช่น การใช้แท่งนาโนทองคำในการรับแสงที่ความยาวคลื่น 757 นาโนเมตร ในการสร้างภาพของเนื้อเยื่อของหนูที่มีความลึกลงไปใต้ผิว 4 เซนติเมตร เป็นต้น (Eghtedari et al., 2007) นอกจากนี้ยังได้มีการนำอนุภาคนาโนทองคำไปใช้ในการตรวจวัดด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy ซึ่งใช้ในการตรวจสอบภาคตัดขวางของโมเลกุลได้อีกด้วย (Anker et al., 2008) ซึ่งได้มีการพัฒนาเครื่องมือเรียกว่า Surface-enhanced Raman Spectroscopy (SERS) ได้นำไปใช้ในการตรวจสอบการเกิดก้อนเนื้อในหนูที่ยังมีชีวิตอยู่ได้ (Qian et al., 2008) และได้มีการพัฒนาเทคนิคในการเป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดระดับน้ำตาลกลูโคสในหนูอีกด้วย (Anker et al., 2008) ในอุตสาหกรรมเคมี อนุภาคนาโนทองคำได้ถูกนำมาใช้ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี โดยใช้ลักษณะสมบัติของอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะ จากการแทรกสอด

ของอิเล็กตรอนจาก conduction band ของทองคำเมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ทำให้อนุภาคนาโนทองคำมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี

2.3 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการเร่งด้วยแสงนั้น เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (photon Energy) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.8

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.8$$

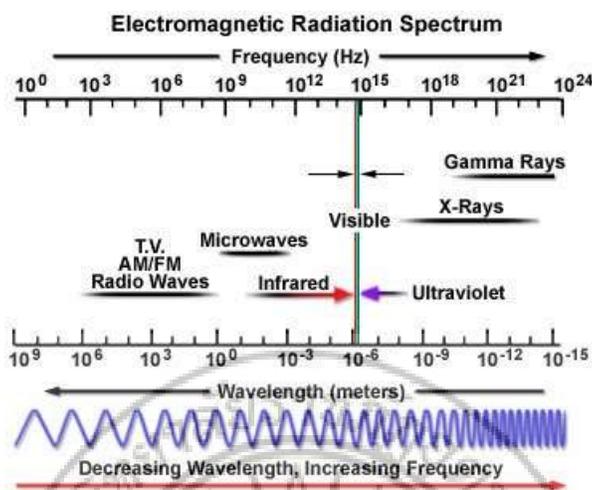
เมื่อ E คือพลังงานควอนตัม (quantum energy) (จูล)
 h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} (จูล/วินาที)
 ν คือความถี่ของคลื่นแสง (เฮิรตซ์)
 λ คือความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)
 c คือความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 (เมตร/วินาที)

ภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ภาพที่ 2.7 แสดงสเปกตรัมของรังสียูวี ซึ่งเป็นที่สนใจในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) อยู่ในช่วง 100–400 นาโนเมตรสำหรับความยาวคลื่นแสงที่คนมองเห็น (visibleหรือแสงขาว) อยู่ในช่วง 380–750 นาโนเมตร รังสียูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ

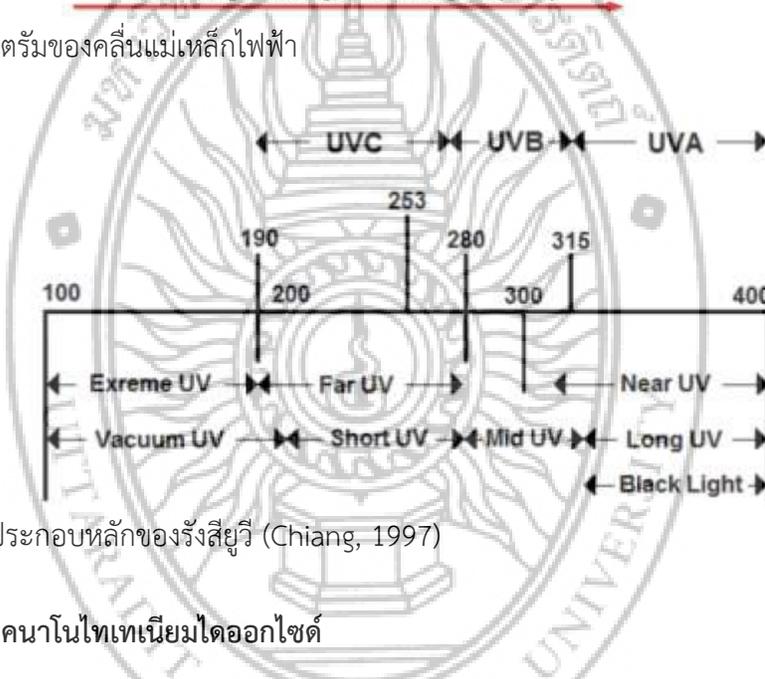
- 1) คลื่นยาว (long wave UV, UVA) อยู่ในช่วง 400–320 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (middle wave UV, UVB) อยู่ในช่วง 320–280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (short wave UV, UVC) อยู่ในช่วง 280–200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตรมีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง vacuum UV ซึ่งจะถูกลดทอนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงยูวีและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10–35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัดในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตตาไลสต์นั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์แถบช่องว่างพลังงาน 3.0–3.2 eV ดังนั้น การให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของแสง UV ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกมีช่วงแสงที่เป็น UV ในปริมาณน้อยมาก คือ เฉพาะช่วง 350–400 นาโนเมตรเท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟ UV ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก (พลชัย พงษ์วัน, 2555)



ภาพ 2.6 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพ 2.7 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี (Chiang, 1997)

2.4 วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

2.4.1 วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)

วิธีการตกตะกอนจะอาศัยวิธีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือความดันของสารละลายเพื่อให้เกิดมีตะกอนขึ้น ซึ่งขบวนการหลักที่เกิดขึ้นในการตกตะกอนจะประกอบด้วย การเกิดนิวเคลียสและการเติบโตโดยทั่วไปแล้วถ้าระบบมีอัตราการเกิดนิวเคลียสสูง แต่มีอัตราการเติบโตช้าๆ อนุภาคของตะกอนที่ได้ออกมาจะมีขนาดเล็ก ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่เตรียมได้ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิ พีเอช และอัตราการผสมสารละลาย เป็นต้น (สุพล อนันตา, 2544)

2.4.2 วิธีซอล-เจล (Sol-gel method)

ในการเตรียมสารด้วยวิธีนี้เริ่มจากการใช้สารตั้งต้นที่อยู่ในสภาพ สารละลายซึ่งผสมเข้ากันได้เป็นอย่างดี และสามารถทำปฏิกิริยากันในระดับโมเลกุล ทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาว หรือเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า ซอล (sol) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะ

สูงชันจนกระทั่งกลายเป็นสารกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เรียกว่า เจล (gel) จากนั้นจึงนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งสนิท แล้วบดให้เป็นผงละเอียดก่อนจะนำไปเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป วิธีการเตรียมซอล-เจล จะทำให้ได้ผงที่มีขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามสารตั้งต้นที่นำมาใช้ส่วนใหญ่มีราคาสูงและวิธีการค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวิธีมิกซ์ออกไซด์ (สุพล อนันตา, 2544)

2.4.3 วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)

วิธีการเตรียมสารแบบไฮโดรเทอร์มอล เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการเตรียมสารต่างๆ เนื่องจากผงที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอทั้งองค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาค การเตรียมด้วยวิธีนี้สามารถกระทำได้เพียงขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิและความดันสูงปานกลางอยู่ในช่วงประมาณถึง 20 เมกะปาสกาล โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ และมีอุณหภูมิการซินเตอร์ต่ำ เมื่อเทียบกับผงที่เตรียมได้จากกระบวนการเตรียมทางเคมีอื่นๆ เพราะขนาดอนุภาคของผงที่เตรียมได้มีขนาดเล็กกว่า แต่วิธีการเตรียมแบบนี้จะต้องมีการควบคุมค่าพีเอช อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารที่เข้าไปทำปฏิกิริยากันในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงตามต้องการ (ละอองนวล ศรีสมบัติ, 2544)

2.4.4 วิธีการระเหยแห้ง (evaporation to dryness)

วิธีการระเหยสารให้แห้ง จะอาศัยวิธีการระเหยสารที่เป็นตัวทำละลาย หรือสารที่ไม่ต้องการในสารละลายออกไป จนกระทั่งเหลืออยู่แต่ตะกอนของสารที่ต้องการ ซึ่งวิธีการนี้จะเริ่มต้นจากการนำเอาสารละลายของโลหะต่างๆที่ต้องการมาผสมกัน โดยเชื่อว่าส่วนผสมเหล่านี้จะเกิดการผสมกันในระดับโมเลกุลเพราะสารทั้งหมดอยู่ในเฟสเดียวกัน เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายผสมจนถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะช่วงหนึ่ง ตัวทำละลายหรือสารที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดออกไป เหลือไว้แต่เพียงตะกอนของสารที่ยังคงมีส่วนผสมในระดับโมเลกุลเหมือนเดิม วิธีการนี้จึงน่าที่จะให้ผลที่ดีกว่าผลที่เตรียมด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ (จินดา ศิริตา, 2548)

2.4.5 วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid-state reaction)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากเตรียมได้ง่าย โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็งตามปริมาณที่ต้องการมาบดคลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจใช้เครื่องเขย่าหรือเครื่องบด จากนั้นนำไปอบให้แห้ง แล้วเผาที่อุณหภูมิและเวลาตามที่ต้องการ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ผลผลิตที่ได้มักมีความบริสุทธิ์ต่ำ ได้สารเนื้อหยาบ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และอาจมีสารประกอบรูปอื่นๆ เจือปนจากสารตั้งต้นหรือจากชุดอุปกรณ์ที่ทำการบด เช่น อะลูมินา เป็นต้นสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของสารที่ต้องการเตรียม โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้า (จินดา ศิริตา, 2548)

2.5 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ (2011) ศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีซอล-เจลและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส โดยใช้ tetrabutyl titanate เป็นสารตั้งต้น จากนั้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 150–300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าโครงสร้างเฟสเป็นอะนาเทสทั้งหมด การวิเคราะห์แถบช่องว่างพลังงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวีวิสดีฟฟิวิสรีเฟรคแทนสเปกโทรโฟโตเมตรี พบว่าที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสมีแถบช่องว่างพลังงานต่ำที่สุดคือ 2.79 eV เมื่อนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาแคลไซน์ที่อุณหภูมิโดยขึ้นกับเวลาคือ 5 นาทีจนถึง 15 ชั่วโมง พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้

ประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange, MO) ภายใต้แสงวิสิเบิลจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) กำลัง 300 วัตต์ ที่มีตัวกรองความยาวคลื่นให้เหลือเฉพาะความยาวคลื่นที่มากกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถย่อยสลาย MO ได้สูงสุดร้อยละ 70 เมื่อใช้เวลาเคลไซน์เพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลง จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ 255.4 m²/g และจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 9.0 นาโนเมตร

Xia และคณะ (2008) ได้ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปโครงสร้างผลึกแบบรูโพลีที่เจือด้วยทองแดง เตรียมโดยเทคนิค simple aqueous -phase ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และเจือด้วยทองแดงในปริมาณร้อยละ 1-20 โดยอะตอมโดยสารตั้งต้นที่ใช้คือ TiCl₄ และ CuCl₂ สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์และทองแดงตามลำดับ จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ทุกตัวอย่างมีโครงสร้างเป็นแบบรูโพลีเท่านั้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือทองแดงตัวอย่างจะมีความเป็นผลึกสูงขึ้นและมีขนาดผลึกที่เล็กลง ลักษณะสัญญาณของอนุภาคซึ่งวิเคราะห์จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคมีลักษณะคล้ายแท่งที่มีความยาวประมาณ 200 นาโนเมตรและมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 60 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคยูวีวิสตีฟิวด์สเปกโทรสโกปีพบว่าการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงร้อยละ 2 โดยอะตอม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงที่ดีที่สุดโดยสามารถย่อยสลายสารย้อม X-3B ได้ ร้อยละ 70 ภายในเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับการเจือทองแดงในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าความสามารถในการย่อยสลายลดลง

Lee และคณะ (2005) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงินด้วย วิธีซอล-เจล โดยใช้สารตั้งต้นเป็น titanium tetraisopropoxide (TTIP) และ silver nitrate (AgNO₃) และใช้ sodium citrate tribasic dehydrate (C₆H₅Na₃•2H₂O) เป็นตัวรีดิวซ์ เคาเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นอะนาเทสที่มีขนาดของผลึกใกล้เคียงกันที่ 5-6 นาโนเมตร การทดสอบการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ด้วยหลอดปรอท (mercury lamp) กำลัง 500 วัตต์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีขึ้นตามปริมาณการเจือเงินที่เพิ่มขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 2 มิลลิโมล ซึ่งสามารถย่อยสลาย p-nitrophenol ได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 60

Valencia S. และคณะ (2013) ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ (เมทิลออเรนจ์) ในน้ำเสีย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซโวเทอร์มอลจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกที่ได้เป็นแบบ อนาเทส โดยระยะเวลาและอุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการสังเคราะห์ 2 ชั่วโมงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถย่อยสลายได้ถึง 95%

Shi X. และคณะ (2009) ศึกษาการผสมระหว่าง Nut shell carbon (NSC)-nanotitanium (TiO_2) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล นำไปย่อยสลายสีโรดามีน บี ด้วยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยคุณลักษณะของ NSC- TiO_2 ศึกษาด้วย การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หาพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller การกระจายขนาดรูพรุน การดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล และ photoluminescence ซึ่งผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาของ NSC- TiO_2 สูงกว่า P25 (TiO_2 , Degussa)

Arpac E. และคณะ (2006) ได้ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เจือด้วยดีบุก (Sn) ที่อัตราส่วน 1:0.05 mol เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ในการย่อยสลายสารย้อมสี malachite green dye (MG) ภายใต้แสงยูวี และแสงวิสิเบิล อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการย่อยสลาย MG ภายใต้แสงยูวี โดยใช้หลอดไฟซินอน กำลัง 690 วัตต์ และใช้ตัวกรองความยาวคลื่นแสงให้เหลือช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร เป็นตัวกำเนิดแสงวิสิเบิลในการย่อยสลาย MG ภายใต้แสงวิสิเบิลพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 94 ซึ่งย่อยสลายได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่ย่อยสลายได้เพียงร้อยละ 73 ส่วนการย่อยสลาย MG ภายใต้แสงยูวีพบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ลดลงเป็นร้อยละ 96, 86 และ 77 ตามลำดับ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกยังคงประสิทธิภาพในการย่อยสลายที่ร้อยละ 97, 98 และ 98 ตามลำดับ เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ

Vargas X. และคณะ (2012) ศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก (Fe-TiO_2) เทียบกับ P25 (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการฟอกสี Cibacron Yellow LS-R โดย Fe-TiO_2 ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลกับวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่เวลา 2 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ เตรตระโอโซโพรพรอกไซด์ และเหล็ก (III) ไนเตรต เป็นสารตั้งต้นไปและใช้ 2-โพรพานอลเป็นตัวทำละลาย ในอัตราส่วนโดยโมล Fe:Ti (0.5%, 1%, 1.5% และ 2%) พบว่า 0.5% TiO_2 ที่เจือด้วย Fe มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อย่างไรก็ตามพบว่า P25 มีประสิทธิภาพดีกว่าในการสลายสี Cibacron Yellow LS-R ด้วยแสง ผลที่ได้นี้อาจจะเป็นเพราะปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลของ TiO_2 ที่เจือด้วย Fe มีปริมาณต่ำภายใต้การฉายรังสียูวี และอนุภาคมีขนาดใหญ่สำหรับการเจือเหล็กในตัวอย่างเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

Asiltürk A. และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เจือด้วยเหล็ก (Fe^{3+}) สำหรับใช้ในการย่อยสลาย malachite green dye (MG) ภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิล ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ titanium (IV) isopropoxide ($\text{Ti}(\text{OPri})_4$) และเหล็กไนเตรต ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารตั้งต้นสำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็ก ตามลำดับ อัตราส่วนโมลต่อโมลของ $\text{Fe}^{3+}/(\text{Ti}(\text{OPri})_4) = 0.003$ และ 0.07 จากการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีโครงสร้างเฟสเป็นอะนาเทส ซึ่งมีขนาดผลึกใกล้เคียงกันที่ 9 นาโนเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะตรวจสอบด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือเหล็กที่เพิ่มขึ้นซึ่งอยู่ในช่วง 83 h คือค่าคงที่ของพลังค์ $126 \text{ m}^2/\text{g}$ การดูดกลืนแสงตรวจสอบโดยใช้เทคนิค UV-visible diffuse reflectance spectrophotometry (UV-vis DRS) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 387 นาโนเมตร ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงแสงวิสิเบิลที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นตามปริมาณ การเจือเหล็กซึ่งอยู่ในช่วง 450–600 นาโนเมตร ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาแสงสำหรับการย่อยสลาย MG ภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิลพบว่าที่อัตราส่วนโมลต่อโมลของ $\text{Fe}^{3+}/(\text{Ti}(\text{OPri})_4) = 0.003$ ให้

ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสูงสุด โดยสามารถย่อยสลาย MG ความเข้มข้น 2.5 mg/L ได้ร้อยละ 81 และ 76 สำหรับภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิล ตามลำดับ ส่วนที่ MG ความเข้มข้น 5.0 mg/L สามารถย่อยสลายได้ ร้อยละ 85 และ 71 สำหรับภายใต้แสงยูวีและแสงวิสิเบิล ตามลำดับ และพบว่าในการเพิ่มอัตราส่วนโมลต่อโมลของ $\text{Fe}^{3+}/(\text{Ti}(\text{OPri})_4)$ จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลาย MG ลดลง

Butdee S. และคณะ (2009) ได้ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไอออนโครเมียม และ เหล็กโดยเจือด้วยวิธีอิมเพกเนชัน อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ทำการหาคุณลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคโลนวเอลเมทเทเลเจอร์ ยูวีวิชิ เบิ้ลสเปกโตรสโกปีแบบดิฟฟิวส์และอิเล็กตรอนสปีนสเปกโตรสโกปี จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของการ เจือโลหะที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ไม่ส่งผลต่อเฟสของอนุภาคนาโน การเจือของโลหะทำให้ ช่องว่างแถบพลังงานลดลงจาก 3.28 อิเล็กตรอนโวลต์เหลือ 2.5 สำหรับอนุภาคที่เจือด้วยไอออนเหล็กและ 2.86 สำหรับการเจือโครเมียม ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมชนิดเมธิลีนบลูโดยใช้แสงยูวีและแสงวิชิเบิ้ลนั้นแสดง ว่า ที่เปอร์เซ็นต์การเจือที่ 0.1 ทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์เร็วว่าถึง 5 ชั่วโมงและ ภายใต้แสงวิชิเบิ้ลเร็วว่าถึง 12 ชั่วโมง

Lee M.S. และคณะ (2005) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงินด้วยวิธีซอล-เจล โดยใช้สาร ตั้งต้นเป็น titanium tetraisopropoxide (TTIP) และ silver nitrate (AgNO_3) และใช้ sodium citrate tribasic dehydrate ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นตัวรีดิวซ์ เมาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไทเทเนียมได ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเฟสเป็นอะนาเทสที่มีขนาดของผลึกใกล้เคียงกันที่ 5–6 นาโนเมตร การทดสอบ การย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงปรอท (mercury lamp) กำลัง 500 วัตต์ พบว่าตัวเร่ง ปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีขึ้นตามปริมาณการเจือเงินที่เพิ่มขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก 2 มิลลิโมล ซึ่งสามารถย่อยสลาย p-nitrophenol ได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 60

Fan X. และคณะ (2007) ได้ศึกษาสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย โครเมียม (Cr) ร้อยละ 0.1–1 โดยโมล ตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์โดยเทคนิค evaporation-induced self-assembly โดยใช้ titanium tetra chloride (TiCl_4) เป็นสารตั้งต้น นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าตัวเร่ง ปฏิกิริยาทั้งหมดมีเฉพาะโครงสร้างเฟสที่เป็นแบบอะนาเทส และมีขนาดของผลึกใกล้เคียงกันที่ 9 นาโนเมตร ซึ่ง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโครเมียมร้อยละ 0.1 โดยโมล มีขนาดผลึกเล็กที่สุดคือ 8.8 นาโนเมตรซึ่งส่งผลให้มี พื้นที่ผิวมากที่สุดคือ $117.8 \text{ m}^2/\text{g}$ การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde, CH_3CHO) ของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงวิสิเบิลโดยใช้หลอดไฟซีนอน (Xe arc lamp) กำลัง 300 วัตต์ที่ความยาว คลื่นมากกว่า 440 นาโนเมตร โดยการวัดการตรวจจับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากการ ย่อยสลายอะซีทัลดีไฮด์ พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโครเมียมที่ร้อยละ 0.1 โดยโมลสามารถย่อยสลายอะ ซีทัลดีไฮด์ ได้ดีที่สุดที่ตรวจจับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 19.5 ไมโครโมล ซึ่งดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Degussa P25) ที่ตรวจจับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 17 ไมโคร โมล และ 1.5 ไมโครโมล ตามลำดับ

Li Y. และคณะ (2003) ได้ศึกษาเรื่องการควบคุมโครงสร้างและอิทธิพลของการเร่งปฏิกิริยาทางแสงและการเปลี่ยนแปลงเฟสของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เตตระบิวทิลไทเทเนต (tetrabutyl titanate) เป็นสารตั้งต้นและใช้เอทานอลที่ปราศจากน้ำ (anhydrous ethanol) เป็นตัวทำละลาย อัตราของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสสามารถปรับโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกจะได้เจลเกิดขึ้นและทำให้เจลแห้งในสภาวะสุญญากาศที่ 60 องศาเซลเซียส หรือใช้เครื่องระเหย (evaporator) ในการทำให้เจลแห้งและตามด้วยการทำให้แห้งที่สุญญากาศอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำผลทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน พบว่าผลของอุณหภูมิการทำให้เจลแห้งมีผลกับอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสเป็นรูไทล์และขนาดของผลึกด้วยการหาลักษณะเฉพาะของสารโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวัดด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเฉพาะตัวของค่าไดอิเล็กทริกทางแสง และสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสมบัติที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์คือ พื้นที่ผิว, ความเป็นผลึก และขนาดอนุภาค จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคประมาณ 50 นาโนเมตรมีค่าของการกระตุ้นในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมากที่สุด

Ranjit K. T. และคณะ (1996) ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อรีดักชันในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อเปลี่ยนไดไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโลหะมีสกุลเจืออยู่โดยทำการศึกษาในรายละเอียดของการแปรเปลี่ยน (vary) ปริมาณการเจือและธรรมชาติของโลหะที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โลหะที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Ru, Rh, Pd, Pt ทำการเตรียมโลหะที่เจือบนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีอิมเพคเนชัน โดยใช้สารละลายเกลือของโลหะใส่ตามปริมาณที่กำหนดในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยน้ำหนักที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นก็คนข้ามคืนจนเป็นของเหลวหนืด (slurry) ตามด้วยการอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในสภาพอากาศผลที่ผ่านการอบนำไปรีดักชันในไฮโดรเจน แล้วจึงเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในบรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องในบรรยากาศไฮโดรเจน การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงทำโดยการฉายแสงจากหลอดซีนอน รีดักชันของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยเปลี่ยนไดไนโตรเจนไปเป็นแอมโมเนียขึ้นกับธรรมชาติและปริมาณของการเจือโลหะ โดยปริมาณการเจือที่มีผลได้แอมโมเนียมากที่สุด คือ ร้อยละ 0.24 โดยน้ำหนัก ซึ่งแอมโมเนียไม่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาที่ใช้ TiO_2 บริสุทธิ์ แต่เกิดเมื่อมีความเป็นโลหะของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเจือ Ru ทำให้มีการดูดซับแสงในช่วง 400–900 นาโนเมตร โดยดูดซับมากขึ้นตามปริมาณโลหะ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นกับชนิดของโลหะดังนี้ $\text{Ru} > \text{Rh} > \text{Pd} > \text{Pt}$ ปริมาณโลหะที่เหมาะสมขึ้นกับธรรมชาติของโลหะนั้นๆ ปฏิกิริยาลดประสิทธิภาพลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของโลหะและการบังพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่โดนแสง ผลได้ของแอมโมเนียและความแข็งแรงระหว่างพันธะ M-H สอดคล้องกันโดย ถ้าความแข็งแรงของพันธะต่ำทำให้ค่าผลได้แอมโมเนียต่ำไปด้วย ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขวางการเกิดไฮโดรเจน จึงทำให้ผลได้แอมโมเนียที่สูงโดยคาดว่าไนโตรเจนเข้าไปแทรกระหว่างพันธะ M-H

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีเฟลมสเปร์ไพโรไลซิส ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณร้อยละโดยโมลที่ต่างกัน เพื่อศึกษาผลของปริมาณอนุภาคทองคำนาโนเต็มในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มประสิทธิภาพใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงการย่อยสลายสีย้อม ในการทดลองดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต/ CAS NO.
Titanium isopropoxide (TTIP)	$C_{12}H_{28}O_4Ti$	284.2	97%	Sigma-Aldrich/ 546-68-9
Gold chloride, hydrate	$H(AuCl_4).H_2O$	357.79	49+%	Electron microscopy sciences/ 16961-25-4
Xylene	C_8H_{10}	106.16	98.5%	Carlo Erba/ 1330-20-7
Ethanol	C_2H_5OH	46.07	99.9%	Merck/ 64-17-5

3.2 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

1. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร
2. ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วกวนสาร
4. ซ้อนตักสาร
5. ขวดปรับปริมาตร 25, 100, 1000 มิลลิลิตร

3.3 เครื่องมือที่ใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์	รุ่น/ บริษัท/ ประเทศ
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	Rigaku, TTRAXIII, ญี่ปุ่น
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เครื่องวัดการกระจายพลังงานสเปกโทรมิเตอร์ (energy dispersive X-ray spectroscope, EDS)	JEOL, JSM-6335F, Japan
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Transmission electron microscopy, TEM)	JEOL, JEM-2010, Japan
เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET)	Micromeritics Tristar, 3000, Germany
เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer, UV-Vis)	PG-Instrument T92
เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง	Mettler Tolodo, ME204E
เครื่อง Heater & Stirrer	รุ่น IKA C-MAG HS7
หลอดยูวี	Sylvania

3.4 การเตรียมสาร

3.4.1 การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

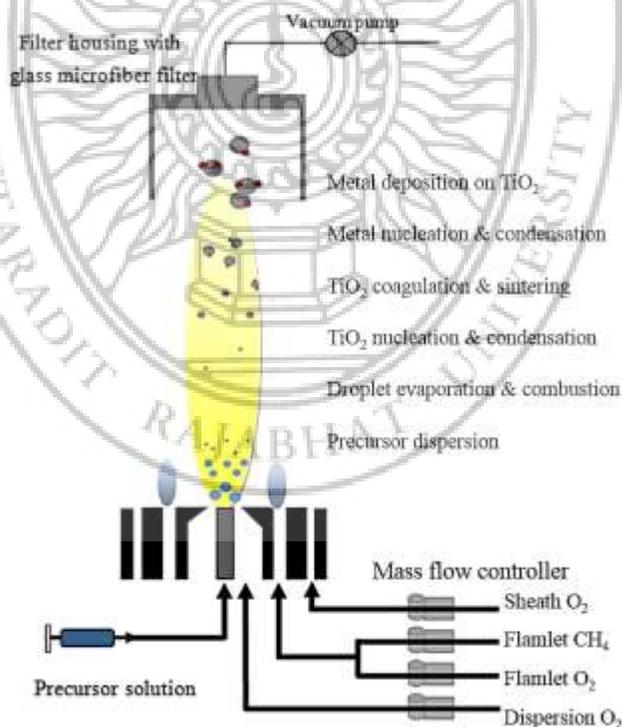
เตรียมสารละลายไทเทเนียมไอโซพรพอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยปิเปตไทเทเนียมไอโซพรพอกไซด์ 7.55 มิลลิลิตร ใส่ในตัวทำละลายไซลีน 42.45 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายตั้งต้น

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ นำสารละลายตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่ในปัมกระบอกฉีดยาของเครื่องเฟลมสเปโรโวลไซส์ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อปริมาณแก๊สออกซิเจน 5 ลิตรต่ออนาที และใช้แก๊สมีเทนและแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สสนับสนุนเปลวไฟในอัตรา 1.19 และ 2.46 ลิตรต่ออนาที ตามลำดับ สารละลายตั้งต้นที่หัวฉีดจะมีความดัน 1.5 บาร์ เปลวไฟมีความสูงประมาณ 10 ถึง 12 เซนติเมตร โดยเปลวไฟจะเป็นการเผาไหม้ของตัวทำละลาย หลังจากการละลายจากการเผาด้วยเปลวไฟของสารละลายตั้งต้นอนุภาคนาโนจะก่อตัวเป็นนิวเคลียส เกิดการควบแน่น แข็งตัวและเกิดเป็นก้อนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ขั้นตอนสุดท้ายอนุภาคนาโนจะติดอยู่ที่ไมโครไฟเบอร์ฟิวเตอร์ (Whatmann GF/A, เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.7 เซนติเมตร) ด้วยปั๊มสุญญากาศ

3.4.2 การเตรียมอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์

เตรียมสารละลายไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยบีเบตไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 7.51 7.49 7.47 และ 7.32 มิลลิลิตร ใส่ในตัวทำละลายไซลีนและเอทานอลอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ในขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งทองคลอไรด์ใส่ในตัวทำละลาย 0.0912 0.1368 0.1824 และ 0.5472 กรัม ตามลำดับ ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยตัวทำละลายไซลีนและเอทานอลอัตราส่วน 70 ต่อ 30 เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นดังตาราง 3.3 แสดงอัตราส่วนสารละลายตั้งต้น

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ นำสารละลายตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่ในปั๊มกระบอกฉีดยาของเครื่องเฟลมสเปโรไลซิสขนาด 50 มิลลิลิตร โดยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อปริมาณแก๊สออกซิเจน 5 ลิตรต่อนาที และใช้แก๊สมีเทนและแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สสนับสนุนเปลวไฟในอัตรา 1.19 และ 2.46 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ สารละลายตั้งต้นที่หัวฉีดจะมีความดัน 1.5 บาร์ เปลวไฟมีความสูงประมาณ 10 ถึง 12 เซนติเมตร โดยเปลวไฟจะเป็นการเผาไหม้ของตัวทำละลาย หลังจากการระเหยจากการเผาด้วยเปลวไฟของสารละลายตั้งต้นอนุภาคนาโนจะก่อตัวเป็นนิวเคลียส เกิดการควบแน่น แข็งตัวและเกิดเป็นก้อนอนุภาคนาโนเกาะติดบนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 3.1 ขั้นตอนสุดท้ายอนุภาคนาโนจะติดอยู่ที่ไมโครไฟเบอร์ฟิลเตอร์ (Whatmann GF/A, เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.7เซนติเมตร) ด้วยปั๊มสุญญากาศ



ภาพ 3.1 แผนภาพการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเฟลมสเปโรไลซิส

ตาราง 3.3 สารละลายยาดังต้นที่ใช้สังเคราะห์ด้วยเครื่องฟลอมสเปร์โรโรสซิสของอัตราส่วน 0.50–3.00 โมลเปอร์เซ็นต์ของ อนุภาคของนาโน
เติมในอนุภาคไทเทเนียมนาโน

รายละเอียดของทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์		รายละเอียด		ร้อยละของทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์	
สารตั้งต้น	CAS	ความหนาแน่น (กรัม /ลบ.ซม.)	น้ำหนักโมล(กรัม/โมล)	ร้อยละของทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ (mol% Au-loaded TiO ₂)	น้ำหนักรวม (กรัม)
ไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ 97% (TTIP)	546-68-9	0.97	284.26	0.5	
ทองคำคลอไรด์ (HAuCl ₄)	16961-25-4		357.79	0.75	
		น้ำหนักโมล (กรัม/โมล)		1.00	
Ti	47.867			3.00	
O ₂	31.998				
Au	196.666				
TiO ₂	79.9				
สารตั้งต้น (โมลาร์)	0.5 mol/L				
ปริมาตร	50 mL				
โมล	0.025 mol/L				
สารตั้งต้น	HAuCl ₄ (กรัม)	HAuCl ₄ (โมล)	TTIP (ลบ.ซม.)	TTIP (โมล)	น้ำหนักรวม (mol% Au-loaded TiO ₂) (กรัม)
0.50 mol% Au-loaded TiO ₂	0.0912	0.00025	7.5151	0.02475	0.89
0.75 mol% Au-loaded TiO ₂	0.1368	0.00038	7.4963	0.02462	0.90
1.00 mol% Au-loaded TiO ₂	0.1824	0.00051	7.4774	0.02449	0.92
3.00 mol% Au-loaded TiO ₂	0.5472	0.00153	7.3263	0.02347	0.94

3.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการหาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างของชนิดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) หาลักษณะรูปร่างบนผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม ออกซิเจน และ ทองคำด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectrometry, EDS) หาลักษณะเฉพาะรูปร่างด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Brunauer Emmett and Teller (BET)

3.6 การทดสอบการย่อยสลายสีย้อมสารละลายโรดามีน บี ด้วยปฏิกิริยาแคทาไลติกของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดสอบการย่อยสลายนำสารละลายโรดามีน บี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ในปิกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิตร เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรืออนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในปิกเกอร์ปริมาณในปริมาณ 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 กรัมต่อลิตรของสารละลายโรดามีน บี ทำการกวนสารด้วยแท่งแมกเนติกบาร์ด้วยเครื่องแมกเนติกสเตอริลเลอร์เป็นเวลา 30 นาที ในที่มืด จากนั้นฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต กำลังไฟ 8 วัตต์ และทำการกวนสารตลอดเวลาเก็บตัวอย่างสารละลายโรดามีน บี โดยปิเปตสารละลายจากปิกเกอร์ครั้งละ 5 มิลลิตร ที่เวลา 0 30 60 90 120 150 นาที ตามลำดับ กรองสารละลายด้วยไมโครฟิวเตอร์ด้วยกระบอกฉีดยา นำสารละลายที่กรองได้ไปตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความความคลื่น 554 นาโนเมตร เขียนกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารละลายโรดามีน บี โดยเทียบระหว่างความเข้มข้นต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) กับเวลา คำนวณร้อยละการสลายตัวของสารละลายโรดามีน บี ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการสลายตัวของสารละลายโรดามีน บี} = \frac{C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายโรดามีนบีที่เวลาใดๆ
 C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโรดามีน บี



ภาพ 3.2 รูปแบบการจัดอุปกรณ์ทำปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกของการย่อยสลายสีย้อมสารละลายโรดามีน บี ด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

บทที่ 4

ผลการวิจัย

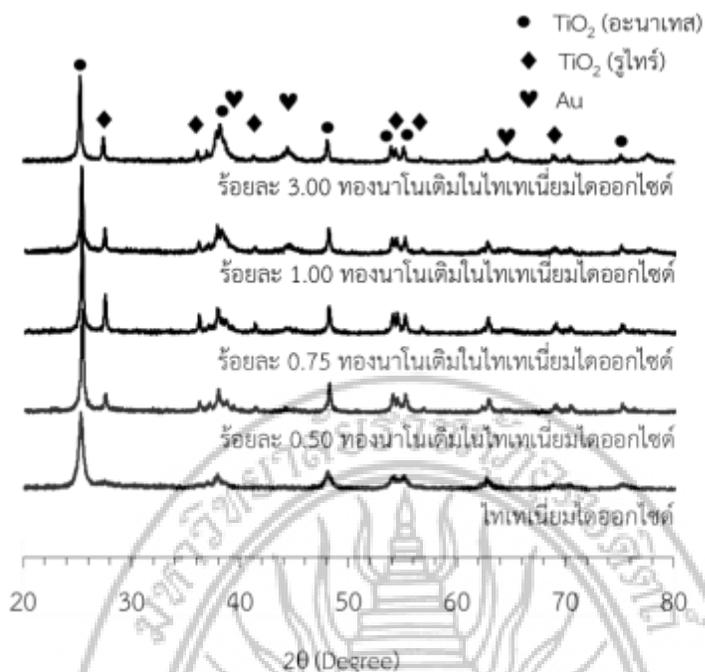
จากผลการทดลองได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก การตรวจสอบสัณฐานวิทยา และส่วนของปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการย่อยสลายสารละลายโรตามีน บี สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการตรวจสอบการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) และเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectrometry, EDS) ศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) และการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Brunauer Emmett and Teller (BET) ดังแสดงผลการวิจัยได้ดังนี้

4.1.1 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การศึกษารูปแบบสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้นำมาศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ที่มุมองศา 20 ถึง 80 องศา ในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏตำแหน่งระนาบของผลึกของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมองศาที่แตกต่างกันตามลักษณะระนาบผลึกดังแสดงในภาพ 4.1 ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์



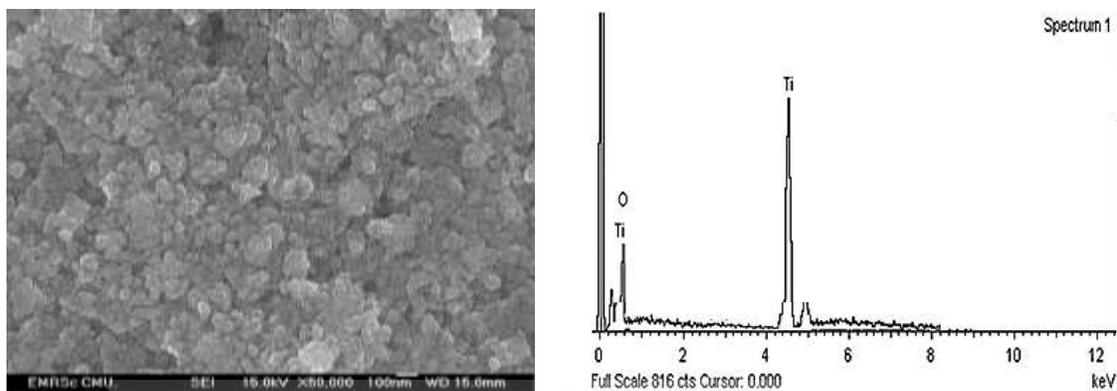
ภาพ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณอนุภาคทองที่ต่างกัน ดังภาพ 4.1 พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างเป็นเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ ทั้งสองเฟสมีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอล เทียบกับฐานข้อมูล Joint Committee Powder Diffraction Standards, JCPDS file ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS file หมายเลข 21-1272 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสอะนาเทส โดยมีพีคหลักขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.281 และ 48.050 ซึ่งตรงกับระนาบ (101) และ (200) ตามลำดับ และฐานข้อมูล JCPDS file หมายเลข 21-1276 แสดงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสรูไทล์ โดยมีพีคหลักขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 27.447 และ 36.086 ซึ่งตรงกับระนาบ (110) และ (101) ตามลำดับ และยังพบอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณอนุภาคทองที่ต่างกัน ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS file หมายเลข 04-0784 ของอนุภาคทอง โดยมีพีคหลักขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ ระนาบ (111) และ (200) ตามลำดับ

4.1.2 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) และเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (energy dispersive X-ray spectroscopy with SEM instrument, SEM-EDS)

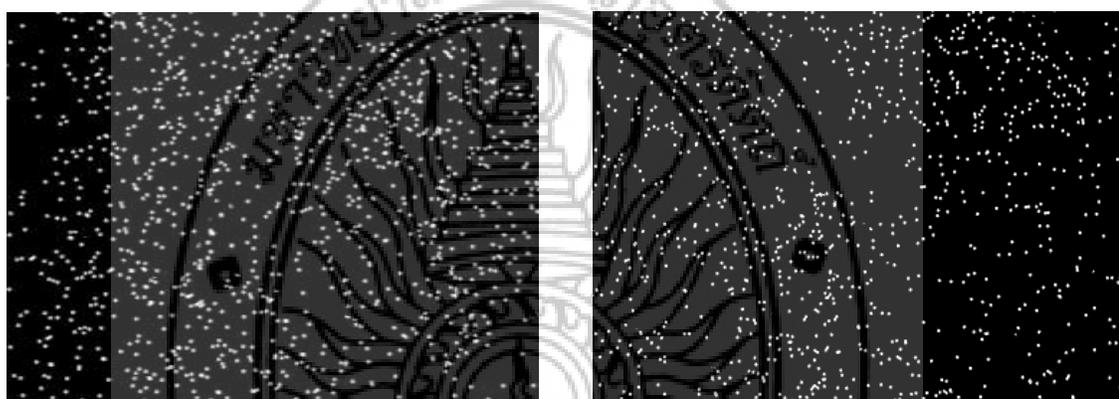
จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ความต่างศักย์ 15.0 KV ถ่ายภาพจากสัญญาณของ Secondary electron (SEI) แสดงให้เห็นดังภาพ 4.2 (ก) ภาพถ่าย SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะคล้ายทรงกลม และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุพบธาตุไทเทเนียมและธาตุออกซิเจนดังภาพ 4.2 (ข) ซึ่งการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียมและออกซิเจนแสดงดังภาพ 4.2 (ค) และ ภาพ 4.3 (ง) ตามลำดับ

จากภาพร้อยละ 1.00 ไมล ของอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพ 4.3 (ก) ลักษณะอนุภาคนาโนมีลักษณะคล้ายทรงกลม และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุพบธาตุไทเทเนียม ธาตุออกซิเจนและธาตุทองดังภาพ 4.3 (ข) การแสดงกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม ออกซิเจนและทอง แสดงดังภาพ 4.3 (ค) (ง) และ ภาพ 4.3 (จ) ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่ามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบครบตามที่ต้องการ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ไม่สามารถบอกปริมาณของแต่ละธาตุได้



(ก)

(ข)



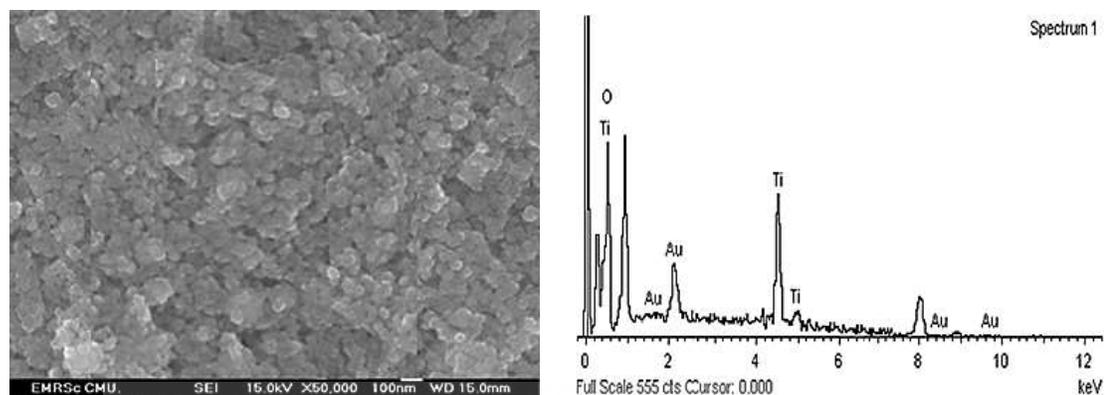
Ti Ka1

(ค)

O Ka1

(ง)

ภาพ 4.2 ภาพถ่าย SEM อนุภาคนาโน TiO_2 (ก) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ (ข) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุไทเทเนียม (ค) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุออกซิเจน (ง)



(ก)

(ข)



Ti Ka1

(ค)

O Ka1

(ง)



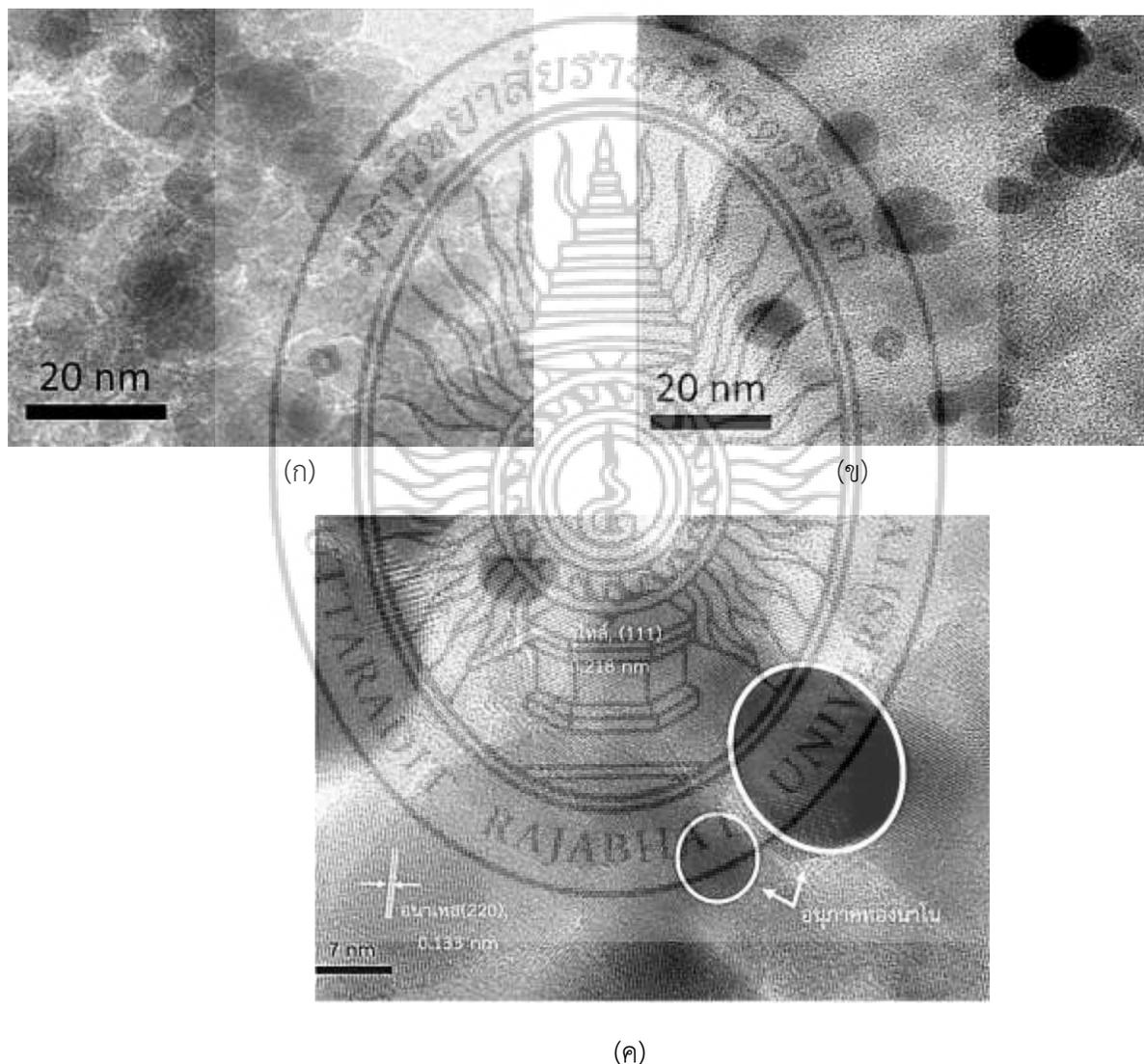
Au Ka1

(จ)

ภาพ 4.3 ภาพถ่าย SEM ร้อยละ 1.0 โมล ของอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบธาตุ (ข) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุไทเทเนียม (ค) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุออกซิเจน (ง) เทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์เพื่อตรวจสอบการกระจายธาตุทอง (จ)

4.1.3 การศึกษาอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM)

จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงให้เป็นภาพสัณฐานวิทยาโดยใช้กำลังขยาย 100,000 เท่า สำหรับภาพถ่ายริ้วการแทรกสอดของระนาบ (lattice fringe) ใช้กำลังขยาย 300,000 เท่า และภาพถ่ายแบบรูปการณ็เลียวเบนอิเล็กตรอน (ring pattern)



ภาพ 4.4 ภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กำลังขยาย 100,000 เท่า (ก) ร้อยละ 1.00 อนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 100,000 เท่า (ข) และร้อยละ 1.00 อนุภาคทองคำนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกำลังขยาย 300,000 เท่า (ค)

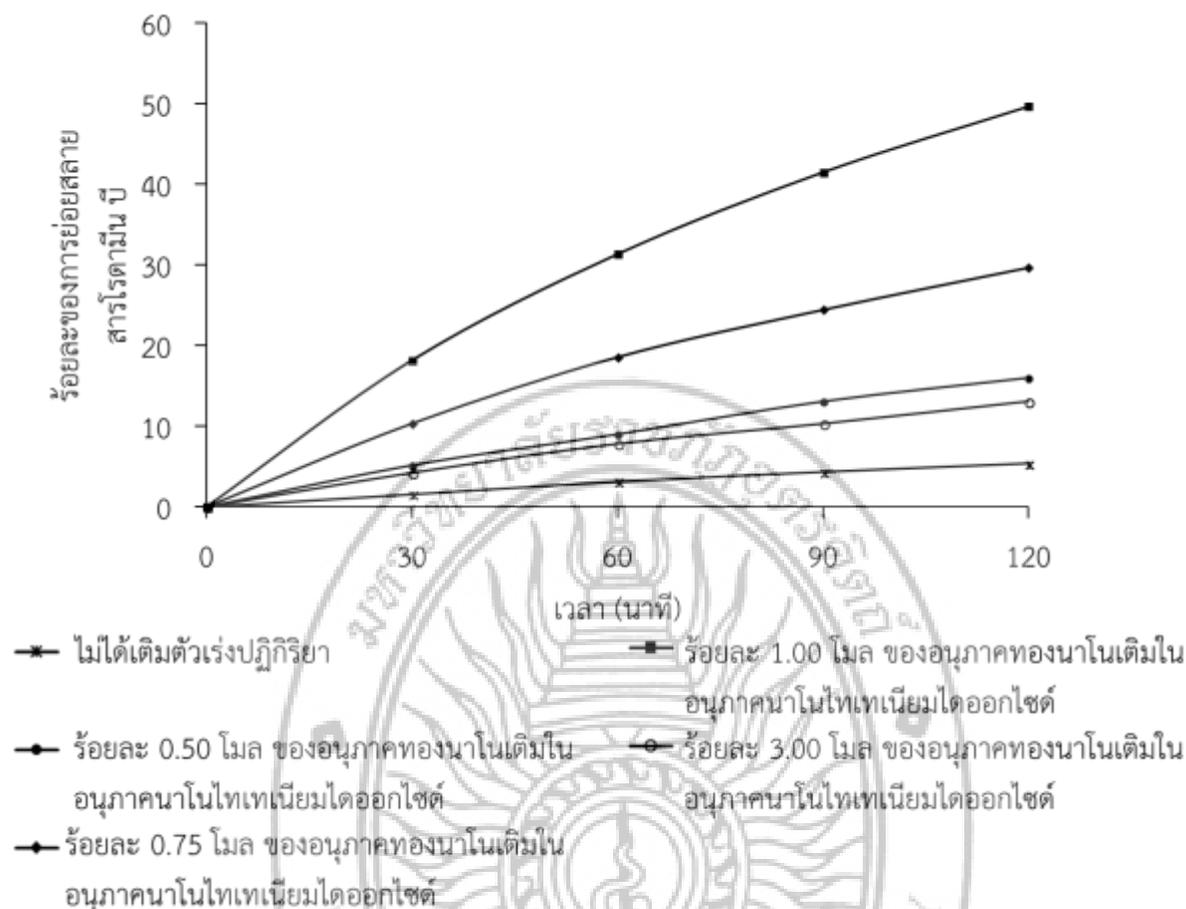
จากผลการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเท่ากับ 154.28 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจะมีขนาดผลึกอยู่ที่ 10.13 นาโนเมตร โดยร้อยละ 0.75 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 53.26 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจะมีขนาดผลึกอยู่ที่ 27.97 นาโนเมตร และโดยร้อยละ 3.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 91.10 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจะมีขนาดผลึกอยู่ที่ 14.42 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะจะส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองนาโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งขนาดอนุภาคเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะมากคาดการณ์ได้ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าขนาดอนุภาคใหญ่และพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เพราะจะส่งผลให้การสัมผัสสารที่ทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตไลซิส

4.2 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalytic activity) ของไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี

จากการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายโรดามีน บี ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทำการศึกษาปริมาณทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยสลาย และการใช้ปริมาณที่เหมาะสม รวมถึงการนำอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้เพื่อหาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารโรดามีน บี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาปริมาณร้อยละของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี

ผลของปริมาณร้อยละ 0.50 0.75 1.00 และ 3.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดแสง 8 วัตต์ ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ที่ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย 0 30 60 90 และ 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นว่า ร้อยละ 1.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุดโดยมีค่าร้อยละในการย่อยสลายสารโรดามีน บี ที่ 49.7 เวลา 120 นาที และปริมาณร้อยละ 3.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้น้อยที่สุดโดยมีค่าร้อยละในการย่อยสลายสารโรดามีน บี ที่ 13.1 เวลา 120 นาที และสารโรดามีน บี สามารถสลายตัวเองภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตปราศจากอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าสามารถสลายตัวได้ร้อยละ 5.3 ที่เวลา 120 นาที



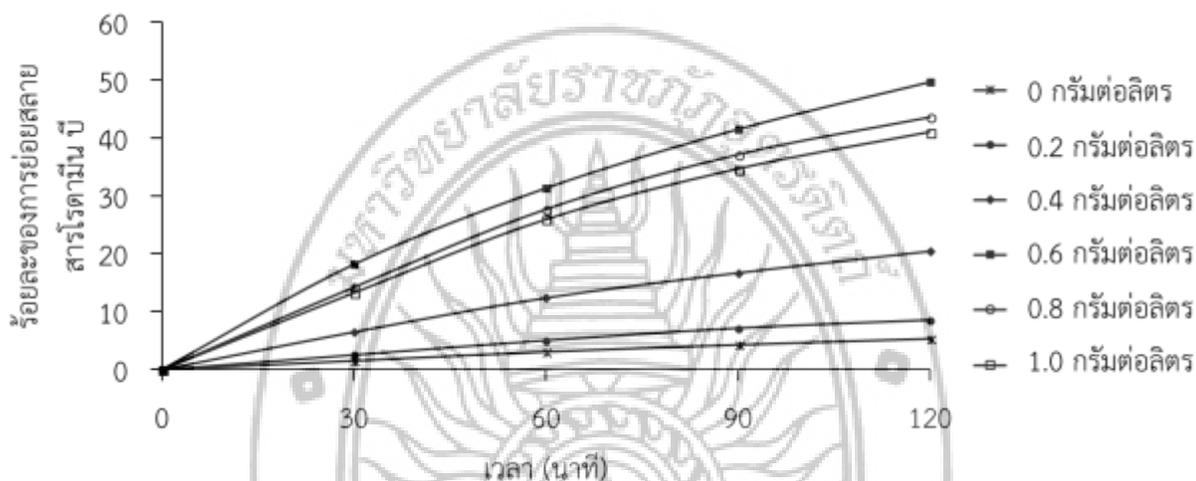
ภาพ 4.5 แสดงผลการย่อยสลายโรดามีน บี ด้วยอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากภาพ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอนุภาคทองคำนาโนที่เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นที่ระดับหนึ่งที่มีปริมาณอนุภาคทองคำนาโนร้อยละ 1.00 โมล เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของอนุภาคทองคำนาโนเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลงเนื่องมาจากการที่อนุภาคทองคำนาโนไปบดบังพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้แสงไม่สามารถส่องไปบนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายโรดามีน บี ลดลง (Chomkitichai, 2014)

4.2.2 ผลการศึกษาการใช้ปริมาณของอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี

ในการศึกษาการใช้ปริมาณของอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อหาปริมาณที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยสลายสารละลายโรดามีน บี ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาปริมาณของร้อยละของอนุภาคทองคำนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบว่า ร้อยละ 1.00 โมล อนุภาคทองคำนาโนเติมใน

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการย่อยสลายโรดามีน บี จึงได้นำร้อยละของ 1.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้ทำการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมต่อการเกิดประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายโรดามีน บี ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลซิสที่บนผิวอนุภาคโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา พบว่าปริมาณที่ใช้ 0.6 กรัมต่อลิตรของร้อยละ 1.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายโรดามีน บี สูงที่สุดในเวลา 120 นาที ดังแสดงในภาพ 4.6

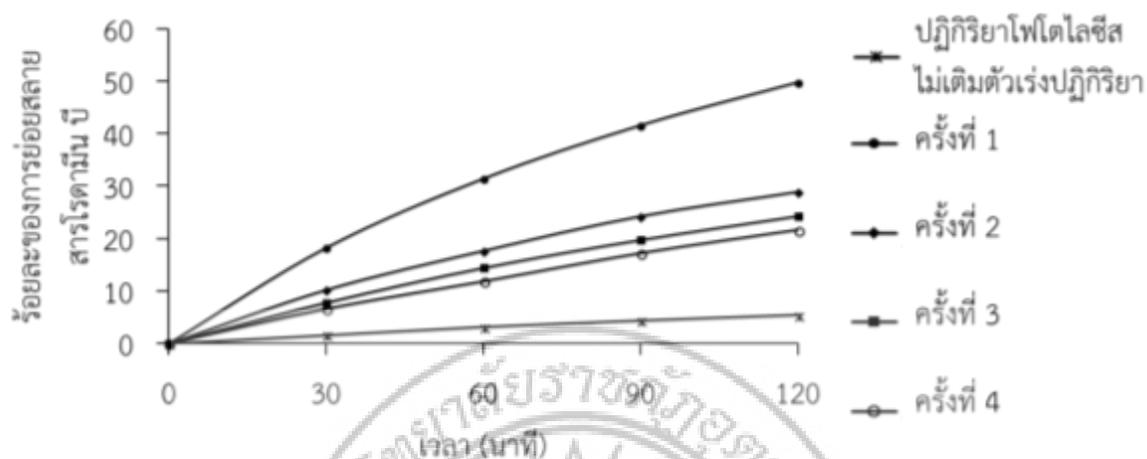


ภาพ 4.6 แสดงผลการศึกษาการใช้ปริมาณของร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียม ไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี

จากภาพ 4.6 ปริมาณที่เหมาะสมของร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการย่อยสลายโรดามีน บี มีปริมาณเท่ากับ 0.6 กรัมต่อลิตร โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ 0.6 กรัมต่อลิตร และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ มากกว่า 0.6 กรัมต่อลิตร เนื่องมาจากการบดบังแสงที่ส่องถึงพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์เอง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติทางกายภาพในการดูดซับแสงได้ดี ทำให้เมื่อใช้ปริมาณมากจะทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการย่อยสลายโรดามีน บี ลดลง

4.2.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียม ไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี

ในการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของร้อยละ 1.00 โมล ของอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรดามีน บี จำนวน 4 รอบ โดยวิธีการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เพื่อให้อนุภาคเกิดการตกตะกอน พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลงดังแสดงในภาพ 4.7



ภาพ 4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของอนุภาคทองคำนาโนเติมไนโทเทเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายโรตามีน ปี

จากภาพ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการใช้ครั้งแรกจะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารละลายโรตามีน ปี ได้ดีที่สุด และจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้อยลงในการใช้ในรอบที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากในการปั่นเหวี่ยงและล้างอนุภาคก่อนนำมาใช้ใหม่ อนุภาคบางส่วนสูญหายไปทำให้ปริมาณของอนุภาคลดลงจากการนำมาใช้ซ้ำ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายโรตามีน ปี ลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

การทำวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเติมอนุภาคทองคำโนในการย่อยสลายโรดามีน บี กล่าวคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดผงของอนุภาคทองคำโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้วิธีเฟลมสเปร์ไฟโรไลซิส เพื่อบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมในห้องปฏิบัติการที่เจือปนโรดามีน บี โดยทำการศึกษาการย่อยสลายภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต กำลังไฟ 8 วัตต์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงและสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคทองคำโนที่เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาอนุภาคทองคำโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีเฟลมสเปร์ไฟโรไลซิส มีความสำเร็จ มีลักษณะเป็นผงสีม่วงโดยสีม่วงเกิดจากสีของอนุภาคทองคำโน สามารถพิสูจน์คุณลักษณะเฟสด้วยเครื่อง XRD ผลที่ได้คือ โครงสร้างของไทเทเนียมที่ได้มี 2 เฟส ที่ปนกันอยู่ได้แก่ โครงสร้างแบบ อนาเทส และรูไทร์ แบบเฮกซะโกนอล ตาม JCPDS file หมายเลข 21-1272 และ JCPDS file หมายเลข 21-1276 ตามลำดับ และยังแสดงถึงโครงสร้างของอนุภาคทองคำโน ตาม JCPDS file 04-0784 ซึ่งแสดงถึงอนุภาค Au^0

ในการศึกษาอนุภาคทองคำโนที่เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของธาตุทอง ไทเทเนียม และออกซิเจน โดยไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคทองคำโนมีลักษณะเป็นทรงกลม

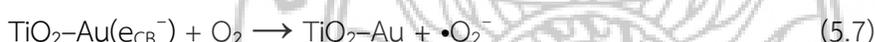
การศึกษาด้วยเทคนิค TEM พบอนุภาค ไทเทเนียมที่ได้มี 2 เฟส มีรูปร่างคล้ายทรงกลมซึ่งตรงกับเทคนิค SEM แสดงถึงโครงสร้างแบบ อนาเทส และรูไทร์ แบบเฮกซะโกนอล จากภาพถ่ายรีการแทรกสอดของระนาบ (lattice fringe) และพบภาพอนุภาคทองคำโนที่มีลักษณะคล้ายทรงกลมสีดำที่แตกต่างจากภาพของอนุภาคไทเทเนียม

การหาพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคทองคำโนที่เติมในไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 14.42 - 27.97 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ระหว่าง 53.26 - 91.91 ตารางเมตรต่อกรัม โดยร้อยละ 0.75 โมล ของอนุภาคทองคำโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุด ส่วนร้อยละ 3.00 โมล ของอนุภาคทองคำโนเติมในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีพื้นที่ผิวมากที่สุดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด

5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน บี

ทดสอบประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำเสียที่เจือปนโรดามีน บี ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดกำเนิดแสง 8 วัตต์ ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในปฏิกิริยาโฟโตไลซิส พบว่าร้อยละ 1.00 โมล อนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการย่อยสลายโรดามีน บี โดยใช้ปริมาณ 0.6 กรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการย่อยสลาย 120 นาที สามารถย่อยสลายสารละลายโรดามีน บี ได้ถึงร้อยละ 49.7

ปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายโรดามีน บี ด้วยอนุภาคทองนาโนเติมในไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังสมการต่อไปนี้ (Cojocar, 2011)



เนื่องจากอนุภาคทองนาโนมีประสิทธิภาพในการช่วยดักจับอิเล็กตรอนบนชั้นแถบการนำไฟฟ้า (e_{CB}^-) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนไม่เกิดการกระโดดกลับไปยังแถบช่องว่างชั้นวาเลนซ์ (h_{VB}^+) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารโรดามีน บี ได้ดังสมการที่ 5.6 และ 5.7

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.3.1.1 ควรทำการทดลองโดยทำการย่อยสลายน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ตัวอื่นๆ ปนเปื้อนอยู่เพื่อทำการทดลองความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้

5.3.1.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเรื่องวิธีการเตรียม Au และ TiO_2 ด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพ

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

5.3.2.1 ควรเพิ่มเวลาในการย่อยสลายให้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- จินดา ศิริตา, (2548). “การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ตะวัน สุขน้อย, (2543). “การสังเคราะห์และการศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์ที่มีไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบ”, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ,
- พลชัย พงษ์วัน. (2555). “ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบตัดแปร”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ละออง นวลศรีสมบัติ, (2544). “การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของผงแมกนีเซียมในไอเบตที่เตรียมโดยวิธีออกซาลेट”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุพล อนันตา, (2544). “กระบวนการประดิษฐ์สำหรับเซรามิกขั้นสูง (Fabrication Processes For Advanced Ceramics)”, ภาควชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Alkilany A. M., Murphy C. J., (2010). Toxicity and cellular uptake of gold nanoparticles: what we have learned so far?, *J Nanopart Res.*, **12**, 2313.
- Anker J.N., Hall W.P., Lyandres O., Shah N.C., Zhao J., Van Duyne R.P., (2008). Biosensing with plasmonic nanosensors, *Nat. Mater.*, **7** 442.
- Arpaç E., Saylkan, F., Asiltürk, M., Tatar, P., Kiraz, N. and Saylkan, H. (2006). Photocatalytic performance of Sn-doped and undoped TiO₂ nanostructured thin films under UV and vis-lights, *J. Mol. Catal. A-Chem.* **258**, 124–132.
- Asiltürk M., Saylkan F., Arpaç E., (2009). Effect of Fe³⁺ ion doping to TiO₂ on the photocatalytic degradation of Malachite Green dye under UV and vis-irradiation, *J. Photoch. Photobio. A. Chem.*, **203**, 64–71.
- Buddee S., Wongnawa S., Sirimahachai U., Puetpaibool W., (2011). Recyclable UV and visible light photocatalytically active amorphous TiO₂ doped with M (III) ions (M= Cr and Fe), *Mater. Chem. Phys.*, **126**, 167–177.
- Buso D., Pacifico J., Martucci A., Mulvaney P., (2007). Gold-nanoparticle-doped TiO₂ semiconductor thin films: optical characterization, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 347–354.
- Chiang Y. M., Birnie D. P. , Kingery W. D., (1997). Physical ceramics, New York,
- Chomkitichai W., Tamaekong N., Liewhiran C., Wisitsoraat A., Sriwichai S., Phanichphant S., (2012). H₂ Sensor based on Au/TiO₂ nanoparticles synthesized by flame spray pyrolysis, *Eng. J.*, **16**, 135–142.

- Chomkitichai W., Ninsonti H., Baba A., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., (2014). Multiple plasmonic effect on photocurrent generation of metal-loaded titanium dioxide composite/dye films on gold grating surface, *Surf. Interface Anal.* **46**, 607–612.
- Claire M. C., Jie Zeng, Weiyang Li, Christine H. Moran, Qiang Zhang, Dong Qin, and Younan Xia
- Cobley C. M., Chen J., Cho E.C., Wang L.V., Xia Y., (2011). Gold nanostructures: a class of multifunctional materials for biomedical applications, *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 44-56
- Cojocaru B., Neatu Ş., Sacaliuc-Pârvulescu E., Lévy F., Pârvulescu V.I., Garcia H., (2011). Influence of gold particle size on the photocatalytic activity for acetone oxidation of Au/TiO₂ catalysts prepared by dc-magnetron sputtering. *Appl. Catal. B Environ.* **107**, 140–149.
- Eghtedari M., Oraevsky A., Copland J.A., Kotov N.A., Conjusteau A., (2007). High sensitivity of in vivo detection of gold nanorods using a laser optoacoustic imaging system Motamedi, *M. Nano. Lett.*, **7**, 1914.
- Fan X., Chen X., Zhu S., Li Z., Yu T., Ye J., Zou Z., (2007). The structural, physical and photocatalytic properties of the mesoporous Cr-doped TiO₂, *J. Hazard. Mater.*, **149**, 1–7.
- Gao H., Liu C., Jeong H. E., Yang P., (2012). Plasmon-enhanced photocatalytic activity of iron oxide on gold nanopillars, *ACS Nano*, **6**, 234–240.
[Http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=9&p_id=258,04/14/2561](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=9&p_id=258,04/14/2561)
- Jain P.K., Huang X.H., El-Sayed I.H., El-Sayed M.A., (2008). Noble metals on the nanoscale: optical and photothermal properties and some applications in imaging, sensing, biology, and medicine. *Acc. Chem Res.* **41**, 1578.
- Lal S., Clare S.E., Halas N.J., (2008). Nanoshell-enabled photothermal cancer therapy: impending clinical impact, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1842.
- Landmann M., Rauls E., Schmidt W. G., (2012). The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂, *J. Phys. Condens. Mater.*, **24**, 195503.
- Lee M.S., Hong S.S., Mohseni M., (2005). Synthesis of photocatalytic nanosized TiO₂-Ag particles with sol-gel method using reduction agent, *J. Mol. Catal. A:Chem.*, **242**, 135–140.
- Li Y., White T., Lim S. H., (2003). Structure control and its influence on photoactivity and phase transformation of TiO₂ nano-particles, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **5**, 211–215.

- Manera M.G., Spadavecchia J., Buso D., Julián Fernández C., Mattei G., Martucci A., Mulvaney P., Pérez-Juste J., Rella R., Vasanelli L., Mazzoldi P., (2008). Optical gas sensing of TiO₂ and TiO₂/Au nanocomposite thin films, *Sens. Actuators B*, **132**, 107–115.
- Murphy C.J., Gole A.M., Stone J.W., (2008). Gold nanoparticles in biology: beyond toxicity to cellular imaging, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1721
- Ninsonti H., Chomkitichai W., Baba A., Kangwansupamonkon W., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., (2013). Enhanced photocurrent properties of dye/Au-loaded TiO₂ films by grating-coupled surface plasmon excitation, *leice. T. Electron.*, **E69-C**, 258–388.
- Perera S., Gillan G. E., (2008). A facile solvothermal route to photocatalytically active nanocrystalline anatase TiO₂ from peroxide precursors. *J. Solid State Sci.*, **10**, 864–867.
- Pillai S., Green M.A., (2010). Plasmonics for photovoltaic applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **94**, 1481–1486.
- Qian X.M., Peng X.H., Ansari D.O., Yin-Goen Q., Chen G.Z., Shin D.M., Yang L., Young A.N., Wang M.D., Nie. S.M., (2008). In vivo tumor targeting and spectroscopic detection with surface-enhanced Raman nanoparticle tags, *Nat. Biotechnol.*, **26**, 83.
- Ranjit K. T., Varadarajan T. K., Viswanathan B., (1996). Photocatalytic reduction of dinitrogen to ammonia over noble-metal-loaded TiO₂, *J. Photoch. Photobio. A.*, **96**, 181–185.
- Shi X., Wang S., Dong X., Zhang Q., (2009). Enhanced photocatalytic activity of titanium dioxide by nut shell carbon, *J. Hazard. Mater.*, **167**, 692–695.
- Skrabalak S.E., Chen J.Y., Sun Y.G., (2008). Gold nanocages: synthesis, properties, and applications, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1587.
- Vargas X., Tauchert E., Marin J.-M., Restrepo G., Dillert R., Bahnemann D., (2012). Fe-doped titanium dioxide synthesized: Photocatalytic activity and mineralization study for azo dye, *J. Photochem. Photobiol. A.*, **243**, 17–22.
- Vena N., Haynes J., Ward E., Brandon J. Russell, Alexander G. A., (2017). Photocatalytic effects of titanium dioxide nanoparticles on aquatic organisms—Current knowledge and suggestions for future research, *Aquatic Toxicology* . **185**, 138–148.
- Wang D., Xiao L., Luo Q., Li X., An J., Duan Y., (2011). Highly efficient visible light TiO₂ photocatalyst prepared by sol–gel method at temperatures lower than 300°C, *J. Hazard. Mater.*, **192**, 150–159

- Wetchakun, N., (2008). Effect of transition metal ion doping on the photocatalytic activity of titanium dioxide, Ph.D. Dissertation, Chiang Mai University.
- Xia X.H., Gao Y., Wang Z., Jia Z.J., (2008). Structure and photocatalytic properties of copper-doped rutile TiO₂ prepared by a low-temperature process, *J. Phys. Chem. Solids.*, **69**, 2888–2893.





ภาคผนวก

1. เครื่องมือวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (XRD)



ภาพที่ I. X-ray Diffractometer, Rigaku, Miniflex II, Japan.

1.2 เครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET-Surface area analyzer)



ภาพที่ II. Surface area analyzer, Quantachrome Autosorb 1 MP, USA.

1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS)



ภาพที่ III. Scanning Electron-Microscope & Energy Dispersive X-ray Spectrometer, Hitachi S-4800FE, Hitachi, Japan.

1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)



ภาพที่ IV. Transmission Electron Microscope, CM-1000, Philips

1.5 เครื่องยวีสเปกโตรโฟโตเมตริ (UV-Vis Spectrophotometer)



ภาพที่ V. UV-vis spectrophotometer-PG Instrument T92+.

1.6 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace)



ภาพที่ VII. Muffle Furnace-Carbolite-RHF 16-8.

2. ฐานข้อมูล JCPDS

(ก) JCPDS File No. 21-1272 of Titanium Dioxide (Anatase)

Anatase, syn (Titanium Oxide) TiO_2

Radiation=CuK α 1

Lambda=1.5406

Filter=

Calibration=

2T=25.281-152.631

I/Ic(RIR)=3.3

Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, v7

Tetragonal - Powder Diffraction, $I4_1/amd$ (141)

Z=4

CELL: 3.7852 x 3.7852 x 9.5139 <90.0 x 90.0 x 90.0>

P.S=t12.00

Density(c)=3.893

Density(m)=

Mwt=79.9

Vol=136.31

F(30)=74.5(0.0115,35/0)

Ref:

2-Theta	Int	(h k l)	2-Theta	Int	(h k l)
25.281	100.0	(1 0 1)	62.120	4.0	(2 1 3)
36.947	10.0	(1 0 3)	62.690	14.0	(2 0 4)
37.801	20.0	(0 0 4)	68.762	6.0	(1 1 6)
38.576	10.0	(1 1 2)	70.310	6.0	(2 2 0)
48.050	35.0	(2 0 0)	74.031	2.0	(1 0 7)
53.891	20.0	(1 0 5)	75.031	10.0	(2 1 5)
55.061	20.0	(2 1 1)	76.019	4.0	(3 0 1)

(ข) JCPDS File No. 21-1272 of Titanium Dioxide (Rutile)

Rutile, syn (Titanium Oxide) TiO₂

Radiation=CuKα1

Lambda=1.5406

Filter=

Calibration=

2θ=27.438–143.112

I/Ic(RIR)=3.6

Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, v7 p83 (1969)

Tetragonal - Powder Diffraction, P4₂/mmm (136) Z=2

CELL: 4.5933 x 2.9592 x 0.6442

2-Theta	Int	(h k l)	2-Theta	Int	(h k l)
27.446	100	1 1 0	65.478	2	2 2 1
36.085	50	1 0 1	69.008	20	3 0 1
39.187	8	2 0 0	69.788	12	1 1 2
41.225	25	1 1 1	72.408	2	3 1 1
44.050	10	2 1 0	74.409	1	3 2 0
54.322	60	2 1 1	76.508	4	2 0 2
56.640	20	2 2 0	79.819	2	2 1 2
62.740	10	0 0 2	82.333	6	3 2 1
64.038	10	3 1 0			

(ค) JCPDS File No. 21-1272 of Au

Gold (Au)

Radiation=CuK α 1

Lambda=1.54056

Filter=Ni

Calibration=

2 θ =38.184–135.41I/I_c

Ref: Swanson, Tatge, Natl, Bur, Stand, (U.S.), Circ. 539, I, 33(1953)

Cubic - Powder Diffraction, Fm $\bar{3}$ m (225) Z=2

CELL: 4.078

2-Theta	Int	(h k l)	2-Theta	Int	(h k l)
38.184	100	1 1 1	98.133	6	4 0 0
44.392	52	2 0 0	110.79	23	3 3 1
64.576	32	2 2 0	115.25	22	4 2 0
77.547	36	3 1 1	135.41	23	4 2 2
81.721	12	2 2 2			

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

- ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.วีรศักดิ์ จอมกิตติชัย
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Weerasak Chomkitichai
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3640600018848
- ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ (ที่เป็นปัจจุบัน) อาจารย์
- สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ 53000
โทรศัพท์ 055-411096 ต่อ 1308
โทรศัพท์มือถือ 08-4990-8997
E-mail : chomkitichai@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	มหาวิทยาลัยและประเทศ	ปีที่สำเร็จ	สาขา
ปริญญาตรี วท.บ.	มหาวิทยาลัยนเรศวร ประเทศไทย	2544	เคมี
ปริญญาโท วท.ม.	มหาวิทยาลัยนเรศวร ประเทศไทย	2548	เคมี
ปริญญาเอก ปร.ด.	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย	2557	เคมี

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วิทยาศาสตร์นาโน เคมีเชิงฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์

7. การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์

- Chomkitichai W., Ninsonti H., Liewhiran C., Wisitsoraat A., Sriwichai S., Phanichphant S., Flame-made Pt-loaded TiO₂ thin films and their application as H₂ gas sensors, *J. Nanomater.*, 2013, **2013**, 1–8., doi.org/10.1155/2013/497318.

2. Ninsonti H., **Chomkitichai W.**, Baba A., Kangwansupamonkon W., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., Enhanced photocurrent properties of dye/Au-loaded TiO₂ films by grating-coupled surface plasmon excitation, *leice. T. Electron.*, 2013, **E69-C**, 258–388.
3. Ninsonti H., **Chomkitichai W.**, Baba A., Wetchakun N., Kangwansupamonkon W., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., Au-Loaded Titanium Dioxide Nanoparticles Synthesized by Modified Sol-Gel/Impregnation Methods and Their Application to Dye-Sensitized Solar Cells, *Inter. J. Photoenergy*, 2014, **2014**, 1-8., doi.org/10.1155/2014/865423
4. **Chomkitichai W.**, Ninsonti H., Baba A., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., Multiple plasmonic effect on photocurrent generation of metal-loaded titanium dioxide composite/dye films on gold grating surface, *Surf. Interface Anal.* 2014, **46**, 607–612.
5. Mopoung S., **Chomkitichai W.**, Chromate removal from aqueous solution by natural red clay, *Mitteilungen Klosterneuburg*, 2015, **1**, 382–395.
6. Ninsonti H., Hara K., Nootchanat S., **Chomkitichai W.**, Baba A., Phanichphant S., Shinbo K., Kato K., Kaneko F., Enhanced Photocurrent Generation at a Spiro-OMeTAD/AuNPs-TiO₂ Interface with Grating-coupled. Surface Plasmon Excitation, *leice. T. Electron.*, 2015, **E98-C**, 104–109.
7. Jansanthea P., **Chomkitichai W.**, Ketwaraporn J., Pookmanee P., Phanichphant S., TiO₂ Powder Synthesized via the Solvothermal Method and Enhanced Photocatalytic Degradation of Methomyl. *Materials Science Forum*. 2016, **872**, 191–195.
8. Boonprakob N., **Chomkitichai W.**, Ketwaraporn J., Wanaek A., Inceesungvorn B., Phanichphant S., Photocatalytic Degradation of Phenol over Highly Visible-light Active BiOI/TiO₂ Nanocomposite Photocatalyst. *Eng. J.*, 2017, **21**, 81–91.

ผลงานที่นำเสนอ

1. The Preparation of Bismuth Vanadate Powder by the Solvothermal Method for Photocatalytic Degradation of Methomyl. International Conference on Safe and Sustainable Nanotechnology (in conjunction with 4th German-Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology), 14 - 17 October 2014, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand
2. Investigation of Natural and Modified Sediment from Groundwater by Calcination, Microwave and Hydrothermal Method. URU International Conference on Science and Technology 2016, August 1-2, 2016, Faculty of Science & Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand.



ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ร่วมโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.พงศ์เทพ จันทรสันเทียะ
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Pongthep Jansanthea
2. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ (ที่เป็นปัจจุบัน) อาจารย์
3. สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อ.เมือง
จ.อุดรดิตถ์ 53000
โทรศัพท์ 055-411096 ต่อ 1308
โทรศัพท์มือถือ 08-4504-5373
E-mail : pongthepuru@gmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	มหาวิทยาลัยและประเทศ	ปีที่สำเร็จ	สาขา
ปริญญาตรี วท.บ.	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประเทศไทย	2545	เคมี
ปริญญาโท วท.ม.	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประเทศไทย	2551	เคมีประยุกต์
ปริญญาเอก ปร.ด.	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประเทศไทย	2559	เคมีประยุกต์

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วิทยาศาสตร์นาโน เคมีเชิงฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์

ผู้ร่วมโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.วารุณี จอมกิติชัย
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Warunee Chomkitichai
2. ตำแหน่งบริหาร/วิชาการ (ที่เป็นปัจจุบัน) อาจารย์
3. สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก สาขาวิชาชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง
จ.อุตรดิตถ์ 53000
โทรศัพท์ 055-411096 ต่อ 1306
โทรศัพท์มือถือ 08-8252-1477
E-mail : warunee@yahoo.com

4. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	มหาวิทยาลัยและประเทศ	ปีที่สำเร็จ	สาขา
ปริญญาตรี วท.บ.	มหาวิทยาลัยบูรพา ประเทศไทย	2539	ชีววิทยา
ปริญญาโท วท.ม.	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย	2543	ชีววิทยา
ปริญญาเอก ปร.ด.	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประเทศไทย	2559	ชีววิทยา

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
ชีววิทยา