

การใช้วัสดุนาโนขั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การใช้วัสดุนาโนขั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2556

ADVANCED FUNCTIONAL NANOMATERIALS
FOR ENVIRONMENTAL APPLICATION



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ FACULTY OF ENGINEERING อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang ให้นำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การใช้วัสดุนาโนชั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม
โดย นางสาวกมลมาศ จิวสาย
นางสาวกรรณิภา จันทร์ทรายมูล
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์)

.....กรรมการ
(ดร.นริศรา ทองบุญชู)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้วัสดุนาโนชั้นสูงเพื่อใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม
โดย	นางสาวกมลมาศ จิววิสาย นางสาวกรรณิภา จันทร์ทรายมูล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์
ปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการย่อยสลายมลสารอินทรีย์ประเภทสี้อม โดยใช้โดยใช้นาโนริบบอนไททานิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โซเดียมไททานิตนาโนริบบอน 2.41×10^7 ตารางนาโนเมตร ถูกสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยมีไททานิตไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง นาโนริบบอนไททานิตมีโครงสร้างแบบเป็นชั้น ถูกเติมด้วยโลหะเงิน โลหะเงินสามารถขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงแสงขาว โดยมีโซเดียมไททานิตนาโนริบบอนและซิลเวอร์ไนเตรทเป็นสารตั้งต้น ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งประสิทธิภาพในการเติมโลหะจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการเคลือบผิวด้วยโลหะ เนื่องจากวิธีการแลกเปลี่ยนประจุ ทำให้โลหะเงินสามารถเข้าไปแทนที่ตามพื้นผิวและโครงสร้างได้ดีกว่าวิธีการเคลือบผิว การเติมโลหะเงินส่งผลให้ค่าช่องว่างพลังงานลดลง จึงสามารถขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงแสงขาวได้ แต่การเกิดปฏิกิริยาภายใต้แสงยูวี ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยโลหะเงินสามารถย่อยสลายมลสารอินทรีย์ได้มากกว่าการเกิดปฏิกิริยาภายใต้ช่วงแสงขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title ADVANCED FUNCTIONAL NANOMATERIAL FOR ENVIRONMENTAL APPLICATION
By Miss. Kamonmart Jiwisai
Miss. Kannipa Jansaimoon
Advisors Dr. Kunlanan Kiatkittipong
Report for Bachelor of Engineering (Chemical Engineering)
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

This research was investigated for organic dye pollutants degradation through photocatalysis using sodium titanate nanoribbons as a catalyst. Sodium titanate having an area of $2.41 \times 10^5 \text{ nm}^2$ was synthesized by hydrothermal reaction with titanium dioxide and sodium hydroxide precursors. The reaction took place at a temperature of $200 \text{ }^\circ\text{C}$ with the reaction time of 24 hours, and then the nanoribbons formed a layer structure doped with silver metals, accomplished by ion-exchange reaction, to extend its applications over a visible light range. Sodium titanate nanoribbons and silver nitrate are the precursors for doping. The ion-exchange reaction provided better efficiency for doping than that of coating due to more silver metals were substituted into the surface and the structure of the nanomaterials. Silver metal doping reduced the band gap energy. Thus, the applications over the visible light range are possible. However, the silver metal doped catalyst gives better result on the degradation of organic dye pollutants under the UV light range than the visible light range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.กุลนันท์ เกียรติกิตติพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่มอบความรู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอดเวลาในการทำปริญญาโทนี้ ทำให้ปริญญาโทนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และ ดร. อัครวัต ศิริสุข อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET)

ขอขอบพระคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) และเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์สาขาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้ คำปรึกษา ข้อคิด คำแนะนำ และประสบการณ์ดี ๆ ในการเรียนและการใช้ชีวิต

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายขอขอบพระคุณ ครอบครัวของคณะผู้จัดทำ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดทำปริญญาโทนี้ ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา จนทำให้ปริญญาโทเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

กมลมาศ จิวีสาย
กรรณิภา จันทรทรายมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic)	3
2.2 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม-ออกไซด์ (Nanotitanium-Oxide Synthesis)	4
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)	6
2.4 การขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงแสงขาวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Applications Extension of Catalysts within Visible Light Range)	6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนริบบอน	11
3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา	12
3.3 การย่อยสลายสีย้อม	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	16
4.2 โซเดียมไททาเนตนาโนริบบอน	17
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเติมโลหะระหว่างวิธีการเคลือบผิวกับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน	18
4.4 การย่อยสลายสีย้อม	19
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	22
เอกสารอ้างอิง	23
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	27
ภาคผนวก ข	29
ภาคผนวก ค	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อดี-ข้อเสียกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียมออกไซด์	5
4.1	เปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่ได้จากการเติมโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา	19
ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับการดูดกลืนแสงของสีย้อม	27
ก.2	ความสัมพันธ์ของความเข้มของพลังงานกับความยาวคลื่นของหลอดไอปรอทความดันสูง ในช่วง 300 – 450 นาโนเมตร	28
ข.1	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยไทเทเนียมไดออกไซด์	29
ข.2	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยโซเดียมไททาเนตนาโนริบบอน	29
ข.3	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 1	30
ข.4	การย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 2	30
ข.5	การย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 3	31
ข.6	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 1	31
ข.7	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 2	32
ข.8	ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 3	32
ข.9	อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	33
ข.10	อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ครั้งที่ 2	33
ข.11	อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ครั้งที่ 3	33
ข.12	ผล EDX แสดงปริมาณองค์ประกอบของซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 1	34
ข.13	ผล EDX แสดงปริมาณองค์ประกอบของซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 1	34
ข.14	อัตราการย่อยสลายสีย้อม เมื่อความเข้มข้นลดลงร้อยละ 50	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	กลไกการเกิดปฏิกิริยา	4
2.2	การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ	7
2.3	การย่อยสลายฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ	8
2.4	กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$	8
2.5	การลดลงของค่าช่องว่างพลังงาน	9
3.1	ชุด Hydrothermal	11
3.2	เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)	12
3.3	Spectrophotometer	14
3.4	หลอดไอปรอทความดันสูง	15
4.1	ภาพ SEM กำลังขยาย 10 เท่า ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส)	16
4.2	ผล XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส)	16
4.3	ภาพ SEM กำลังขยาย 10 เท่า ของโซเดียมไททาเนตนาโนริบบอน	17
4.4	ผล XRD ของโซเดียมไททาเนตนาโนริบบอน	18
4.5	อัตราการย่อยสลายสีย้อม เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นลดลงร้อยละ 50 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน	20
4.6	ความเข้มข้นของสีย้อมหลังถูกย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีการเคลือบผิว (Ag/NaTO) กลับมาใช้ซ้ำ	20
4.7	ความเข้มข้นของสีย้อมหลังถูกย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (AgTO) กลับมาใช้ซ้ำ	21
ก.1	กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อม	27
ก.2	สเปกตรัมแสงของหลอดไอปรอทความดันสูง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในโลกยุคสมัยปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ เจริญก้าวหน้าและเติบโตอย่างรวดเร็ว ภาคอุตสาหกรรมนับว่ามีส่วนสำคัญในการพัฒนาประเทศด้านเศรษฐกิจ การขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมส่งผลให้การก่อตั้งโรงงานอุตสาหกรรมใหม่ๆ เพิ่มขึ้นอย่างมากหรือแม้แต่การขยายขนาดของโรงงานอุตสาหกรรมเดิมที่มีอยู่แล้วเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้น การขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมส่งผลให้สารมลพิษปนเปื้อนถูกปลดปล่อยออกสู่อากาศ และแหล่งน้ำ โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จึงจำเป็นต้องตระหนักถึงปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้นและเร่งรีบหาวิธีการบำบัดน้ำเสียก่อนปลดปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียก็สามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกัน อาทิ การบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี และการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น การเลือกใช้วิธีบำบัดน้ำเสียก็จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการปนเปื้อนของน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี และชีวภาพยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียบางชนิดที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีดังกล่าว เนื่องจากสารเคมีหรือจุลินทรีย์ไม่สามารถกำจัดและย่อยสลายสารอินทรีย์บางประเภทได้ จึงมีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ในการกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis Reaction) เพื่อสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับน้ำ (H_2O) และสารประกอบอื่นๆ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในการสลายสารอินทรีย์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น ในปัจจุบันนิยมนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะทางเคมีที่ดี ไม่เป็นสารพิษและไม่ละลายน้ำ ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และยังมีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก จึงปลอดภัยและใช้งานง่าย นอกจากนี้ข้อดีอีกประการหนึ่งของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกคือ เนื่องจากสารพิษที่ถูกย่อยสลายจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการบำบัดด้วยวิธีอื่นที่หลังจากการบำบัดน้ำเสียแล้วก็ยังคงมีของเสียที่ต้องนำไปกำจัด อาทิ กากตะกอน ของเสียจากการคายซับ เป็นต้น จึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการหาวิธีการกำจัดของเสียต่อไป

จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดความสนใจในการศึกษาการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสมาเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดในด้านของ ลักษณะโครงสร้าง รูปร่างผลึก ค่าช่องว่างพลังงาน และพื้นที่ผิว จึงจัดทำงานวิจัยนี้ขึ้น เพื่อศึกษาหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้สามารถใช้งานได้ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษในน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์ และควบคุมโครงสร้างนาโนริบบอนไททานेट สำหรับการใช้งานในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส
2. เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้สามารถใช้งานได้ในช่วงแสงสีขาว ด้วยการเติมโลหะเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารอินทรีย์ที่ดีขึ้น โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมโลหะด้วยวิธีการเคลือบผิวกับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้อยู่ในรูปของนาโนริบบอนไททานेट โดยศึกษาปัจจัยของสถานะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์และลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
2. ศึกษาและทดลองเติมโลหะด้วย 2 วิธีที่ต่างกัน คือ การเคลือบผิวด้วยโลหะ (Impregnation Method) และ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Method) ซึ่งโลหะที่ใช้เติมคือ โลหะเงิน (Ag) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ทดลองกระบวนการกำจัดมลสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Photodegradation) โดยศึกษาปัจจัยของอัตราการย่อยสลายมลสารอินทรีย์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงแสงยูวีและแสงขาว รวมถึงความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้โซเดียมไททานตนาโนริบบอน ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูปร่างเฉพาะ เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น
2. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถขยายขอบเขตการใช้งานจากแสงช่วงยูวีไปสู่ช่วงแสงขาว
3. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ การเติมโลหะ และการย่อยสลายสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ นาโนริบบอนไททาเนต ในสถานะที่ใช้แสงสีขาวยเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา จำเป็นจะต้องศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังนี้ ศึกษากระบวนการโฟโตแคตาไลติก การสังเคราะห์นาโนริบบอนไททาเนต วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้นาโนริบบอนไททาเนตสามารถทำปฏิกิริยาได้ในช่วงแสงสีขาว และศึกษาข้อมูลสถานะพื้นฐานที่ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดมลสารอินทรีย์ได้โดยใช้ช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet, UV) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้ต่อไป

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) (จิราภรณ์., 2551)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic Process) คือ การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy gap, Eg) ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence Band) ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชัน (Conduction Band) อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ขณะเดียวกันแถบเวเลนซ์เกิดช่องว่างอิเล็กตรอนหรือโฮล (Hole, h^+) ซึ่งมีประจุเป็นบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบเวเลนซ์ อธิบายได้ด้วยสมการ (2-1)

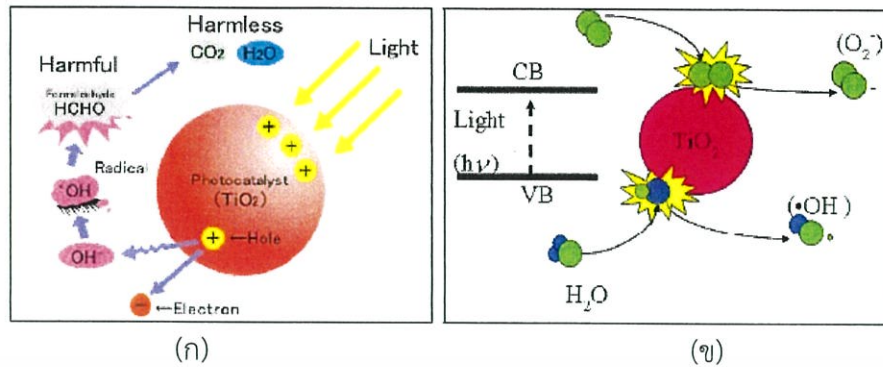


เมื่อโฮลทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) และออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (O_2) จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (e^-) เกิดปฏิกิริยารีดักชันก่อให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O_2^-) ดังแสดงด้วยสมการ (2-2) และ (2-3)



ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลและไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ อาทิ เมทานอล ฟีนอล และสารจำพวกสีย้อม เป็นต้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (ก) กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
 (ข) กลไกการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH·) และเกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O_2^-)
 (ที่มา: www.antonio.licciulli.unile.it: 23/11/2548)

ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจะต้องอาศัยพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ การคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีค่าพลังงานดังกล่าว สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (2-4) (Goswami et al., 2000)

$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} \quad (2-4)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (4.135×10^{-15} eV s)

ε คือ ค่าพลังงานโฟตอน

λ คือ ค่าความยาวคลื่น

c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 eV จากสมการที่ (2-4) พบว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 388 nm การป้อนพลังงานเพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนจึงจะต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับค่าช่องว่างพลังงานการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm

2.2 การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม-ออกไซด์ (Nanotitanium-Oxide Synthesis)

การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบต่างๆ สามารถทำได้หลากหลายวิธี อาทิ วิธีโซล-เจล (Sol-gel) การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) กระบวนการแอนโนไดเซชัน (Anodization) และวิธีการทางความร้อน (Hydrothermal) เป็นต้น

เทคนิคโซล-เจลประกอบด้วยของเหลวที่เรียกว่า Sol และของแข็งที่เรียกว่า gel เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยมีอนุภาคขนาดประมาณ 0.1-1.0 ไมโครเมตร ให้อยู่ในรูปของแข็ง สมบัติและโครงสร้างของสารประกอบนาโนไทเทเนียมที่ได้จากเทคนิคโซล-เจล จะต่างกันตามสภาวะและการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ pH และอัตราส่วนโมลของน้ำและสารตั้งต้น (ศิวพันธ์ุ, 2552)

การสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียมจากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์จะใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเพื่อขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลายหรือสถานะหลอมเหลวในการขึ้นรูปเส้นใย คุณสมบัติของเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะทำให้มีขนาดของรูพรุนเล็ก และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (ปรัชญา, 2555)

กระบวนการแอนโนไดเซชันสำหรับสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม อาศัยเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บริเวณพื้นผิวของโลหะ ด้วยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ โดยผิวของโลหะจะต้องสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลายทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรบนชั้นออกไซด์ รูพรุนจะขยายใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนทั่วผิวโลหะทำให้เกิดสารประกอบนาโนไทเทเนียมแบบท่อ (อภิชน, 2555)

กระบวนการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียมด้วยวิธีการทางความร้อนจะทำภายใต้สภาวะเบส โดยใช้สารตั้งต้นละลายในสารละลายเบสเข้มข้น และนำสารละลายไปผ่านกระบวนการทางความร้อน จากนั้นจึงล้างสารประกอบนาโนไทเทเนียมด้วยน้ำจนมีค่า pH เป็นกลาง ซึ่งสามารถวัดได้จากน้ำล้าง สมบัติและโครงสร้างของสารประกอบนาโนไทเทเนียมที่ได้จะต่างกันออกไปตามสภาวะภายใต้อุณหภูมิ และระยะเวลาที่แตกต่างกัน ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดี-ข้อเสียกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบนาโนไทเทเนียม ออกไซด์

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
โซล-เจล (Sol gel)	อนุภาคที่ได้มีการกระจายรูพรุนพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูง	อนุภาคที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่สม่ำเสมอ
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning)	ขนาดรูพรุนเล็ก อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง	การใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นาน
แอนโนไดเซชัน (Anodization)	พื้นผิวเรียบ รูพรุนเป็นระเบียบสม่ำเสมอ	การดำเนินการยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องควบคุมหลายปัจจัย
วิธีการทางความร้อน (Hydrothermal)	สามารถควบคุมโครงสร้างของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้	ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) (ฉลาด และ ชูสิทธิ์., 2548)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) คือ สารประกอบที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยผลึกอะนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเพื่อบำบัดน้ำเสีย โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และบรูคไคท์ รูปผลึกที่แน่นอนของรูไทล์สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้น้อยกว่าอนาเทส นอกจากนั้นการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลก็ยังเกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับผลึกรูไทล์ ในปัจจุบันจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมากกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่นๆ

2.4 การขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงแสงขาวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Applications Extension of Catalysts within Visible Light Range) (ฉลาด และ ชูสิทธิ์., 2548)

การนำสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้งานนั้นถูกจำกัดด้วยช่วงความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถใช้งานได้จริงในแสงที่ความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงยูวี (Ultraviolet) จึงจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงประสิทธิภาพไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถทำงานได้ในช่วงแสงขาว ความยาวคลื่นแสงสีขาวมีค่าเท่ากับ 400-700 nm จะพบว่าในช่วงความยาวคลื่นของโฟตอนดังกล่าวจะมีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นการขยายขอบเขตการใช้งานในช่วงแสงขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้โดยการเติมโลหะ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการดูดกลืนแสง และลดค่าช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ต่ำลง

2.4.1 กลไกการเติมโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส (Metal doping mechanism for enhancement of photocatalysis)

การเติมโลหะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส เนื่องจากการเติมด้วยโลหะทำให้ค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งมีค่าลดลง (Sayilkan et al., 2007) ดังนั้นจะสามารถใช้โฟตอนที่มีค่าพลังงานต่ำลงในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชัน จึงทำให้ขยายขอบเขตการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถดูดกลืนแสงครอบคลุมช่วงแสงสีขาวได้ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ได้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

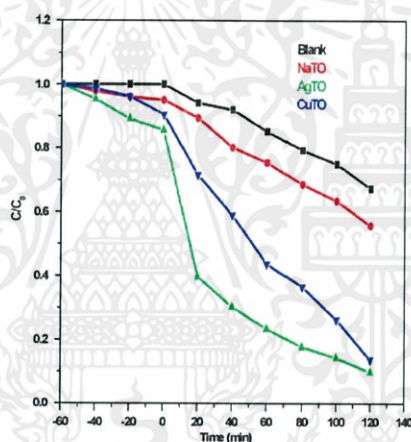
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การสังเคราะห์นาโนริบบอนไททาเนต (Nanoribbon Synthesis)

Kiatkittipong และคณะ (2011) อธิบายการสังเคราะห์นาโนริบบอนไททาเนตด้วยวิธีทางความร้อน โดยดำเนินการภายใต้สภาวะเบสเข้มข้น ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้สารประกอบไททาเนตมีโครงสร้างแบบนาโนริบบอน คือ 200 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากสภาวะดังกล่าวจะทำให้ไททาเนตนาโนริบบอนมีความกว้างเท่ากับ 10-100 นาโนเมตร และมีความยาวอยู่ในหน่วยไมครอน และมีโครงสร้างแบบเป็นชั้น (Layer Structure) ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการเกิดชั้นของแผ่นไททาเนตรวดเร็วและเกิดโครงสร้างที่หนาขึ้นได้ดี

2.5.2 การย่อยสลายสารพิษโดยใช้แสงกระตุ้น (Photodegradation of Pollutant)

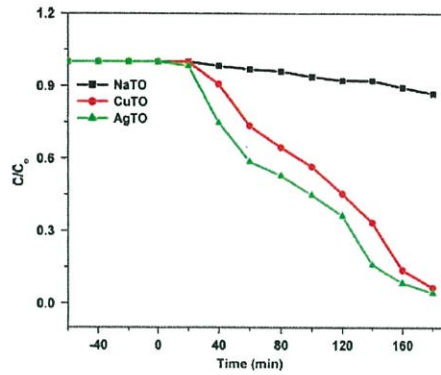
M. Vithal และคณะ (2013) ศึกษาการย่อยสลายฟีนอล (Phenol), สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene blue dye) โดยใช้โซเดียมไททาเนต ซิลเวอร์ไททาเนต และคอปเปอร์ไททาเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอัตราการสลายสีย้อมจะสูงขึ้น เมื่อเวลาในการฉายแสงเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อมต่อเวลาแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ (M. Vithal et al., 2013)

จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะของสารปนเปื้อน ค่าช่องว่างพลังงาน อัตราการกลับมารวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล เป็นต้น โดยจากงานวิจัยพบว่าซิลเวอร์ไททาเนต และคอปเปอร์ไททาเนตมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายดีกว่า โซเดียมไททาเนต อาจมีผลจากการเกิดชั้นภายในช่องว่างพลังงานใกล้กับแถบคอนดักชัน ทำให้สามารถป้องกันการกลับมารวมกันของคู่อิเล็กตรอน นอกจากนี้ ได้ศึกษาการย่อยสลายฟีนอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกับการย่อยสลายสีย้อม จากการทดลองพบว่าโซเดียมไททาเนตมีอัตราการย่อยสลายต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

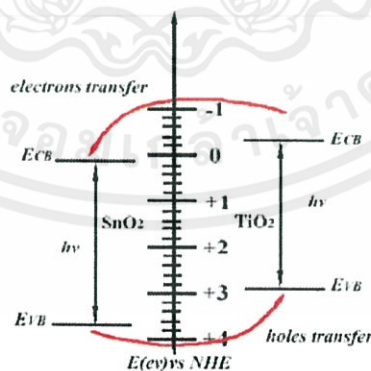


รูปที่ 2.3 การย่อยสลายฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ (M. Vithal et al., 2013)

เนื่องจากโซเดียมไททาเนตมีค่าช่องว่างพลังงานสูง ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปสู่แถบคอนดักชัน เพราะโฟตอนที่ถูกดูดซับมีพลังงานน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงาน จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายฟีนอล ในขณะที่ภายใต้สภาวะเดียวกันการย่อยสลายฟีนอล โดยใช้ซิลเวอร์ไททาเนตและคอปเปอร์ไททาเนต พบว่าร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 95 และ 93 ตามลำดับ ภายในเวลา 3 ชั่วโมง จากการสังเกตพบว่าหากมีฟีนอลอยู่การสะสมของโฮลมีแนวโน้มทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ถูกร่งด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.3 การเติมโลหะ (Metal Doping)

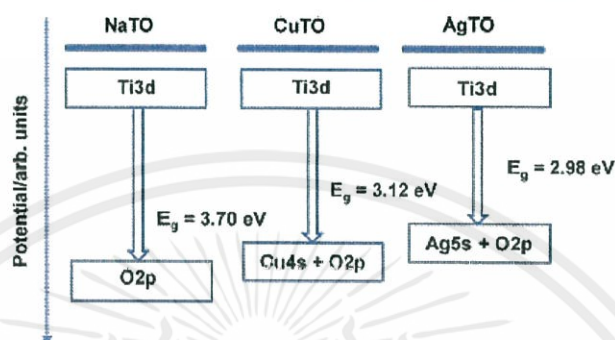
Hou และคณะ (2007) ศึกษากลไกการเติมโลหะในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส ซึ่งสารประกอบโลหะที่ใช้ในการเติมคือ ทินออกไซด์ (SnO_2) มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส) เท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งทินออกไซด์มีค่าช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ทินออกไซด์จึงมีตำแหน่งของแถบคอนดักชันต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าโอกาสในการกลับมารวมตัวกับโฮลในไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของทินออกไซด์ จึงทำให้โฮลที่เกิดขึ้นบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นกลไกการเคลื่อนที่ของประจุแสดงดังรูปที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 2.4 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ (Hou et al., 2007) โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น จึงไม่นับเป็นข้อบกพร่องที่อนุญาตให้ผู้อื่นนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
M. Vithal และคณะ (2013) อธิบายกลไกการลดลงของค่าช่องว่างพลังงานในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส กลไกการลดลงของค่า

ช่องว่างพลังงานเกิดขึ้นโดยแถบวาเลนซ์ของไททาเนตเริ่มก่อตัวขึ้นจากออร์บิทัล 2p ของออกซิเจนอะตอม ในขณะที่แถบคอนดักชันก่อตัวขึ้นจากออร์บิทัล 3d ของไทเทเนียมอะตอม เมื่อมีการแลกเปลี่ยนไอออนโซเดียมกับซิลเวอร์ หรือคอปเปอร์ ออร์บิทัล 5s ของซิลเวอร์อะตอม (ออร์บิทัล 4s ของคอปเปอร์อะตอม) จะผสมกับออร์บิทัล 2p ของออกซิเจนอะตอม และจะทำให้เกิดการขยับขึ้นของแถบวาเลนซ์ ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของค่าช่องว่างพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.5 จากงานวิจัยพบว่าโซเดียมไททาเนต, ซิลเวอร์ไททาเนต, คอปเปอร์ไททาเนต มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.70, 2.98 และ 3.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 กลไกการเคลื่อนที่ของประจุ $\text{SnO}_2/\text{TiO}_2$ (Hou et al., 2007)

การเติมไอออนโลหะลงในไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของสารกึ่งตัวนำได้ (Sharma VK, 2009) การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนโลหะ ทำให้ได้ระดับค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ค่าใหม่ (Hirakawa T, 2004) และขนาดของประสิทธิภาพขึ้นกับคุณสมบัติของโลหะและความเข้มข้นของสาร ไอออนของโลหะบางชนิดสามารถช่วยในการแยกประจุระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของตัวเร่งเพิ่มขึ้น มีการศึกษาตัวอย่างที่ให้ผลลัพธ์ตรงกันข้ามด้วยการเติมไอออนลบของโลหะ ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพลดลง (Vamathevan V, 2004) จะพบว่าประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นกับวิธีที่ไอออนของโลหะไปติดอยู่กับไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจติดอยู่ในลักษณะของการฝังตัว การแทรกตัวตามรูพรุน หรือการจับตัวอยู่เป็นกลุ่มบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ (Thompson TL, 2006)

P. Del Angel และคณะ (2011) ทำการศึกษากระบวนการของ Ag/TiO_2 ที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบผิว (Impregnation Method) โดยใช้สารตั้งต้น คือ สารละลาย Silver acetylacetonate ในอะซิโตน (Acetone) เพื่อให้ได้ 0.5 wt%_{Ag} หลังจากการเติมโลหะด้วยวิธีการเคลือบผิว สารตัวอย่างจะถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในอากาศ 4 ชั่วโมง พบว่าวิธีการเคลือบผิว (Impregnation Method) สามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบด้วยโลหะเงินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโลหะเงินมีผลต่อการลดลงของค่าช่องว่างพลังงาน (E_g)

วิธีการแลกเปลี่ยนประจุเป็นเทคนิคการเติมโลหะที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารมลพิษและช่วยในการเก็บแร่ธาตุที่สำคัญในน้ำ (Komarneni S., and Roy R., 1982) M. Vithal และคณะ (2013) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ Ag^+ และ Cu^+ กับโซเดียมไททาเนต ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) ที่มีโครงสร้างแบบเป็นชั้น (Layer Structure) โดยจะนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแลกเปลี่ยนประจุมาใช้ในการกำจัดสีย้อมชนิด Methylene blue และ Phenol สารตั้งต้นที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน คือ ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) และคอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2) กับโซเดียมไททาเนต ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (Zhang Y., 2008) และวิธีการให้ความความร้อน (Hydrothermal

Method) (Baliteau S., 2004) โดยนำซิลเวอร์ไนเตรท (คอปเปอร์คลอไรด์) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ผสมกับโซเดียมไททาเนตและปั่นกวานตลอด 24 ชั่วโมง ผงอนุภาคของโซเดียมไททาเนตที่ถูกเติมด้วยคอปเปอร์ และซิลเวอร์ไนเตรท จะมีสีฟ้าและเทา ตามลำดับ หลังจากล้างน้ำแล้วนำไปทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้ค่าช่องว่างพลังงานของซิลเวอร์ไททาเนต และคอปเปอร์ไททาเนตมีค่าลดลง สามารถขยายขอบเขตการใช้แสงสีขาวเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของกระบวนการกำจัดสารพิษ

Venkata B. และ Raul F. (2011) ศึกษากระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่ดำเนินการภายใต้แสงขาว โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเติมด้วย Sn^{2+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมจากปฏิกิริยาของไทเทเนียมบิวทอกไซด์ (Titanium butoxide) และสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยดีบุกหลายชนิด ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยทินคลอไรด์ (SnCl_2) จะมีค่าช่องว่างพลังงานที่ต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส) แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเติมด้วยดีบุกเป็นจำนวนมากแต่ก็ยังคงมีโครงสร้างเหมือนไทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส) ในกรณีที่เปลี่ยนสารตั้งต้นเป็นทินเตตระคลอไรด์ (SnCl_4) จะส่งผลให้เกิดผลึกรูโกล์ขึ้นในปริมาณมาก แต่ไม่สามารถช่วยลดค่าช่องว่างพลังงาน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการมีคลอรีนอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาช่วงส่งผลต่อคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยสารประกอบโบรมด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูงกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

Abdelaal M.Y. และ Mohamed R.M. (2013) ศึกษาการเติมโลหะด้วยวิธีเคลือบผิว โดยเติมแพลเลเดียม (Pd) และโคโตซาน (CS) ลงในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู และดำเนินการภายใต้แสงขาว จากการศึกษาพบว่าโคโตซานสามารถป้องกันการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา และความสามารถในการดูดกลืนแสงขาวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยแพลเลเดียมเพิ่มขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าการเติมโลหะเงิน สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสามารถลดโอกาสการกลับมารวมกันของคู่อิเล็กตรอนกับโฮล และพบว่าโลหะเงินเมื่อเติมลงในตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วสามารถทำให้ค่าช่องว่างพลังงานลดลงได้มาก เมื่อเทียบกับการเติมโลหะชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์โครงสร้างนาโนริบบอน

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร
2. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร
3. กระจกบดพลาสติก 100 มิลลิลิตร
4. Hydrothermal
5. กระจกบด Teflon
6. หลอดหยดพลาสติก
7. เครื่องชั่ง
8. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
9. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
10. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
11. ตู้อบ
12. ถ้วยระเหย
13. ชุดครกบดสาร
14. ขวดเก็บสาร
15. กระดาษลิตมัส
16. ซ้อนตักสาร
17. แท่งแก้วคนสาร

สารเคมี

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Anatase, เคมีภัณฑ์)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH anhydrous pellets, Carlo Ebra)
3. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวน 30 นาที
2. เทสารใส่กระจกบด Teflon นำไปประกอบเข้าชุด Hydrothermal จากนั้นนำเข้าตู้อบอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 ชุด Hydrothermal (ที่มา : www.nano.org.uk/news/1096/ : 18/03/2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เทสารออกจากกระบอก Teflon แล้ววัดค่า pH ของสาร
4. ปรับสภาพความเป็นเบสด้วยการเติมน้ำ 400 มิลลิลิตร แล้วปั่นจน 20 นาที จากนั้นใช้ เครื่องหมุนเหวี่ยงในการแยกสารกับน้ำด้วยความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.2 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) (ที่มา : www.medicaexpo.com : 18/03/2557)

5. ทำซ้ำข้อ 4. จนกระทั่งค่า pH ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 7 – 8 จึงนำสารมาอบให้แห้งที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติมโลหะ

3.2.1 วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

อุปกรณ์

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร | 2. กระบอกตวงพลาสติก 100 มิลลิลิตร |
| 3. เครื่องชั่ง | 4. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) |
| 5. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) | 6. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) |
| 7. ตู้อบ | 8. ถ้วยระเหย |
| 9. ชุดครกบดสาร | 10. ขวดเก็บสาร |
| 11. ซ้อนตักสาร | 12. แท่งแก้วคนสาร |

สารเคมี

1. โซเดียมไททานาเทนนาโนริบบอน ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)
2. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate p.A., Applichem)
3. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

1. ผสมโซเดียมไททานาเทนนาโนริบบอน 0.950 กรัม ซิลเวอร์ไนเตรต 0.0787 กรัม และน้ำ 40 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างสารด้วยน้ำกลั่น และแยกเนื้อสารโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง
3. ทำสารให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2.2 วิธีการเคลือบผิว (Impregnation)

อุปกรณ์

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร | 2. กระจกบดวางพลาสติก 100 มิลลิลิตร |
| 3. เครื่องชั่ง | 4. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) |
| 5. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar) | 6. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) |
| 7. ตู้อบ | 8. ถ้วยระเหย |
| 9. ครกบดสาร | 10. ขวดเก็บสาร |
| 11. ซ้อนตักสาร | 12. แท่งแก้วคนสาร |

สารเคมี

1. โซเดียมไททานาเทนนาโนริบบอน ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)
2. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate p.A., Applichem)
3. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. ผสมโซเดียมไททานาเทนนาโนริบบอน 0.950 กรัม ซิลเวอร์ไนเตรต 0.0787 กรัม และน้ำ 40 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง
2. ล้างสารด้วยน้ำกลั่น และแยกเนื้อสารโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง
3. ทำสารให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. นำสารที่แห้งแล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การย่อยสลายสีย้อม

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 400 มิลลิลิตร
2. ครอบขวดพลาสติก 50 มิลลิลิตร
3. ครอบขวดพลาสติก 100 มิลลิลิตร
4. เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
5. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
6. ปิเปต
7. เครื่องชั่ง
8. ไชริงค์พลาสติก (Syringe)
9. ไมโครฟิลเตอร์
10. ซ้อนตักสาร
11. อลูมิเนียมฟรอยด์
12. ขวดสีชา
13. ลูกยาง
14. หลอดไอปรอทความดันสูง 500 วัตต์
15. แท่งแก้วคนสาร

สารเคมี

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา
 - i. โซเดียมไททานาเทนนาโนริบบอน ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)
 - ii. ซิลเวอร์ไททานาเทนนาโนริบบอน ($\text{Ag}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)
2. สีย้อม (Methylene blue, Union Chemical 1986)
3. น้ำกลั่น

เครื่องมือวิเคราะห์

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์



รูปที่ 3.3 Spectrophotometer (ที่มา : www.biotek.com.au : 18/03/2557)

วิธีการทดลอง

1. การทดลองแบบไม่ใช้แสง

- 1.1 เตรียมบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร ห่อด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์เพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก

1.2 เติมน้ำละลายสีย้อมความเข้มข้น 16 พีพีเอ็ม กับตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม ลงในบีกเกอร์ ปิดอลูมิเนียมฟรอยด์ด้านบนบีกเกอร์

- 1.3 นำบีกเกอร์ไปตั้งบนกวนในที่ตุ๋นแสง และเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมทุกๆ 30 นาที

1.4 ใช้ไมโครฟิลเตอร์กรองสารละลายสีอย่างก่อนนำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ใช้ค่าความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร แล้วบันทึกผล

2. การทดลองแบบใช้แสง

2.1 ก่อนทำการทดลองแกะอลูมิเนียมฟรอยด์ออกจากบีกเกอร์

2.2 เปิดไฟ และนำบีกเกอร์สารละลายสีอย่างไปตั้งบนกวนต่อ



รูปที่ 3.4 หลอดไอปรอทความดันสูง 500 วัตต์

2.3 เก็บตัวอย่างสารละลายสีอย่างทุกๆ 30 นาที

2.4 ใช้ไมโครฟิลเตอร์กรองสารละลายสีอย่างก่อนนำไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ใช้ค่าความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร แล้วบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

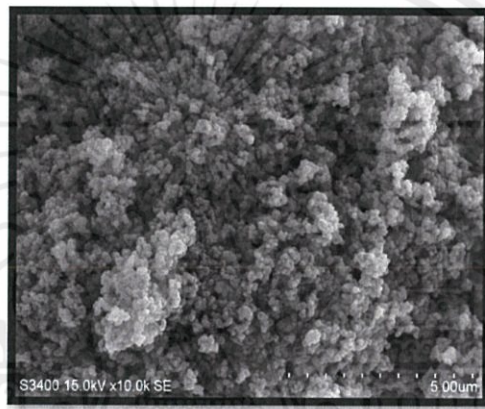
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

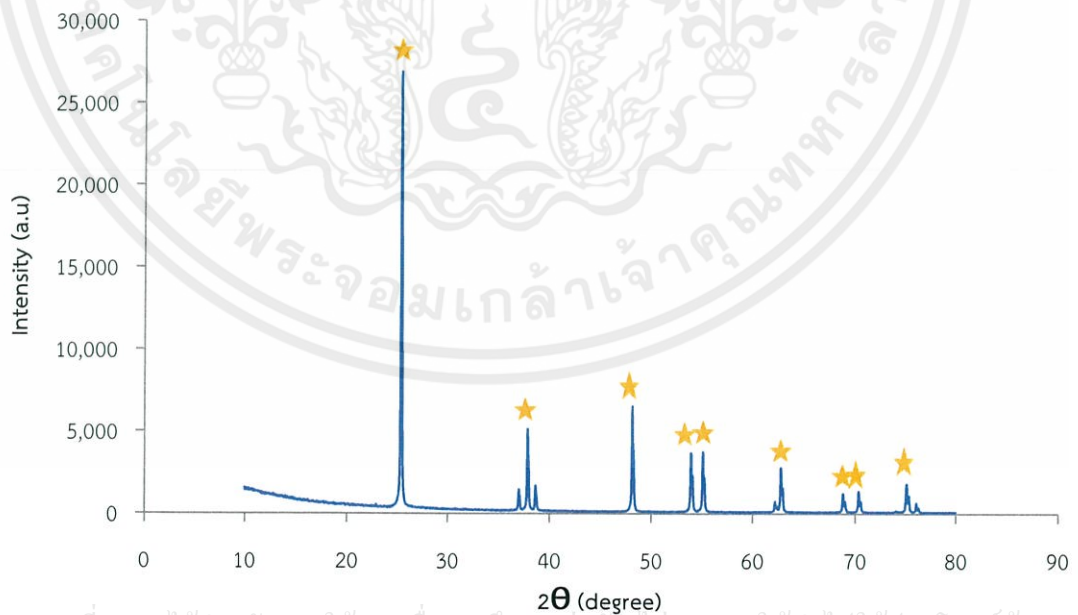
4.1. โทเทเนียมไดออกไซด์

โทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอะนาเทส ความบริสุทธิ์ 99.7% มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 132-395 นาโนเมตร พื้นที่ผิวเท่ากับ 10.48 ตารางเมตรต่อกรัม (พื้นที่ผิวได้มาจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค BET) แสดงลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ผล XRD ของโทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ารูปแบบการขึ้นของพีคนั้น แสดงตามรูปแบบพื้นฐานของโทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส 100%) (Xiuzhen Wei et al., 2013)



รูปที่ 4.1 ภาพ SEM กำลังขยาย 10 เท่า ของโทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส)

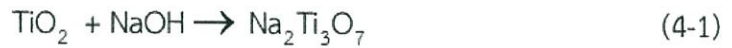


รูปที่ 4.2 ผล XRD ของโทเทเนียมไดออกไซด์ (อะนาเทส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 โซเดียมไททานาโนริบบอน

โซเดียมไททานาโนริบบอนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นไทเทเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง ที่ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง กลไกการเกิดโซเดียมไททานาโนริบบอนแสดงดังสมการที่ (4.1)



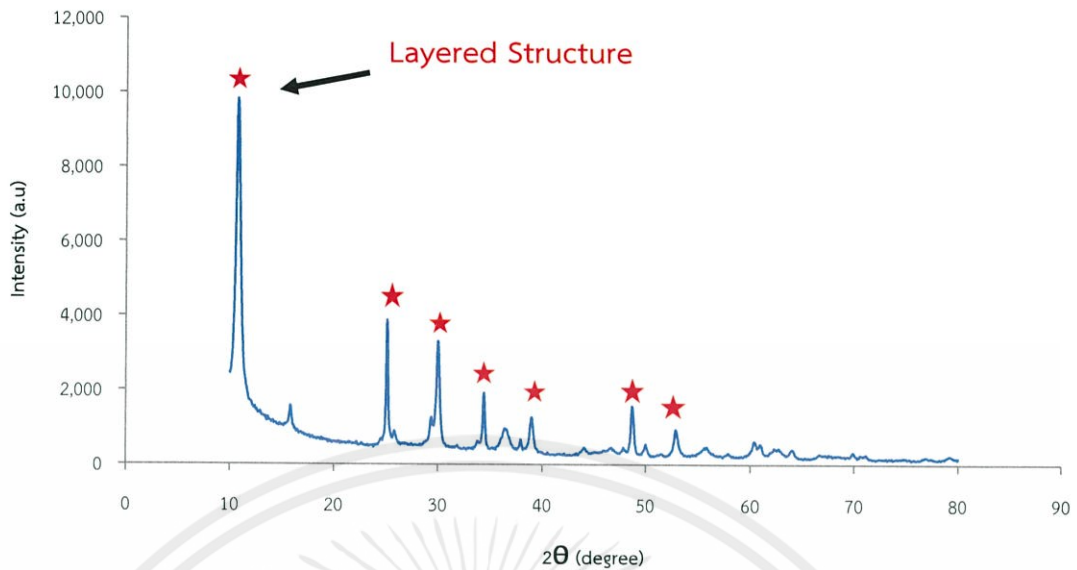
รูปที่ 4.3 (ก) แสดงโครงสร้างโซเดียมไททานาโนริบบอน มีความกว้าง 90 นาโนเมตร ความยาว 1,315 - 4,540 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวเท่ากับ 14.19 ตารางเมตรต่อกรัม (พื้นที่ผิวได้มาจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค BET) การสังเคราะห์นาโนริบบอนภายใต้สภาวะดังกล่าว นอกจากอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแล้ว ระยะเวลาในการปั่นกวนสารถือเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้เป็นนาโนริบบอน ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมจะทำให้การผสมสารเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ จากรูปที่ 4.3 แสดงระยะเวลาในการปั่นกวนที่ต่างกันพบว่า ระยะเวลาในการปั่นกวน 1.30 ชั่วโมง (รูปที่ 4.3 ก) สามารถเกิดเป็นริบบอนนาโนได้ได้สมบูรณ์กว่าเมื่อเทียบกับการปั่นกวนที่ใช้ระยะเวลาสั้น 30 นาที (รูปที่ 4.3 ข) เนื่องจากการผสมกันอย่างทั่วถึงระหว่างสารละลายเบสเข้มข้นกับไทเทเนียมไดออกไซด์จะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ของนาโนริบบอนที่เกิดจากการผสมระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ระยะเวลาในการปั่นกวน (ก) 1.30 ชั่วโมง (ข) 30 นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์ผล XRD ของนาโนริบบอน พบว่าเป็นโซเดียมไททานาโนริบบอน ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) และจากการขึ้นของพีคที่ $2\theta \approx 11^\circ$ แสดงถึงรูปแบบการเรียงตัวของโครงสร้างที่เป็นแบบชั้น (Layered Structure) ซึ่งค่าระยะห่างระหว่างชั้นของไททานาโนริบบอนเท่ากับ 0.80 \AA (Kiatkittipong et al., 2011) ที่ซึ่งมีความแตกต่างจากรูปแบบ XRD ของรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (อเนกาค) เป็นโซเดียมไททานาโนริบบอนอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผล XRD ของโซเดียมไททานาโนริบบอน

การเกิดลักษณะโครงสร้างแบบชั้น มีผลเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง อัตราการเติบโตและเกิดเป็นชั้นของแผ่นไททานาต จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะทำให้การเกิดโครงสร้างที่หนาชั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดี ซึ่งจะเป็นการยับยั้งแรงทางโครงสร้างที่ทำให้เกิดการม้วน ดังนั้นผลที่ได้จากการดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง คือเกิดโครงสร้างแบบนาโนริบบอนที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนเรียบ และเรียงตัวซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเติมโลหะระหว่างวิธีการเคลือบผิวกับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

จากตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ผลด้วยวิธี EDX เพื่อบ่งบอกสัดส่วนองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโซเดียมก่อนและหลังการเติมโลหะ จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยโลหะมีปริมาณโซเดียมลดลง จากงานวิจัยของ M. Vithal และคณะ (2013) พบว่าการเติมซิลเวอร์ไอออนในไททานาตสามารถลดแถบช่องว่างพลังงานได้เป็น 2.98 eV ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงความยาวคลื่นแสงสีขาวย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนจะมีปริมาณโซเดียมน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมด้วยวิธีเคลือบผิว เนื่องจากการเติมโลหะเงินในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อปริมาณไอออนของโลหะเงินที่จะติดอยู่กับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเติมโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีการติดของซิลเวอร์ไอออนในลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออนกับซิลเวอร์ไอออน โดยซิลเวอร์ไอออนจะเข้าไปแทนที่โซเดียมไอออน ซิลเวอร์ไอออนจะสามารถแทรกระหว่างชั้นภายในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีโครงสร้างแบบเป็นชั้น แต่การเติมโลหะเงินด้วยวิธีการเคลือบผิวการติดของไอออนโลหะอาจจะจะมีลักษณะของการแทรกตามรูพรุนและการจับตัวเป็นกลุ่มก่อนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

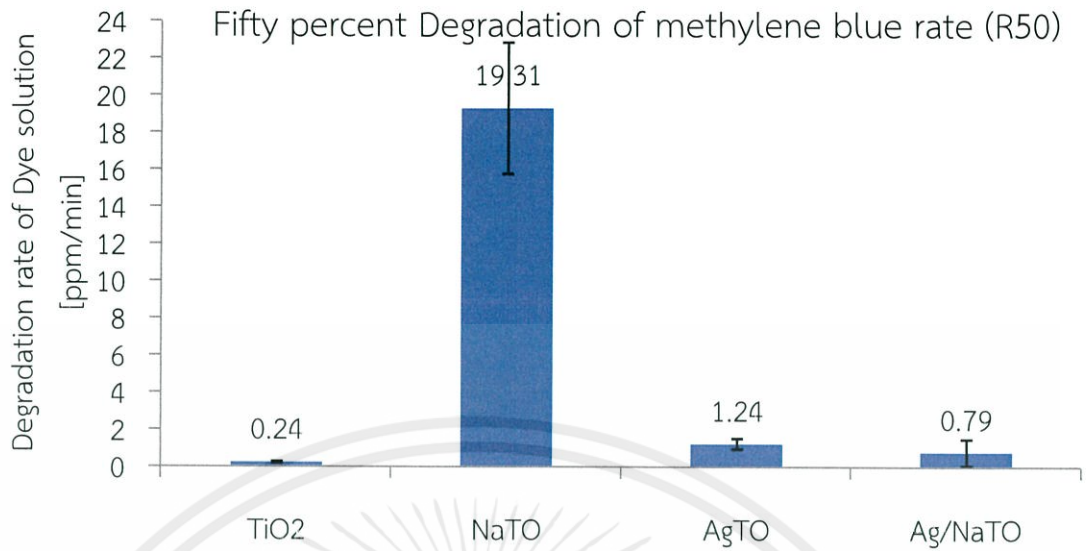
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่ได้จากการเติมโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา

Element	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%wt)		
	Non-doped (NaTO)	Impregnation method (Ag/NaTO)	Ion exchange method (AgTO)
Na	13.82	12.79	12.70
Ag	-	4.10	5.81

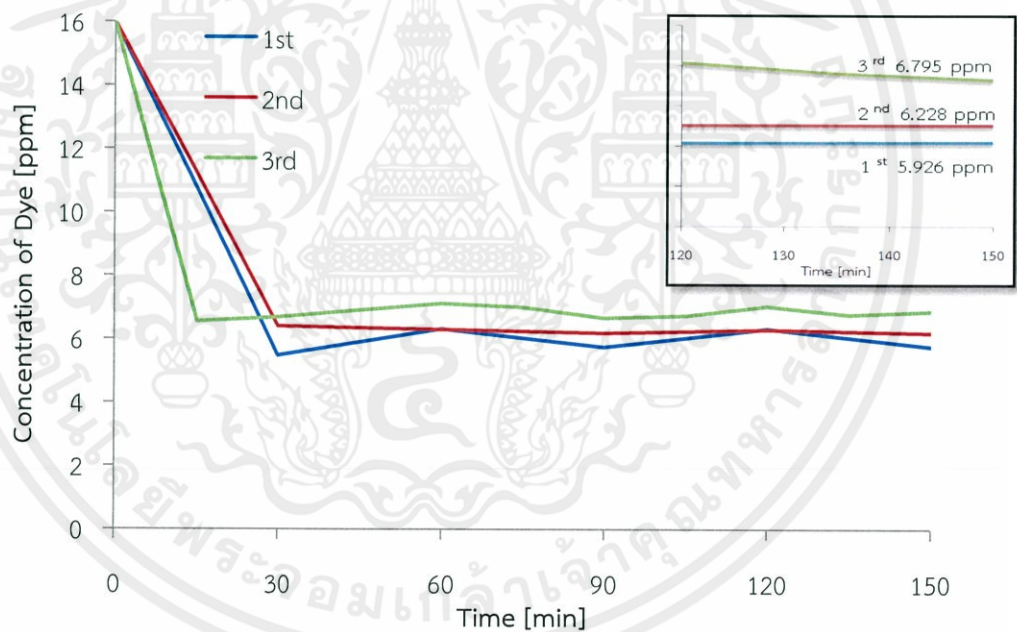
4.4 การย่อยสลายสีย้อม

จากรูปที่ 4.5 แสดงอัตราการย่อยสลายสีย้อม เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นลดลงร้อยละ 50 (R50) ซึ่งใช้ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่แตกต่างกัน และใช้แสงในการกระตุ้นปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (TO) โซเดียมไททานเตนาโนริบบอน (NaTO) ซิลเวอร์ไททานเตนาโนริบบอนที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (AgTO) และซิลเวอร์ไททานเตนาโนริบบอนที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีเคลือบผิว (Ag/NaTO) มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 (± 0.04) ppm/min, 19.31 (± 3.54) ppm/min, 1.23 (± 0.29) ppm/min และ 0.79 (± 0.72) ppm/min ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมระหว่างโซเดียมไททานเตนาโนริบบอนที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าโซเดียมไททานเตนาโนริบบอนมีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากโซเดียมไททานเตนาโนริบบอนมีระนาบที่สามารถไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ในปริมาณมาก (Kiatkittipong et al., 2011) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลจะทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารพิษ และนอกจากนี้โซเดียมไททานเตนยังมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมระหว่างโซเดียมไททานเตนาโนริบบอนกับซิลเวอร์ไททานเตนาโนริบบอนที่ถูกเติมด้วยโลหะ พบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมของซิลเวอร์ไททานเตนาโนริบบอนมีค่าต่ำกว่าโซเดียมไททานเตน เนื่องจาก การเติมโลหะทำให้ค่าช่องว่างพลังงานลดลง (M. Vithal et al., 2013) จากการลดลงของช่องว่างพลังงานเป็นสาเหตุที่ทำให้การกลับมารวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอนเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

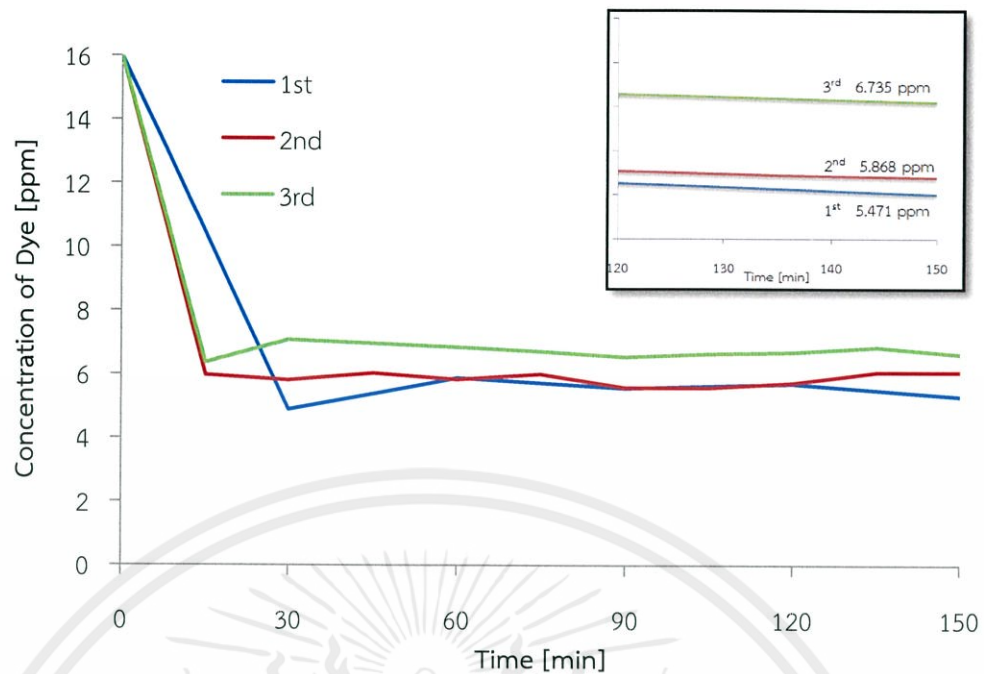


รูปที่ 4.5 อัตราการย่อยสลายสีย้อม เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นลดลงร้อยละ 50 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของสีย้อมหลังถูกย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีเคลือบผิว (Ag/NaTO) หลังนำกลับมาใช้ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของสีย้อมหลังถูกย่อยสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (AgTO) หลังนำกลับมาใช้ซ้ำ

จากรูปที่ 4.6 แสดงการลดลงของความเข้มข้นสีย้อม ซึ่งนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีเคลือบผิวกลับมาใช้ซ้ำและกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำในครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่เหลือจากการย่อยสลายเท่ากับ 5.926 ppm, 6.228 ppm, และ 6.795 ppm ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้งานได้แต่ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมจะลดลง จากรูปที่ 4.7 แสดงการลดลงของความเข้มข้นสีย้อม ซึ่งนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาใช้ซ้ำและกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำในครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่เหลือจากการย่อยสลายเท่ากับ 5.471 ppm, 5.868 ppm, และ 6.735 ppm ตามลำดับ จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติมซิลเวอร์ในไททานเนตนาโนริบบอนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในครั้งแรกได้ดี และการนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่ 3 ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเทียบกับการเติมซิลเวอร์ในไททานเนตนาโนริบบอนด้วยวิธีเคลือบผิว แสดงให้เห็นว่าข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออนในโซเดียมไททานเนตสามารถกักเก็บปริมาณซิลเวอร์ทั้งบนพื้นที่ผิวและในชั้นโครงสร้างได้มากกว่าเติมโลหะด้วยวิธีเคลือบผิว ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่า นอกจากนี้การมีอยู่ของซิลเวอร์ในชั้นโครงสร้างทำให้การหลุดออกของซิลเวอร์เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้สามารถยืดอายุการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางความร้อนทำให้ได้โซเดียมไททานเตนาโนริบบอน มีโครงสร้างเป็นแบบชั้น พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 14.19 ตารางเมตรต่อกรัม และมีระนาบแบบ {010} ที่ทำให้เกิด OH^\bullet มากขึ้น เมื่อเติมโลหะเงินเข้าไปในโซเดียมไททานเตนาโนริบบอน ทำให้ค่าช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลงเหลือ 2.98 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผลให้ขอบเขตการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถขยายไปสู่ช่วงแสงขาวได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะเงินด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการใช้งานสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเติมโลหะด้วยวิธีการเคลือบผิว เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพจากการการย่อยสลายสีย้อม พบว่าโซเดียมไททานเตนาโนริบบอนมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากปัจจัยของ พื้นที่ผิวและระนาบในการเกิด OH^\bullet มีความสำคัญต่อการย่อยสลายสีย้อม มากกว่าการลดลงของค่าช่องว่างพลังงาน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เข้าไปตรวจวัดปริมาณสัดส่วนของโลหะเงินและโซเดียมด้วย EDX เพื่อดูปริมาณของโลหะเงินเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากใช้ซ้ำในแต่ละครั้ง
2. ควรปรับปริมาณของโลหะเงินที่เติมเข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา หาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ฉลาด บรรเทา และชูลิทธิ ศรีสุทธิมงคล (2548). “การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปรัชญา นิยมไทย และจรรยา ตรีมงคล หิรัญวิวัฒน์กุล (2555). “เทคนิคการปั่นเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประโยชน์ในทางการแพทย์”. Plastic BI-Weekly news, 52.

ศิวพันธุ์ รัตนปฏิพันธุ์ (2552). “การศึกษาวัสดุพอลิเมอร์เสริมองค์ประกอบด้วยซิลิเกตสังเคราะห์เพื่อเป็นตัววัดค่าความเป็นกรดต่าง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

อภิชน วัชรนทร์วงศ์ (2555). ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อสำหรับบำบัดก๊าซมลพิษโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Antonio Licciulli. “Photocatalysis.” [online]. Available : www.antonio.licciulli.unile.it. 2556.

Bio-tek. “UNICO™ Series 1200 Spectrophotometer.” [online]. Available : www.biotek.com.au/products/equipment/spectrophotometers. 2557.

Boppana, Venkata, Bharat Ram ; Lobo, Raul F. (2011). “Photocatalytic degradation of organic molecules on mesoporous visible-light-active Sn (II)-doped titania.” Journal of catalysis, 281(1), 156-168.

D. Yogi Goswami., Frank Kreith., and Jan F. Kreider. (1999). Principles of solar engineering, 2nd ed. Philadelphia : Taylor & Francis.

Hou, L.R., Yuan, C.Z., and Peng, Y. (2007). “Synthesis and Photocatalytic property of SnO₂/TiO₂ nanotube composites.” Journal of Hazardous Material, B139, 310-315

Kiatkittipong K., Scott J., and Amal R. (2011). “Hydrothermally Synthesized Titanate Nanostructures: Impact of Heat Treatment on Particle Characteristics and Photocatalytic Properties”. APPLIED MATERIALS & INTERFACES, 3, 3988-3996.

Institute of Materials Research and Engineering. “Hydrothermal synthesis offers and easier route to lead-free piezoelectric materials.” [online]. Available : www.nano.org.uk/news/1096/. 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

M. Vithal, S. Rama Krishna, G. Ravi, Suresh Pulla, Radha Velchuri and Someshwar Pola. (2013). "Synthesis of Cu^{2+} and Ag^+ doped $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ by a facile ion-exchange method as visible-light-driven photocatalysts". *Ceramics International*, 39, 8429-8439.

Medical expo. "Bench-top laboratory centrifuge 15000 rpm| UNIVERSAL 320R." [online]. Available : www.medicalexpo.com/prod/andreas-hettich-67600.html. 2557.

Mohummad A., Behnajady, and Hamed Eskandarloo. 2013. "Silver and copper co-impregnated onto TiO_2 -P25 nanoparticles and its photocatalytic activity". *Chemical engineering journal*, 228, 1207-1213.

S. Komarneni., and R. Roy. (1982). "Use of γ -Zirconium phosphate for Cs removal from radioaction waste." *Nature Journal*, 299, 707-708.

Sauvet, A.-L., Baliteau S., Lopez C., and Fabry P. (2004). "Synthesis and characterization of sodium titanates $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ and $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$." *Journal of Solid State Chemistry*, 177, 4508-4515.

Sayilkan, F., Asilt' urk, M., Tatar, P., Kiraz, N., Arpac, E., and Sayilkan, H. (2007). "Photocatalytic performance of Sn-doped TiO_2 nanostructured mono and double layer thin films for malachite green dye degradation under UV and vis-lights." *Journal of Hazardous Material*, 144, 140-146.

Sharma VK., Ynguard RA., and Lin, Y. (2009). "Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities." *Advances in colloid and interface science*, 145, 83

Thompson TL., and Yates JT Jr. (2006). "Surface science studies of the photoactivation of TiO_2 —new photochemical processes." *Chem rev.*, 106(10):4428-53

V. Rodriguez-Gonzalez., F.M. Moran-Pineda., P. Del Angel., O. Vazquez-Cuchillo., and R. Gomez. (2011). "Sol-gel and impregnated prepared silver TiO_2 semiconductors as photocatalysts for the UV decomposition of 2,4-d: a comparative study of the preparation method." *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 59(1), 57-62

Vamathevan, V., Amal, R., Beydoun, D., Low, G., and McEvoy, S. (2002). "Photocatalytic oxidation of organics in water using pure and silver-modified titanium dioxide particles." *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, 148, 233-245.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

Zhang, Y., Fu, W., Yang, H., Li, M., Li, Y., Zhao, W., Sun, P., Yuan, M., Ma D., Liu, B., and Zou, G. (2008). "A novel humidity sensor based on $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ nanowires with rapid response-recovery." Sensors and Actuators, B135, 317–321.



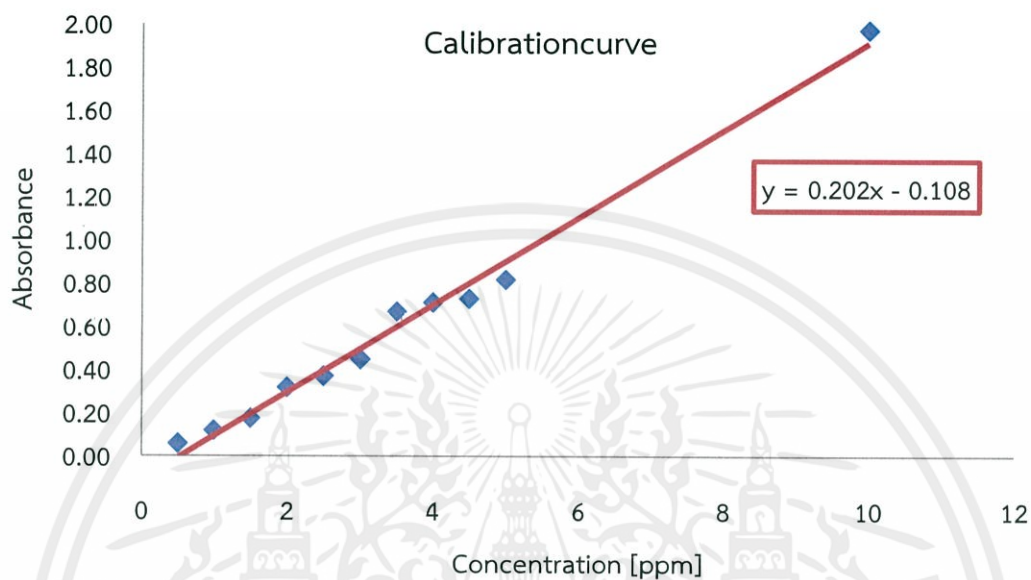
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ

กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อม



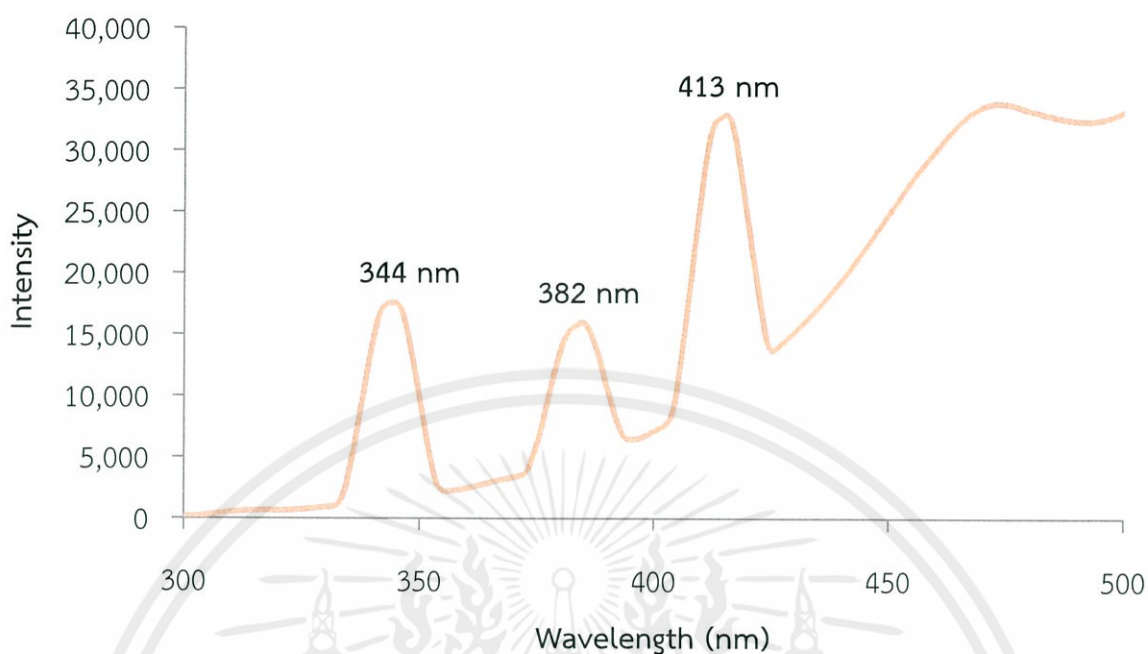
รูป ก.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม

ตาราง ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม

Concentration [ppm]	Absorbance.
0.5	0.057
1.0	0.119
1.5	0.175
2.0	0.318
2.5	0.370
3.0	0.447
3.5	0.699
4.0	0.711
4.5	0.730
5	0.817
10	1.974

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงช่วงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง



รูป ก.2 สเปกตรัมแสงของหลอดไอปรอทความดันสูง

ตาราง ก.2 ความสัมพันธ์ของความเข้มของพลังงานกับความยาวคลื่นของหลอดไอปรอทความดันสูง ในช่วง 300 - 450 นาโนเมตร

wavelength (nm)	Relative Intensity (%)
344	27
382	24
413	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

การย่อยสลายสีย้อม

ตาราง ข.1 ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยไทเทเนียมไดออกไซด์

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.381	2.421	5	12.104
60	0.251	1.775	5	8.874
120	0.158	1.317	5	6.584
150	0.266	1.851	3	5.554

ตาราง ข.2 ผลการย่อยสลายสีย้อมโดยโซเดียมไททาเนตนาโนริบบอน

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.159	1.322	1	1.322
60	0.175	1.401	1	1.401
90	0.202	1.535	1	1.535
120	0.168	1.366	1	1.366
150	0.090	0.980	1	0.980

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation)

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.261	1.827	3	5.480
60	0.317	2.104	3	6.312
90	0.279	1.916	3	5.748
120	0.318	2.109	3	6.327
150	0.280	1.921	3	5.762

ตาราง ข.4 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 2

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.284	1.941	3	5.822
60	0.308	2.059	3	6.178
90	0.308	2.059	3	6.178
120	0.328	2.158	3	6.475
150	0.349	2.262	3	6.787

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation) ใช้ครั้งที่ 3

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.342	2.228	3	6.683
60	0.371	2.371	3	7.114
90	0.341	2.223	3	6.668
120	0.366	2.347	3	7.040
150	0.355	2.292	3	6.876

ตาราง ข.6 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange)

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.221	1.629	3	4.886
60	0.288	1.960	3	5.881
90	0.267	1.856	3	5.569
120	0.276	1.901	3	5.703
150	0.250	1.772	3	5.317

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.7 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 2

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.283	1.936	3	5.807
60	0.284	1.941	3	5.822
90	0.268	1.861	3	5.584
120	0.278	1.911	3	5.733
150	0.301	2.025	3	6.074

ตาราง ข.8 ผลการย่อยสลายสีข้อมโดยซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange) ใช้ครั้งที่ 3

Time [min]	Absorbance.	x [ppm]	Dilution factor	Concentration [ppm]
0	0.215	1.600	10	16.000
30	0.368	2.356	3	7.069
60	0.353	2.282	3	6.847
90	0.333	2.183	3	6.550
120	0.343	2.233	3	6.698
150	0.339	2.213	3	6.639

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.9 อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

% Degradation	Degradation rate of			
	TO	NaTO	Ag/NaTO	AgTO
10	0.37	23.32	1.55	1.67
50	0.28	23.61	1.72	1.37
90	0.16	4.49	-	-

ตาราง ข.10 อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ครั้งที่ 2

% Degradation	Degradation rate of	
	Ag/NaTO	AgTO
10	1.17	2.54
50	0.96	2.04

ตาราง ข.11 อัตราการย่อยสลายสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ครั้งที่ 3

% Degradation	Degradation rate of	
	Ag/NaTO	AgTO
10	2.13	2.3
50	1.66	1.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.12 ผล EDX แสดงปริมาณองค์ประกอบของซิลเวอร์ไททาเนต (Impregnation)

Element	Wt%	At%
OK	46.09	67.82
NaK	12.79	13.10
AgL	4.10	0.90
TiK	37.01	18.19
Matrix	Correction	ZAF

ตาราง ข.13 ผล EDX แสดงปริมาณองค์ประกอบของซิลเวอร์ไททาเนต (Ion-exchange)

Element	Wt%	At%
OK	41.89	64.63
NaK	12.70	13.63
AgL	5.81	1.33
TiK	39.61	20.41
Matrix	Correction	ZAF

ตาราง ข.13 อัตราการย่อยสลายสีย้อม เมื่อความเข้มข้นลดลงร้อยละ 50

Trial	Catalyst			
	TiO ₂	NaTO	AgTO	Ag/NaTO
X ₁	0.28	23.61	1.37	1.72
X ₂	0.22	20.43	1.11	0.97
X ₃	0.19	17.84	0.92	0.28
X ₄	0.27	15.34	1.57	0.17
Mean	0.24	19.31	1.24	0.79
SD	0.04	3.54	0.29	0.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

การคำนวณคำนวณหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงานของ TiO_2

$$\text{Bandgap Energy (B.G)} = \frac{1,240}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{1,240}{3.2}$$

$$\lambda = 387.5 \text{ nm}$$

หากคำนวณจากช่องว่างพลังงานของ $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ และ $\text{Ag}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ ความยาวคลื่นจะมีค่าเท่ากับ 335.14 nm และ 416.11 nm ตามลำดับ

การคำนวณปริมาณสาร

- การเตรียม Ag ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ต้องการเจือ Ag เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา 5%โดยน้ำหนัก มีสารตั้งต้นเป็น AgNO_3

เมื่อ Ag 1 mol น้ำหนัก 107.87 g

AgNO_3 1 mol น้ำหนัก 169.87 g

ถ้า Ag 0.05 g จะต้องใช้ AgNO_3 ปริมาณ

$$X_{\text{Ag}} = \frac{169.87 \times 0.05}{107.87}$$

$$X_{\text{Ag}} = 0.0787$$

ดังนั้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ต้องเตรียม AgNO_3 0.787 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเตรียมสารละลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อม 100 ppm

$$\text{ppm} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของตัวทำละลาย}} \times 10^6$$

$$100 \text{ ppm} = \frac{X_{\text{dye}}}{1,000} \times 10^6$$

$$X_{\text{dye}} = 0.1 \text{ g}$$

จะได้สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 100 ppm 1 ลิตร

เจือจางสารละลายสีย้อมให้มีความเข้มข้น 16 ppm

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$100 \times V_1 = 16 \times 200$$

$$V_1 = 32 \text{ ml}$$

ดังนั้น ต้องใช้สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 100 ppm 32 มิลลิลิตร มาเจือจางเพื่อให้ได้สารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 16 ppm ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

การคำนวณความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่ผ่านกระบวนการย่อยสลาย

จากกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม ได้สมการเส้นตรง

$$y = 0.202X - 0.108$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง

X คือ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

ในทดลองจริง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมมีค่าสูงเกินช่วงที่สามารถยอมรับความคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องทำการเจือจางสารละลายสีย้อมก่อนทำการวัด แล้วจึงนำค่าการเจือจางมาคำนวณในภายหลัง

เช่น เจือจางสารละลายสีย้อม 5 เท่า เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงมีค่า 0.251

สมการ $y = 0.202X - 0.108$

$$0.251 = 0.202X - 0.108$$

$$X = 1.775 \text{ ppm}$$

ความเข้มข้นที่แท้จริง $[] = X \times D.F$

$$[] = 1.775 \times 5$$

$$[] = 8.875 \text{ ppm}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมหลังผ่านการย่อยสลาย คือ 8.875 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น ๆ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้