

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ HYBRID CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ HYBRID CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
ACTIVITY OF $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ HYBRID CATALYST



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN INDUSTRIAL CHEISTRY

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยา
 โฟโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$
 PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC
 ACTIVITY OF $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ HYBRID CATALYST

ชื่อนักศึกษา นางสาวเปมิกา ค่าน้ำมิตร รหัสนักศึกษา 54050221
 นางสาวมนสิชา เชื้อประไพศิลป์ รหัสนักศึกษา 54050246
 นายธนพัชญ์ ณะภูโต รหัสนักศึกษา 54050276

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ภาควิชา เคมี
 ปีการศึกษา 2557
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี
 สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.เอกรัฐ เดชศรี ประธานกรรมการ	เอกรัฐ เดชศรี
ดร.เชตศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ กรรมการ	เชตศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์
ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	ชวาลย์ ศรีวงษ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยา โพโตคะตะไลติกของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเปมิกา คำน้ำมิตร	รหัสนักศึกษา 54050221
	นางสาวมนสิชา เชื้อประไพศิลป์	รหัสนักศึกษา 54050246
	นายธนพัชญ์ ณะภูโต	รหัสนักศึกษา 54050276
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์ และความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โดยเตรียมได้จากวิธีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนอย่างง่ายเป็นสารเจือ (Doping reagent) บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ และศึกษาอิทธิพลที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โดยแบ่งเป็น 3 อิทธิพลคือ ค่าพีเอชที่ 8 9 และ 11 เวลาการปั่นกวนที่ 15 60 และ 120 นาที และปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ 0.08 0.16 0.24 0.32 และ 0.40 กรัม จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะสัญญาณด้วยเทคนิค SEM พบว่า ไม่มีความแตกต่างกับลักษณะสัญญาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือ แต่อนุภาคมีการเกาะตัวกันแน่นขึ้น วิเคราะห์ผลึกและสัญญาณด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR พบว่าทั้งสองเทคนิคไม่ปรากฏพีคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ บนสเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เนื่องจากสารที่เจือลงไปมีปริมาณน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มาก ศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค PL และ DRS พบว่าเมื่อค่าพีเอชและเวลาในการปั่นกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แถบพลังงานแคบลง ซึ่งการที่แถบพลังงานแคบลงนั้นจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแสงยูวี-วิสิเบิลมากขึ้น จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการเกิดโพโตคะตะไลติกของสารตัวอย่างในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินภายใต้อิทธิพลต่างๆด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ เพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

คำสำคัญ : ไทเทเนียมไดออกไซด์ เพนตะแอมมินคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ โพโตคะตะไลติก อินดิโกคาร์มิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	PREPARATION, CHARACTERIZATION AND PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ HYBRID CATALYST		
Student	MISS Pemika	Kanammitr	Student ID 54050221
	MISS Monsicha	Chuaprapaisilp	Student ID 54050246
	MR. Thanapat	Naputo	Student ID 54050276
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Dr. Chaval Sriwong		

ABSTRACT

The aims of this research is to study the preparation, characterization and photocatalytic activity of $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ hybrid catalyst. $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ was prepared by the synthesis coordination complexes and coated on surface of titanium dioxide. The efficiency of $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ hybrid catalyst was studied by varying pH (pH8, pH9 and pH11), stirring time (15 min, 60 min and 120 min) and weight of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (0.08, 0.16, 0.24, 0.32 and 0.40 grams). The morphology was observed by SEM technique and the result showed that it was not different a morphology of titanium dioxide uncoated but its particles increasingly agglomerated. The crystalline and amorphous was analyzed by XRD and FT-IR technique. The result shows no peak of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ on $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ spectra because the weight of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ for coating was less than TiO_2 . Samples were characterized by PL and DRS technique. It was found that band gap energy decreases when pH and stirring time were increased and decreasing of band gap energy affected to the efficiency of $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ increased. Photocatalytic efficiency of $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ in indigo carmine under each conditions was studied by UV-VIS spectroscopy and it showed that elimination efficiency of $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ in indigo carmine increased from uncoated Titanium dioxide with $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

Keywords : Titanium dioxide, Pentaamminechlorocobalt(III)chloride, Photocatalytic and Indigo carmine.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
งานวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.ชวาล ศรีวงษ์ เป็นอย่างยิ่งที่คอยดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา แนะนำ
สนับสนุน ตรวจสอบ และติดตามผลโครงการพิเศษนี้โดยตลอดจนทำให้โครงการพิเศษสำเร็จไปได้
ด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบทั้ง ดร.เอกรัฐ เดชศรี และ ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ ที่ได้ให้
ความรู้เพิ่มเติม คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์
มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ ที่คอยให้คำแนะนำและความรู้
เกี่ยวกับการใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รวมทั้งขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และ
เจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่านที่ให้ความรู้ คอยอำนวยความสะดวกในการใช้สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์ใน
การทดลองต่างๆ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่อ
สถานที่ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ และเงินทุนสนับสนุนสำหรับการทำงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ
ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ได้ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่า
เรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจทำให้การทำโครงการพิเศษครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นางสาวเปมิกา คำน้ำมิตร
นางสาวมนสิชา เชื้อประไพศิลป์
นายธนพัชญ์ ณะภูโต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.1 ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.2 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	5
2.1.3 คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.2 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	9
2.2.1 หลักการของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)	9
2.2.2 พลังงานแสง	9
2.2.3 ชนิดของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	11
2.2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	11
2.2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา	11
2.2.6 กลไกของปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	13
2.2.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	15
2.3 สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{Cl})]\text{Cl}_2$	16
2.3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของสารประกอบเชิงซ้อน	16
2.3.2 สมการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{Cl})]\text{Cl}_2$	18
2.4 กลไกการยึดเกาะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{Cl})]\text{Cl}_2$	18
2.5 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyestuff)	19
2.5.1 อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC)	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้	26
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	27
3.3.1 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อน ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$)	27
3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ($\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$)	29
3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ($\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$) ที่สังเคราะห์ได้ในตู้มืด	31
3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ($\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$) ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้การฉายแสง	32
3.4 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์	36
4.1.1 Scanning Electron Microscope (SEM)	36
4.1.2 X-ray diffraction (XRD)	39
4.1.3 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)	41
4.1.4 UV-Vis Diffused Reflectance Spectrophotometer (DRS)	45
4.1.5 Photoluminescence Spectrophotometer (PL)	47
4.1.6 UV-Vis Spectrophotometer	49
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก	67
ภาคผนวก ข	68
ภาคผนวก ค	88
ภาคผนวก ง	90

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 แสดงการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการบำบัด	14
2.2 แสดงมวลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก	14
3.1 แสดงการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	31
3.2 แสดงการเก็บตัวอย่างการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	33
4.1 แสดงค่าแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้	47
ข-1 แสดงค่าแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ได้จาก DRS สเปกตรา	83
ข-2 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอินดิโกคาร์มิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}11$ ในตุ่มมืด	87
ข-3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}8$ ภายใต้การฉายแสงยูวี	88

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 โครงสร้างรูโหล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.2 โครงสร้างอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์	5
2.3 โครงสร้างบรูคไคท์ของไทเทเนียมไดออกไซด์	5
2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง	7
2.5 พลังงานการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	9
2.6 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	10
2.7 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี	10
2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	12
2.9 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	14
2.10 โครงสร้างของลิแกนด์ชนิดต่างๆ	17
2.11 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	18
2.12 ช่วงการดูดกลืนแสงของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	18
2.13 การยึดเกาะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ บนพื้นผิวของ TiO_2	19
2.14 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มิน	20
2.15 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มิน	21
2.16 กลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มิน	22
2.17 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยขมิ้นชันภายใต้แสงยูวี	23
2.18 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยขมิ้นชันภายใต้แสงวิสิเบิล	23
2.19 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานที่เจือด้วยขมิ้นชันภายใต้แสงวิสิเบิล	24
4.1 ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาผสมบนแผ่นกระดาษกรอง (a) ไม่เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$	36
4.2 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของสารประกอบเชิงซ้อน เพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ (a) และ (b)	37
4.3 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านล่าง) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (a) (b) และ (c)	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.4 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของ pH8 (a) และ (b) pH9 (c) และ (d) pH11 (e) และ (f)	38
4.5 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือ 0.08 กรัม (a) และ (b) 0.40 กรัม (c) และ (d)	39
4.6 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช	40
4.7 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน	41
4.8 แสดง FT-IR สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช	42
4.9 แสดง FT-IR สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน	43
4.10 แสดง FT-IR สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือ	44
4.11 แสดง DRS สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช	45
4.12 แสดง DRS สเปกตร้าตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน	46
4.13 แสดง PL สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช	48
4.14 แสดง PL สเปกตร้าของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน	49
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ในตุ้มมืด	50
4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของพีเอช ในตุ้มมืด ที่เวลา 240 นาที	51
4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน ในตุ้มมืด	51
4.18 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน ในตุ้มมืด ที่เวลา 240 นาที	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ที่เจือ ในตุ้มมืด	52
4.20 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ที่เจือ ในตุ้มมืด ที่เวลา 240 นาที	53
4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ภายใต้แสงยูวี	54
4.22 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ภายใต้แสงยูวี	54
4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน ภายใต้แสงยูวี	55
4.24 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาภายใต้การปั่นกวน ภายใต้แสงยูวี	55
4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	56
4.26 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	56
4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	57
4.28 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาภายใต้การปั่นกวน ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	57

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่เจือ ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	58
4.30 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่เจือ ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล	58
4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่เจือ ภายใต้แสงอาทิตย์	59
4.32 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่เจือ ภายใต้แสงอาทิตย์	60
4.33 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโก้คาร์มีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือกับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 120 นาที	60
ข-1 รูปแบบ XRD ของสารประกอบเชิงซ้อน $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$	68
ข-2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH8	68
ข-3 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH9	69
ข-4 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH11	69
ข-5 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 15 นาที	70
ข-6 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 60 นาที	70
ข-7 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 120 นาที	71
ข-8 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์	71
ข-9 FT-IR สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อน $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$	72
ข-10 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH8	72
ข-11 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH9	73
ข-12 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH11	73
ข-13 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 15 นาที	74
ข-14 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 60 นาที	74
ข-15 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 120 นาที	75
ข-16 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 - ปริมาณ $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ 0.08 กรัม	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
ข-17 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ 0.16 กรัม	76
ข-18 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ 0.24 กรัม	76
ข-19 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ 0.32 กรัม	77
ข-20 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ 0.40 กรัม	77
ข-21 FT-IR สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์	78
ข-22 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์	79
ข-23 DRS สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อน $[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$	79
ข-24 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH8	80
ข-25 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH11	80
ข-26 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 15 นาที	81
ข-27 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 60 นาที	81
ข-28 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 120 นาที	82
ข-29 PL สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์	83
ข-30 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – pH8	83
ข-31 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – pH11	84
ข-32 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 15 นาที	84
ข-33 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 120 นาที	85
ข-34 ตัวอย่าง UV-Visible สเปกตราแสดงการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มין โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – pH11 ในตู้มืด	86
ข-35 ตัวอย่าง UV-Visible สเปกตราแสดงการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มיןโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - pH8 ภายใต้การฉายแสงยูวี	87
ค-1 ตู้มืด	88
ค-2 ตู้ฉายแสงยูวี	89
ค-3 ตู้ฉายแสงยูวี-วิสิเบิล	89
ง-1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)	90
ง-2 สารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$)	90
ง-3 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – pH 8 9 และ 11 บนแผ่นกระดาษกรอง	91
ง-4 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ – 15 นาที บนแผ่นกระดาษกรอง	91
ง-5 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $TiO_2/[Co(NH_3)_5Cl]Cl_2$ - 60 และ 120 นาที บนแผ่นกระดาษกรอง	92

คำย่อและสัญลักษณ์

E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) 6.626×10^{-34} จูลวินาที (Js)
V	คือ	ความถี่ของแสง, เฮิรตซ์ (Hz) หรือวินาที ⁻¹ (S ⁻¹)
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร (nm)
C	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง 3×10^8 เมตร/วินาที (m/s)
h^+	คือ	โฮลที่เวเลนซ์แบนด์ (Valence Band Hole)
e^-	คือ	อิเล็กตรอน (Electron)
OH^-	คือ	ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
OH°	คือ	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H^+	คือ	ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
O_2	คือ	โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ
O_2°	คือ	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
OH_2°	คือ	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
H_2O_2	คือ	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide)
H°	คือ	ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การขยายตัวอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมในปัจจุบันเป็นการเพิ่มอัตราการผลิตเพื่อตอบสนองต่อผู้บริโภคส่งผลให้เกิดปัญหาทางมลพิษหลายอย่างตามมาหนึ่งในนั้นคือ ปัญหามลพิษทางน้ำ เนื่องจากมีปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic Matters) และสารอนินทรีย์ (Inorganic Matters) เช่น สารเคมี โลหะหนัก เป็นต้น

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียจะบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี คือ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากแสงยูวี (Ultraviolet light) ในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เมื่ออนุภาคแสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ตกลงที่ผิวหน้าอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อิเล็กตรอน (e^-) ถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (Valence Band) ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ทำให้เกิดช่องว่างคือโฮล (h^+) อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) และสามารถออกซิไดซ์ (Oxidize) คาร์บอนในสารอินทรีย์เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนโฮลจะทำให้โมเลกุลของน้ำและไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) แตกตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่มีความสามารถในการรีดิวซ์สูงจึงเข้าชนกับโมเลกุลของสารอแกนิคต่างๆได้ดี ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว สุดท้ายจะเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมมาก คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสูตรโมเลกุลคือ TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N-Type ที่มีแถบพลังงานกว้าง (Energy band gap ~ 3.2 eV) จึงเป็นสารเรืองไวต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าเป็นสารที่สามารถถูกเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยแสงยูวี และได้มีการศึกษาเป็นเวลานานถึงความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในน้ำ ผลการวิจัยส่วนมากยืนยันว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากมีความเสถียร ไม่เป็นสารพิษ ไม่แพง เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และความสามารถละลายต่ำ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นสารประกอบที่สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) อีกด้วย

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนแสงในช่วงแสงยูวี ซึ่งเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ทำให้ใช้แสงอาทิตย์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกได้น้อย เพราะแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบของความยาวคลื่นในช่วงแสงวิสิเบิลเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงได้มีการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้ตอบสนองต่อช่วงแสงวิสิเบิล (Visible light) โดยการเจือด้วยธาตุโลหะชนิดต่างๆ เช่น กลุ่มของธาตุโลหะทรานซิชัน (Transition metal) ได้แก่ เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) [1] หรือ วาเนเดียม (V) เป็นต้น กลุ่มของโลหะมีสกุล (Nobel metal) ได้แก่ แพลทินัม (Pt) แพลเลเดียม (Pd) หรือ ทอง (Au) เป็นต้น และการเจือด้วยสารธรรมชาติ เช่น ขมิ้นชัน (Curcumin) [2] เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (Hybrid Catalyst) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางเคมีบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$) ที่เตรียมได้จากวิธีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนอย่างง่ายเป็นสารเจือ (Doping reagent) บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตอบสนองต่อช่วงแสงยูวี-วิสิเบิล เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-600 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่กว้างและดูดกลืนแสงในช่วงแสงยูวี-วิสิเบิล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$
- 1.2.2 เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ในตุ้มมืด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้การฉายแสงยูวี แสงยูวี-วิสิเบิล และแสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จากวิธีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนอย่างง่าย
- 1.3.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยวิธีการเจือ คือผสมสารละลาย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ปั่นกวน และนำไปกรองแบบสุญญากาศ ทิ้งให้แห้ง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โดยจะศึกษา
 - อิทธิพลของค่าพีเอชที่ทำให้สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์
 - อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนเมื่อผสมสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับไทเทเนียมไดออกไซด์
 - อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
- 1.3.3 พิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้
- 1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ในตุ้มมืด
- 1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้การฉายแสงยูวี แสงยูวี-วิสิเบิล และแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ขึ้น
- 1.4.3 ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ตอบสนองต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้
- 1.4.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เช่น XRD, FT-IR และ SEM เป็นต้น
- 1.4.5 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับปฏิกิริยาของ TiO_2 ที่เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้การทำงานในช่วงแสงยูวี-วิสิเบิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

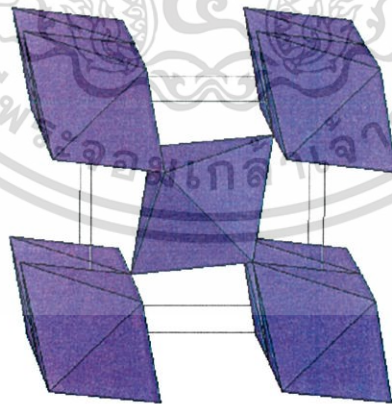
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)

เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพงมาก และคุณสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์อีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน มีเทน และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติพบน้อยมาก ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่อิลเมนไนต์ (Ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (Leucocene) [3]

2.1.1 ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แบ่งตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

1. รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [4]

2. อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลางถ้าให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้สำหรับสารให้สี

อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้องมักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้านด้วย คุณสมบัติให้สารสีขาวสามารถดูดกลืนและหักเหช่วงแสงวิสิเบิลได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยึดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์

มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา การผลิตสุชภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะ สำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสงด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อนรวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง

เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผิวง่ายดีสีขาวมีคุณสมบัติทึบแสงสามารถสะท้อนและหักเหแสงได้สูงและสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และแป้งทาหน้า เป็นต้น

6. ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

6.1 ใช้เป็นสารดูดซับ

โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศและมลพิษทางน้ำทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษ

6.2 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงและความร้อนจะแตกตัวให้สารและรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำและอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์โดยมีกลไก ดังนี้

– สำหรับการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^\bullet) ออกมาสู่อากาศ อะตอมดังกล่าวจะเข้าดั่งอะตอมไฮโดรเจนและคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่นทำให้จุลินทรีย์และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป

– สำหรับการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย

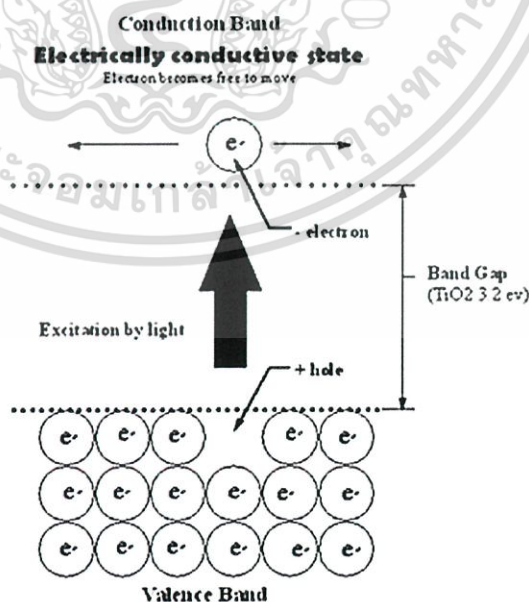
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(VOCs) ด้วยการผ่านแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 300 - 400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

- สำหรับการบำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคด่างที่กล่าวข้างต้นและเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำ กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.3 คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N-type ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อมๆกัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้ นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของเวเลนซ์แบนด์ (Valence band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (h^+) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว [3]



รูปที่ 2.4 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะคือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงานทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงานหรือแถบพลังงาน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาเทสและรูไทล์ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นและโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าแถบพลังงานแตกต่างกันคือ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึกอะนาเทส และ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

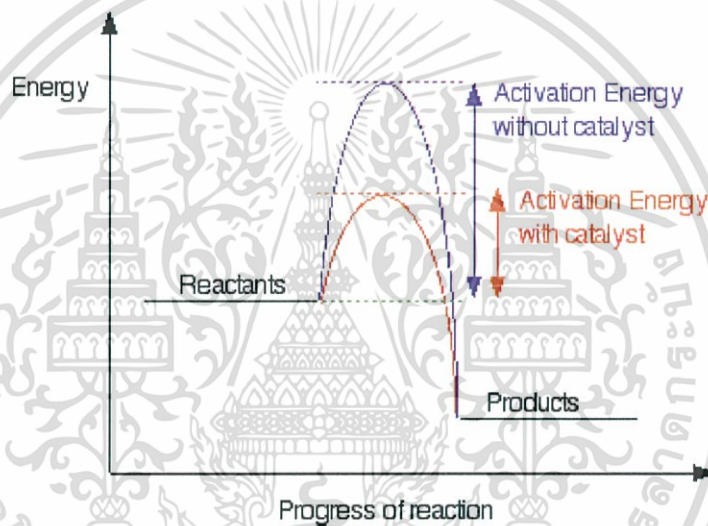


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติก เป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และถูกกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานการกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีค่ามากและพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ พลังงานกระตุ้นนี้จะลดลงในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิม ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้น อีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสงดังกล่าว คือ จะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีมากกว่าพลังงานของแถบพลังงาน



รูปที่ 2.5 พลังงานการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ [6]

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีองค์ประกอบ คือ

- ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ
- พลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- น้ำ
- ออกซิเจนหรือตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่นๆ

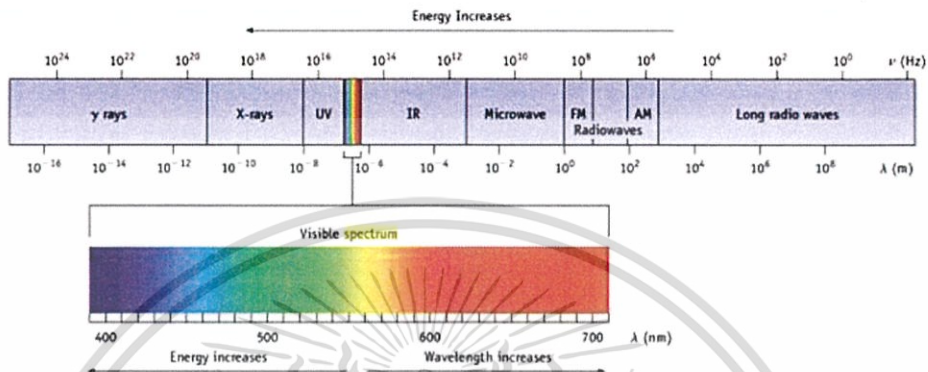
2.2.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกนั้นเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

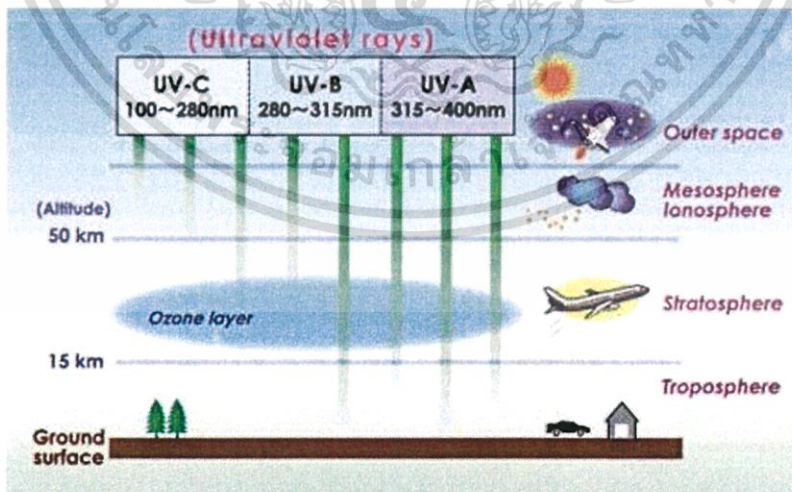
- เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูลวินาที
 v คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที⁻¹
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
 c คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , เมตร/วินาที



รูปที่ 2.6 แสดงสเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [7]

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงานโดยพลังงานของแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ความยาวคลื่นของแสงยูวีอยู่ในช่วง 100 – 400 นาโนเมตร และความยาวคลื่นแสงยูวี อยู่ในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร แสงยูวีนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. คลื่นยาว (Long Wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400 – 320 นาโนเมตร
2. คลื่นกลาง (Middle Wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320 – 280 นาโนเมตร
3. คลื่นสั้น (Short Wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280 – 200 นาโนเมตร



รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบหลักของรังสียูวี [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ชนิดของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

สามารถแยกได้ 2 ประเภทเมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

1. โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดโดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว เช่นการย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂

2. โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂ [9]

2.2.4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การดูดติดผิว (Adsorption)
2. การฉายแสง (Irradiation)

2.2.4.1 กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิว (Interface) กระบวนการดูดติดผิวสามารถเกิดขึ้นที่ระหว่างผิวหน้าของสองสภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว โดยการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซจากสถานะที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นตัวเกาะจากสารดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2.2.4.2 กระบวนการฉายแสง (Irradiation Process)

เมื่อมีการฉายด้วยแสงยูวีในระดับที่มากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบพลังงานตกกระทบลงบนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำแล้วจะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนหลุดออกมา และกระโดดข้ามฝั่งของแถบเวเลนซ์ไปยังฝั่งของแถบการนำไฟฟ้าพร้อมๆกันนั้น ทางฝั่งของแถบเวเลนซ์ก็จะเกิดช่องว่างขึ้นเรียกว่า โฮล โดยช่วงความยาวแสงที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ควรมีความยาวคลื่นไม่เกิน 400 นาโนเมตร ซึ่งความยาวแสงที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 380 นาโนเมตร

2.2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่

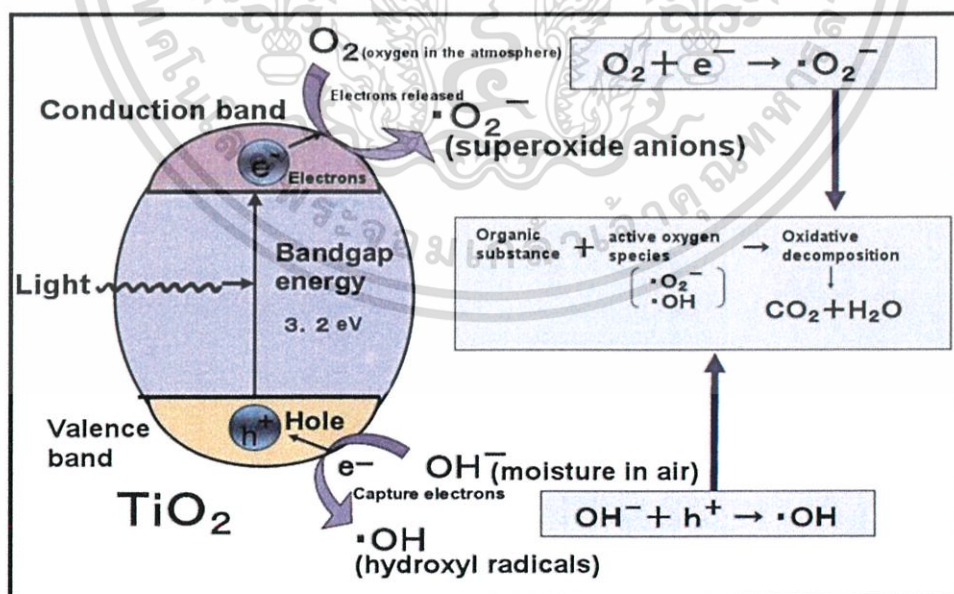
2.2.5.1 โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น

2.2.5.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยแถบเวเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีแถบเวเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าติดกันแต่ในสารกึ่งตัวนำแถบเวเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าจะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า แถบพลังงาน (Energy band gap) เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแสง (hv) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าในขณะเดียวกันที่บริเวณแถบเวเลนซ์จะเกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบเวเลนซ์ ส่วนแถบการนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบเวเลนซ์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วแถบการนำไฟฟ้าเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล (e^-/h^+ pairs) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแถบพลังงานเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้ e^-/h^+ รวมตัวกันใหม่ได้ง่าย (Recombination) สำหรับโลหะตัวนำในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของ e^-/h^+ ในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแถบพลังงานคั่นอยู่ ทำให้คู่อิเล็กตรอน e^-/h^+ แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแถบพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานของแถบพลังงาน ระดับพลังงานของแถบการนำไฟฟ้า และระดับพลังงานของแถบเวเลนซ์ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าพลังงานแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ ให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ผลคือ ทำให้เกิด e^-/h^+ ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ปฏิกิริยาที่เกิดบนผิวแถบการนำไฟฟ้า และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากแถบการนำไฟฟ้า ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ แถบเวเลนซ์ซึ่งมี h^+ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ (O_2) ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับ e^- เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆได้ แต่ในทางตรงกันข้าม โฮลที่แถบเวเลนซ์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกแบบต่างสถานะสามารถพิจารณาได้เป็น 2 แบบดังนี้

- แบบแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์ โดยสารกึ่งตัวนำจะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย แบบนี้จะประสบปัญหาในการแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วซึ่งปัจจุบันไม่มีวิธีที่จะแยกสารกึ่งตัวนำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

- แบบเคลือบผิว (Immobilize) เป็นกระบวนการนำสารกึ่งตัวนำไปเคลือบบนตัวกลางหรือที่ผิวของถังปฏิกิริยาแบบเคลือบผิวนี้จะสะดวกกว่าแบบแขวนลอย เนื่องจากไม่ต้องแยกสารกึ่งตัวนำออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอะนาเทสแบบเคลือบผิวให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบแขวนลอยภายใต้สภาวะเดียวกัน

2.2.6 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดได้จากภายในสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยแถบเวเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้า โดยมีแถบพลังงานคั่นอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานแสงที่มากกว่าแถบพลังงาน อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.1 ทำให้เกิดเป็นโฮล ชั้นที่แถบเวเลนซ์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-/h^+ pairs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดสองแบบ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลายเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชันหรืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโฮลในแถบเวเลนซ์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2.2 ถึง 2.3



โดย h^+ จะมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิเดทีฟ (Oxidative)

e^- จะมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดักทีฟ (Reductive)

Oxidative reaction :



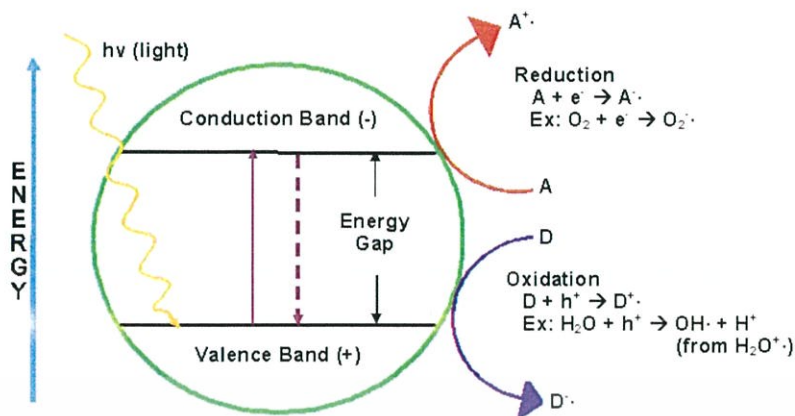
Reductive reaction :



โดยกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์นั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่มาจากกระบวนการออกซิเดทีฟกับการดูดซับน้ำหรือการดูดซับหมู่ไฮดรอกซิล จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในบริเวณที่มีออกซิเจน โดยออกซิเจนจะป้องกันการแตกตัวของช่องว่างของอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์แสดงดังสมการที่ 2.4



ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นสารที่ละลายน้ำได้และไม่เกิดอันตราย



รูปที่ 2.9 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก [11]

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกในการบำบัด [12]

มลสารในสถานะตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - การลดกลิ่น - การฆ่าเชื้อโรค - การย่อยสลายสารปราบศัตรูพืช - กำจัดมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ - กำจัดสารตั้งผิว - ย่อยสลายสี - สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิเดชันออกไซด์ของไนโตรเจน - ลดกลิ่นภายในอาคาร - ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> - บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร - ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

ตารางที่ 2.2 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก [12]

ประเภทมลสาร	มลสารตัวอย่าง
มลสารอินทรีย์	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Phenols, Trichloroethylene, และสารระเหยจำพวก Halogenated hydrocarbon อื่นๆ Polychlorinatedbiphenyls (PBCs) Dichlorodiphenyl trichloroethane (DDT), Dioxins, สารฆ่าแมลงและสารปราบวัชพืช ลิกนินจากอุตสาหกรรมกระดาษอุตสาหกรรมสี ย้อม ออกาโนฟอสเฟตและสารลดแรงตึงผิว Alkanes, Aliphatic alcohols, Aliphatic carboxylic acids,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Alkenes, Phenols, Aromatic carboxylic acids, Simple aromatics, Halogenated alkenes และ Alkenes
มลสารอนินทรีย์	Cyanide, Hydrogen sulfide, Mercury, Cadmium, Chromium (Cr^{6+}), Sulfide, Manganese, Lead, Zinc, Copper, Arsenic, Gold (Au^{3+}), Pt^{4+} , Rh^{3+}
เชื้อโรค	Escherichia coli, Lactobacillus acidophilus, Saccharomyces cerevisiae, Fecal coliforms

2.2.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

2.2.7.1 ความเข้มของแสง (Light intensity) การเพิ่มความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงด้วย

2.2.7.2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst dosage) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นสารดูดซับซึ่งทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มขึ้น

2.2.7.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (Initial substrate concentration) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นพบว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมักจะลดลง ทั้งนี้อาจสามารถสรุปได้ในหลายๆ เหตุผล นั่นคือ ขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะเกิดสารอินเตอร์มีเดียเพิ่มขึ้น ซึ่งสารพวกนี้จะเข้าไปยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลงรวมทั้งเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความหนาแน่นภายในสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดลดลงอีกด้วย

2.2.7.4 ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ จะจับตัวกับอิเล็กตรอนทำให้การกลับมารวมกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮลเป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ตัวหนึ่ง ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) นี้จะทำปฏิกิริยาต่อกับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งก็เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่รุนแรงตัวหนึ่งตามปกติแล้วออกซิเจนมีความจำเป็นกับการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แบบ และไม่ปรากฏว่าออกซิเจนจะเข้าไปแย่งพื้นที่ของสารอินทรีย์ในการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเกิดโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนจนได้บทสรุปว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

2.2.7.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงการทดลองของค่าพีเอชในปฏิกิริยาอย่างมาก และสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 สาเหตุ คือ

1. การลดลงของไฮดรอกไซด์ไอออน เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโฮลเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล
2. ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลิตกัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสออกซิเดชันแต่เป็นการยากที่จะสรุปรวมว่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสอย่างไรเห็นได้ชัด แต่บางสารประกอบก็มีผลน้อยมาก

2.2.7.6 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) นอกจากสารประกอบอินทรีย์แล้วไอออนบางตัวก็อาจจะถูกติดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ในทำนองเดียวกันไอออนเหล่านี้จึงถือเป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาดังนั้นไอออนเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและจลศาสตร์โดยรวมของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.3 สารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์

$[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ [13]

สารประกอบเชิงซ้อน (Coordination compounds หรือ coordination complexes) คือสารประกอบที่เกิดจาก “ไอออนเชิงซ้อน (Complexions)” อยู่รวมกับ “ไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม (Counter ions)” และมีประจุรวมเท่ากับศูนย์ โดยสารประกอบไอออนเชิงซ้อนจะประกอบด้วยอะตอมหรือโลหะไอออน (Cation) ซึ่งเรียกว่า “อะตอมกลาง (Central atom)” เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Coordinate covalent bond) กับโมเลกุลหรือไอออนจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ลิแกนด์ (Ligand)” การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะเป็นไปตามนิยามปฏิกิริยากรด-เบสของลิวอิส (Lewis acids bases reaction) โดยลิแกนด์จะประพฤติตัวเป็นเบสทำหน้าที่ให้คู่อิเล็กตรอน (Electron pair donor) และอะตอมกลางจะประพฤติตัวเป็นกรดโดยทำหน้าที่รับคู่อิเล็กตรอน (Electron pair acceptor) แล้วเกิดเป็นเกลือของสารประกอบที่เป็นไปตามนิยามของลิวอิสเรียกว่า “แอดดักต์” (Adducts)

2.3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของสารประกอบเชิงซ้อน

1. ไอออนเชิงซ้อน (Complex ions) จะเป็นได้ทั้งแคตไอออนเชิงซ้อน (Cation complex) ที่ประจุรวมทั้งหมดเป็นบวกเช่น $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ หรือแอนไอออนเชิงซ้อน (Anion complex) มีประจุรวมทั้งหมดเป็นลบ เช่น $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ ทั้งแคตไอออนและแอนไอออนเชิงซ้อนประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ อะตอมกลางและลิแกนด์

1.1 อะตอมกลาง (Central atom) คือ อะตอมของธาตุที่อยู่ใจกลางของสารเชิงซ้อน โดยส่วนมากเป็นโลหะทรานซิชัน เนื่องจากสามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Coordinate covalent) กับลิแกนด์โดยใช้ d-orbitals ที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ได้

1.2 ลิแกนด์ (Ligand) คือ ไอออนหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบไอออนหรืออะตอมกลาง โดยเกิดพันธะกับโลหะนั้น ลิแกนด์โดยมากเป็นอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอะตอมของธาตุที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ เช่น F^- Br^- OH^- SCN^- NH_3 และ H_2O อะตอมที่สามารถให้คู่อิเล็กตรอนได้เรียกว่า อะตอมผู้ให้ (Donor atom) ตัวอย่างเช่น แอมโมเนีย (NH_3) เป็นโมเลกุลที่มี N เกิดพันธะกับ H 3 พันธะและมี 1 คู่อิเล็กตรอนอยู่ที่ N ดังนั้นแอมโมเนียจึงสามารถให้คู่อิเล็กตรอนแก่อะตอมกลางโดยมี N เป็นอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอน เนื่องจากแอมโมเนียมี N ที่ให้คู่อิเล็กตรอนเพียง 1 คู่แล้วเกิดเพียง 1 พันธะกับโลหะไอออน เรียกลิแกนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

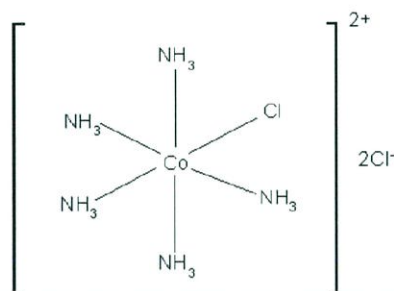
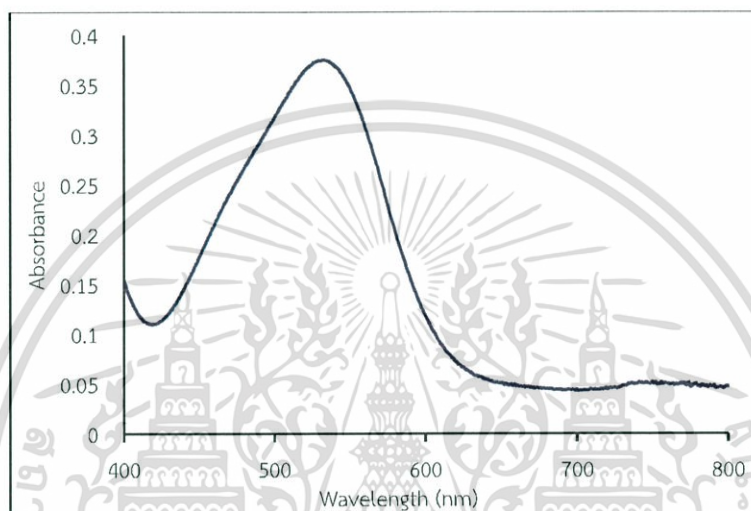
ชนิดนี้ว่า Monodentate ligand หากลิแกนด์สามารถให้คู่อิเล็กตรอน 2 คู่ และเกิดพันธะกับโลหะไอออน 2 พันธะ ลิแกนด์นี้จึงจัดเป็น Bidentate ligand เช่น เอทิลีนไดเอมีน ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$) ที่มี N อยู่ 2 อะตอมและทั้ง 2 อะตอมนั้นสามารถทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ได้ สำหรับ Polydentate ligand คือลิแกนด์ที่สามารถให้คู่อิเล็กตรอนได้หลายคู่และเกิดพันธะกับอะตอมกลาง ได้หลายพันธะและจำนวนเต็มทีละจำนวนคู่อิเล็กตรอนที่อะตอมกลาง ได้รับจากลิแกนด์หรือระบุจำนวนรวมของอะตอมผู้ให้เรียกว่า “เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)” ตัวอย่างโครงสร้างของลิแกนด์ชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.10

ชื่อลิแกนด์	สูตรโครงสร้าง	อักษรย่อ
acetylacetonato		acac
pyridine		py
tetrahydrofuran		THF หรือ thf
glycinato		gly
2,2'-bipyridine		bpy หรือ bipy

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของลิแกนด์ชนิดต่างๆ [13]

2. เคาน์เตอร์ไอออน (Counter ion) คือ ไอออนใดๆ ที่รวมตัวกับแคตไอออนเชิงซ้อน (ประจุ+) หรือแอนไอออนเชิงซ้อน (ประจุ-) แล้วทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจรรวมเป็นศูนย์

สารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) ดังรูปที่ 2.11 ที่โคบอลต์อยู่ในรูป Oxidation 3+ ซึ่งมีความเสถียร และยังดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-600 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่กว้างและดูดกลืนแสงในช่วงแสงยูวี-วิสิเบิล ดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ รูปที่ 2.12 ช่วงการดูดกลืนแสงของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

2.3.2 สมการการเกิดสารประกอบไอออนเชิงซ้อนของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

ปฏิกิริยาแรกเป็นการ Oxidized Co(II) เป็น Co(III) ดังสมการ 2.5 ปฏิกิริยาที่สองเป็นการแทนที่น้ำด้วย Cl^- โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและควบคุมอุณหภูมิ ดังสมการ 2.6



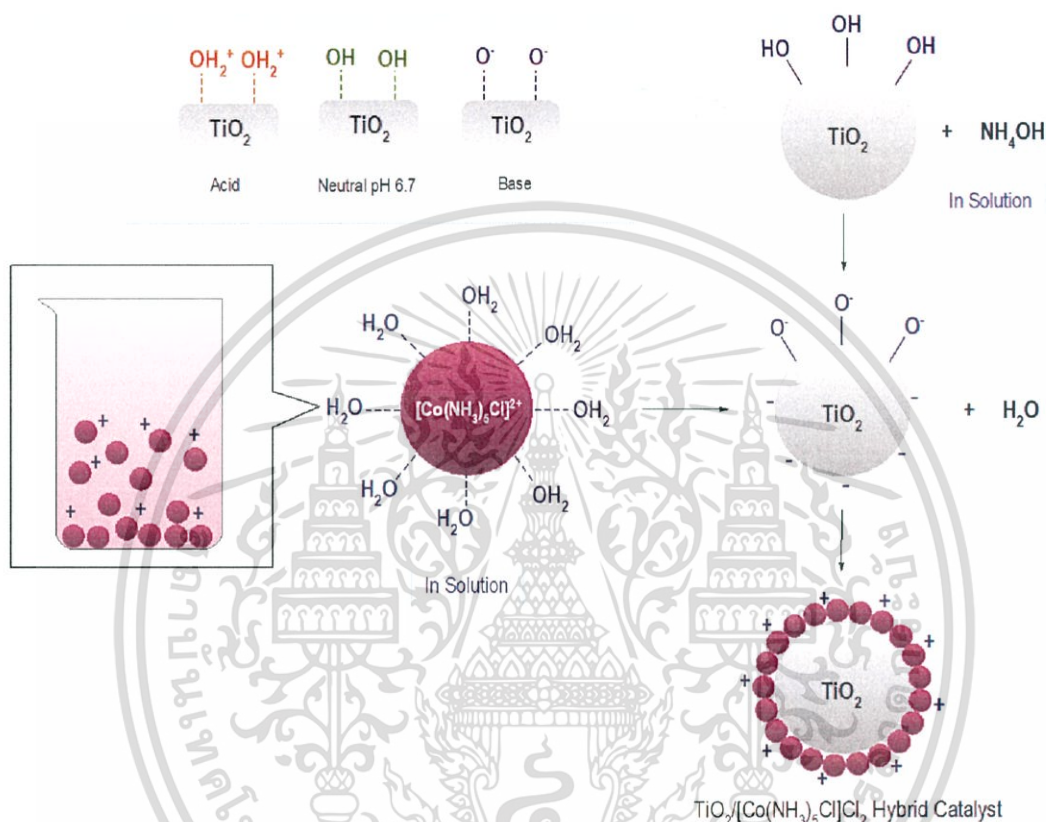
2.4 กลไกการยึดเกาะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_3$ บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออยู่ในรูปของสารละลายจะเป็นสารแขวนลอย จึงสามารถปรับพื้นผิวให้เป็นที่ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) ดังสมการ [2]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.7 จะเห็นว่าเมื่อปรับพีเอชของสารละลายให้เป็นกรดไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีประจุบนพื้นผิวเป็นบวก และจากสมการที่ 2.8 เมื่อปรับพีเอชของสารละลายให้เป็นเบสประจุบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะเป็นลบเช่นกัน อิทธิพลของค่าพีเอชนี้มีผลต่อการยึดเกาะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะด้วยแรงทางกายภาพ คือ เกิดการยึดเกาะกันด้วยแรงทางประจุ (Electrostatic force)



รูปที่ 2.13 แสดงการยึดเกาะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 2.13 ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่ออยู่ในสารละลายบนพื้นผิวจะมีพีเอชเป็นกลาง ซึ่งทำให้สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่มีประจุเป็นบวกไม่สามารถยึดเกาะได้ แต่เมื่อพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกปรับด้วยเบส จะทำให้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นลบเพิ่มขึ้น และเมื่อเจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ทำให้สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

2.5 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyestuff)

สีย้อมสังเคราะห์ คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมสังเคราะห์บางชนิดละลายน้ำได้บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมสังเคราะห์ไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมสังเคราะห์ซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยโดยจะทำลายโครงสร้าง

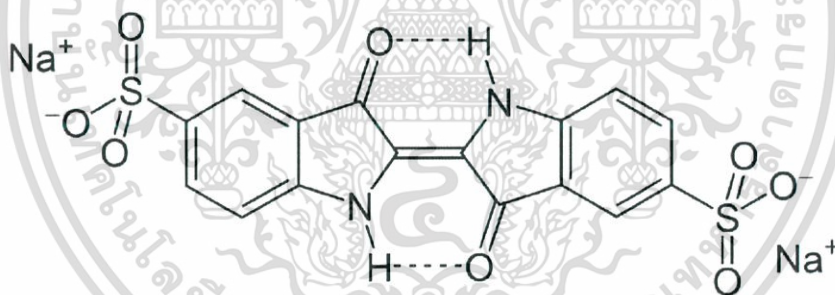
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิกหรือพันธะโคเวเลนต์กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีที่เห็นจากสีย้อมสังเคราะห์นั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมสังเคราะห์นั้น มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร สีย้อมสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมสังเคราะห์ต่างโครงสร้างกันแสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาดูออกมาต่างกัน [14]

สีย้อมสังเคราะห์ที่ใช้ย้อมเส้นใยมีหลายชนิด การย้อมที่จะให้ผลนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีย้อมสังเคราะห์กับเส้นใยจะต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวกันของสีย้อมกับน้ำ สีย้อมสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพวกอะลิฟาติก (Aliphatic) และอะโรมาติก (Aromatic)

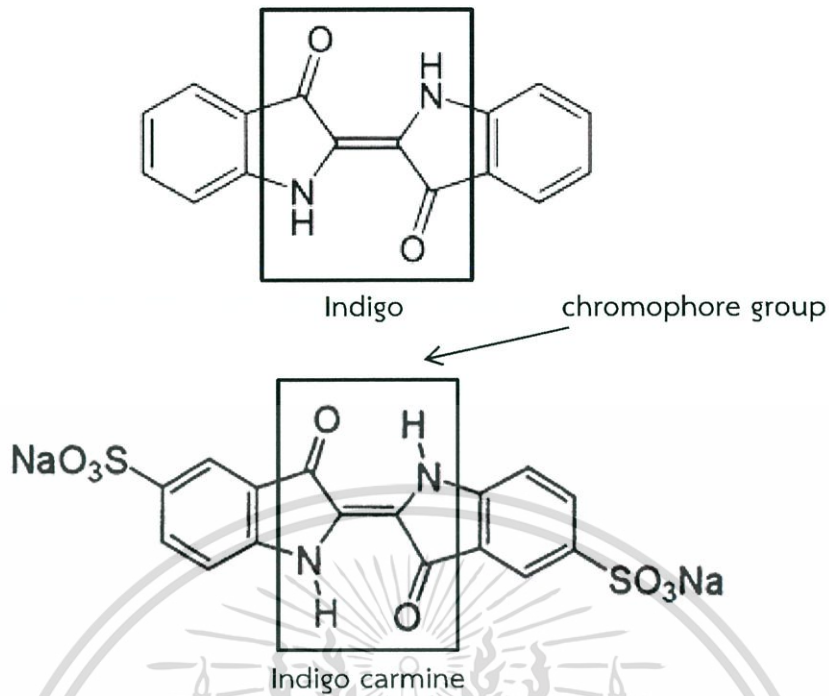
2.5.1 อินดิโกคาร์มีน (Indigo carmine, IC)

อินดิโกคาร์มีน หรือ 5,5-Indigodisulfonic Acid Sodium Salt เป็นอินดิเคเตอร์ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถสกัดได้จากพืชในธรรมชาติ ที่มีสูตรเคมีเป็น $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ ซึ่งโดยทั่วไปจะนำไปใช้เป็น พีเอชอินดิเคเตอร์ จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อพีเอชเท่ากับ 11.4 และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อพีเอชเท่ากับ 13.0 และยังใช้เป็นอินดิเคเตอร์สำหรับปฏิกิริยารีดอกซ์ได้อีกด้วย โดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นสีย้อมซึ่งมีสีน้ำเงินเป็นหลักนำไปย้อมสีของกางเกงยีนส์ เป็นต้น



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน [15]

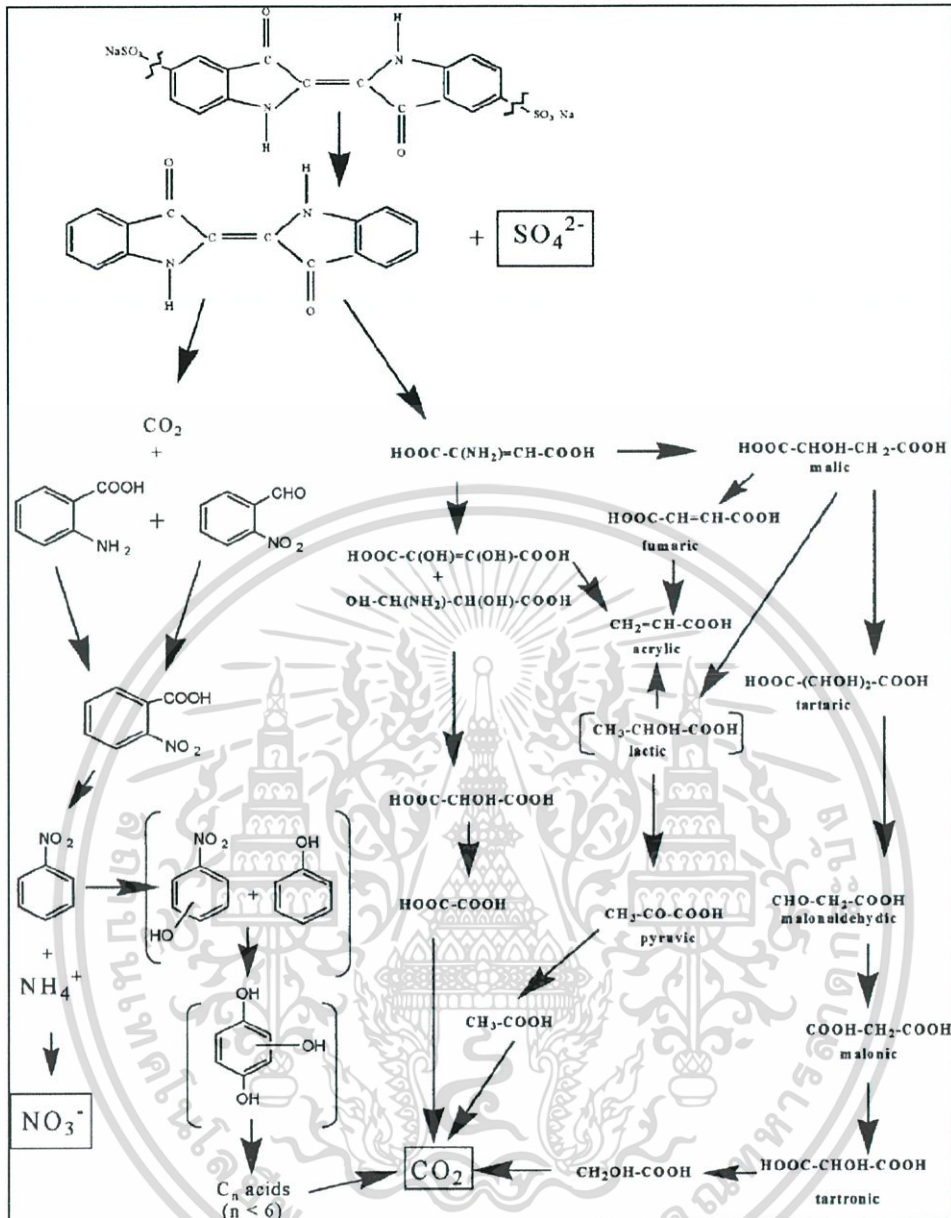
อินดิโกคาร์มีนนั้นมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ $390-392^{\circ}C$ และมีความสามารถในการละลายน้อยมาก เนื่องจากโครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน มีพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลอย่างแข็งแรง นอกจากนี้อินดิโกคาร์มีนในสถานะของแข็งจะเกิดการรวมตัวเป็นพอลิเมอร์โดยโมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของอินดิโกคาร์มีนอีก 4 โมเลกุล ส่วนในสารละลายที่ไม่มีขั้ว อินดิโกคาร์มีนจะเกิดเป็นมอนอเมอร์เชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลและสีของสารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน โดยสีที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากโครงสร้างที่เป็น H-chromophore ประกอบด้วย $C=C$ ที่ถูกแทนที่ด้วย NH ที่เป็นอะตอมผู้รับ (Donor group) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นอะตอมผู้ให้ (Acceptor group) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอินดิโกคาร์มีน [15]

เนื่องจากได้มีการใช้อินดิโกคาร์มีนเป็นสีย้อมสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมจำนวนมาก ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการที่ปล่อยสีย้อมสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำนั้นจะทำให้เกิดผลกระทบมากมายต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะทางน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทำให้สัตว์น้ำ และพืชได้รับผลเสียเป็นจำนวนมาก นอกจากอินดิโกคาร์มีนจะถูกนำไปทำเป็นสีย้อมสังเคราะห์แล้วยังนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในแคปซูลยาและลูกกวาดที่ใส่สี โดยสามารถใช้สีของอินดิโกคาร์มีนในการวินิจฉัยบริเวณที่เซลล์เกิดความผิดปกติได้อีกด้วย ถึงแม้ว่าอินดิโกคาร์มีนจะถูกเผาผลาญในร่างกายได้ยากแต่ก็สามารถถูกกรองได้ด้วยไตของมนุษย์ อินดิโกคาร์มีนถือว่าเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่เป็นพิษชนิดหนึ่ง อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวและดวงตาโดยเฉพาะเยื่อลูกตาหรือกระจกตาและร้ายแรงถึงขั้นทำให้เกิดเนื้องอกและเป็นสารก่อมะเร็งได้ จึงได้มีการทดสอบการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในสัตว์ เช่น หนู หมู และค้นคว้าวิธีการกำจัดในทางต่างๆเพื่อที่จะได้ไม่ให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการกำจัดอินดิโกคาร์มีนในน้ำด้วยวิธีต่างๆมากมาย โดยเฉพาะการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเข้าไปในวัสดุต่างๆทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วไปกำจัดอินดิโกคาร์มีนในของแข็งหรือของเหลว ซึ่งการวิจัยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับแสงยูวีสามารถกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ โดยเราจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25 Titanium Dioxide) ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วทำให้อินดิโกคาร์มีนเกิดการสลายตัวได้



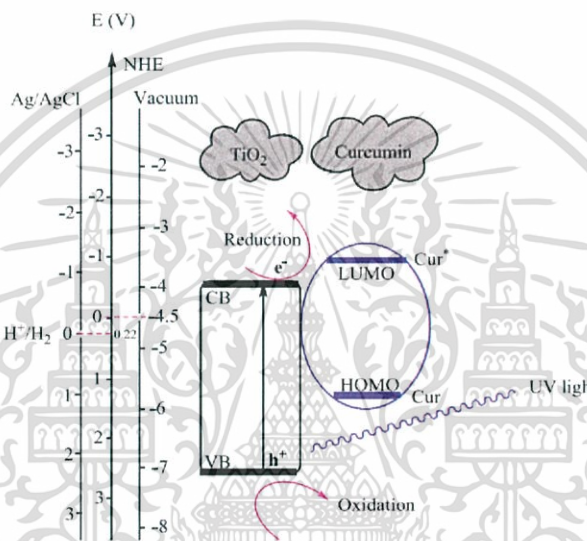
รูปที่ 2.16 แสดงกลไกการสลายตัวของอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

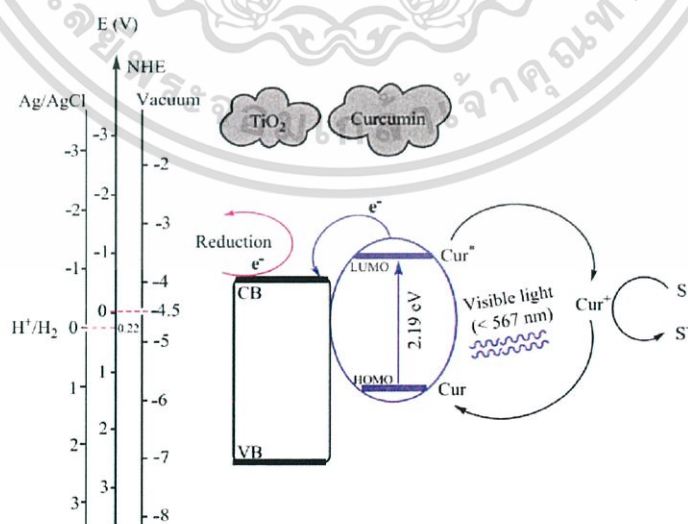
พ.ศ. 2557 Lei et al. ศึกษาวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลเวอร์ เตรียมได้จากวิธีการโซล-เจล โดยวัดประสิทธิภาพโฟโตคะตะไลติกจากการลดลงของโครเมียมภายใต้การดูดกลืนแสงวิสิเบิล ผลการทดลองที่ได้คือการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเจือด้วยซิลเวอร์แล้วนำไปเผาแคลไซน์ซึ่งมีความสำคัญมากต่อโครงสร้างจุลภาค และประสิทธิภาพในการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยผลการทดลองที่ดีที่สุดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลเวอร์แล้วนำไปเผาแคลไซน์ที่ 400 องศาเซลเซียส ทำให้รูพรุนที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ลดการเกิดการรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอน (Recombination) และมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยซิลเวอร์และไม่ได้เผาแคลไซน์อื่น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2557 Chaval et al. ศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด P25 ที่เคลือบผิวด้วยไขมันโดยใช้วิธีการจุ่มเคลือบในสารละลายไขมัน โดยแบ่งการทดลองเป็นการจุ่มสารละลายไขมันที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.5 3 5 และ 7% โดยไม่มีผลกระทบต่อเฟสรูโวลต์และอะนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามไขมันที่เคลือบอยู่บนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเป็นโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้แสงวิสิเบิลของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยทำการศึกษาจากการสลายไปของสีย้อมภายใต้แสงวิสิเบิล และผลการทดลองที่ดีที่สุดคือการจุ่มในสารละลายไขมันที่มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก การเจือด้วยไขมันทำให้ช่วงความยาวคลื่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ยาวขึ้นและมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสีย้อมเพิ่มขึ้นกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด P25 ที่ไม่ได้เคลือบด้วยสารละลายไขมัน [2]



รูปที่ 2.17 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไขมันชั้นภายใต้แสงยูวี [2]

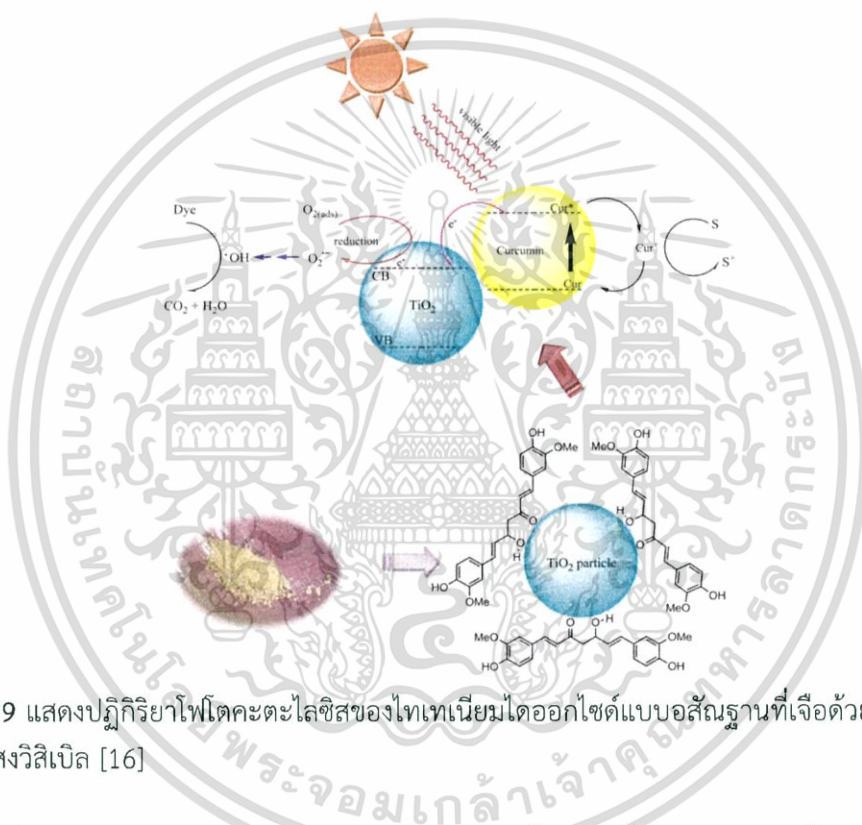


รูปที่ 2.18 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไขมันชั้นภายใต้แสงวิสิเบิล [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 และ 2.18 แสดงพฤติกรรมของการตอบสนองของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไขมันเมื่อได้รับแสงยูวี ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของไทเทเนียมถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้า แต่เมื่อได้รับแสงวิสิเบิล ทำให้อิเล็กตรอนในสถานะพื้นของไขมันชั้นถูกกระตุ้นขึ้นไปยังสถานะกระตุ้นและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์และเกิดกลไกต่อไป

พ.ศ. 2558 Supat et al. ศึกษาโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐาน ที่เคลือบด้วยไขมันชั้น โดยควบคุมความแตกต่างของปริมาณไขมันชั้นที่เคลือบลงไปคือ 1 2.5 5 7.5 และ 10% ในการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูและออเรนจ์เตตระโซเดียมซอลท์ ภายใต้สภาวะการตอบสนองต่อแสงวิสิเบิล พบว่าที่ปริมาณการเจือมีค่าเท่ากับ 7.5% ให้ค่าการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูและออเรนจ์เตตระโซเดียมซอลท์ได้มากที่สุด [16]



รูปที่ 2.19 แสดงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานที่เจือด้วยไขมันชั้นภายใต้แสงวิสิเบิล [16]

เมื่อได้รับแสงวิสิเบิล ทำให้อิเล็กตรอนในสถานะพื้นของไขมันชั้นถูกกระตุ้นขึ้นไปยังสถานะกระตุ้นและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอสัณฐานและเกิดกลไกต่อไปดังรูปที่ 2.19

พ.ศ. 2558 Nada et al. ศึกษาการเตรียมเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ และศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างและสมบัติทางแสงของ PVAc เป็นการเติม $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงใน PVAc โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น 3 ค่า คือ 3 wt% 6 wt% และ 9 wt% เพื่อศึกษาผลกระทบของการเติม $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงใน PVAc และดูสมบัติทางแสงเมื่อเติมแล้วพบว่า ประสิทธิภาพของสมบัติทางแสงนั้นเพิ่มขึ้นและค่าแถบพลังงานลดลงเมื่อเพิ่ม wt% ความเข้มข้นของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และจากการศึกษาความเข้มข้นพบว่าที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 9 wt% ของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ นั้นจะ

ทำให้ได้ค่าสมบัติทางแสงที่ดีที่สุด สรุปว่าการตรวจวัดคุณสมบัติของแสงของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เป็นสารเติมแต่งที่สามารถเพิ่มค่าสมบัติทางแสงให้แก่ PVAc ได้ [17]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (Hydrochloric acid 37%, HCl) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, 6 M HCl)
- 3.1.3 โคบอลต์(II)คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Cobalt(II)Chloride Hexahydrate, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.4 แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.5 สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 30% (Ammonia solution 30%, NH_3) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.6 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25) เกรดทางการค้า
- 3.1.8 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate, AgNO_3) บริษัท BDH ANALAR
- 3.1.9 สีย้อมอินดิโกคาร์มีน (Indigo Carmine, $\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$) บริษัท SIGMA-ALDRICH
- 3.1.10 เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.11 อะซิโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) บริษัท CARLO ERBA
- 3.1.12 น้ำปราศจากไอออน (DI Water)

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้

- 3.2.1 บีกเกอร์ขนาด 150 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.2 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.2.3 กระจกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.2.4 ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.5 เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter)
- 3.2.6 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hot Plate)
- 3.2.7 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)
- 3.2.8 ไมโครปิเปต (Micro Pipette)
- 3.2.9 แท่งแก้วคนสาร
- 3.2.10 หลอดหยด (Dropper)
- 3.2.11 กระจกนาฬิกา
- 3.2.12 ซ้อนตักสาร
- 3.2.13 เครื่องและชุดกรองลดความดัน
- 3.2.14 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.2.15 กระจกชอลูมิเนียมฟอยล์
- 3.2.16 ขาดั่งและแคลมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.17 ตู้อบสาร
- 3.2.18 ตู้ดูดควัน (Hood)
- 3.2.19 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 3.2.20 ตู้ฉายแสงยูวีและแสงยูวี-วีลิต
- 3.2.21 หลอดเซนติฟิวก์ขนาด 15 มิลลิลิตร (Centrifuge Tube)
- 3.2.22 เครื่องเซนติฟิวก์ (Centrifuges)
- 3.2.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- 3.2.24 เครื่องวัดวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
- 3.2.25 เครื่องวัดวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
- 3.2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)
- 3.2.27 เครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดของแข็ง (UV-Vis Diffused Reflectance Spectrometer, DRS)
- 3.2.28 เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence Spectrophotometer, PL)
- 3.2.29 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

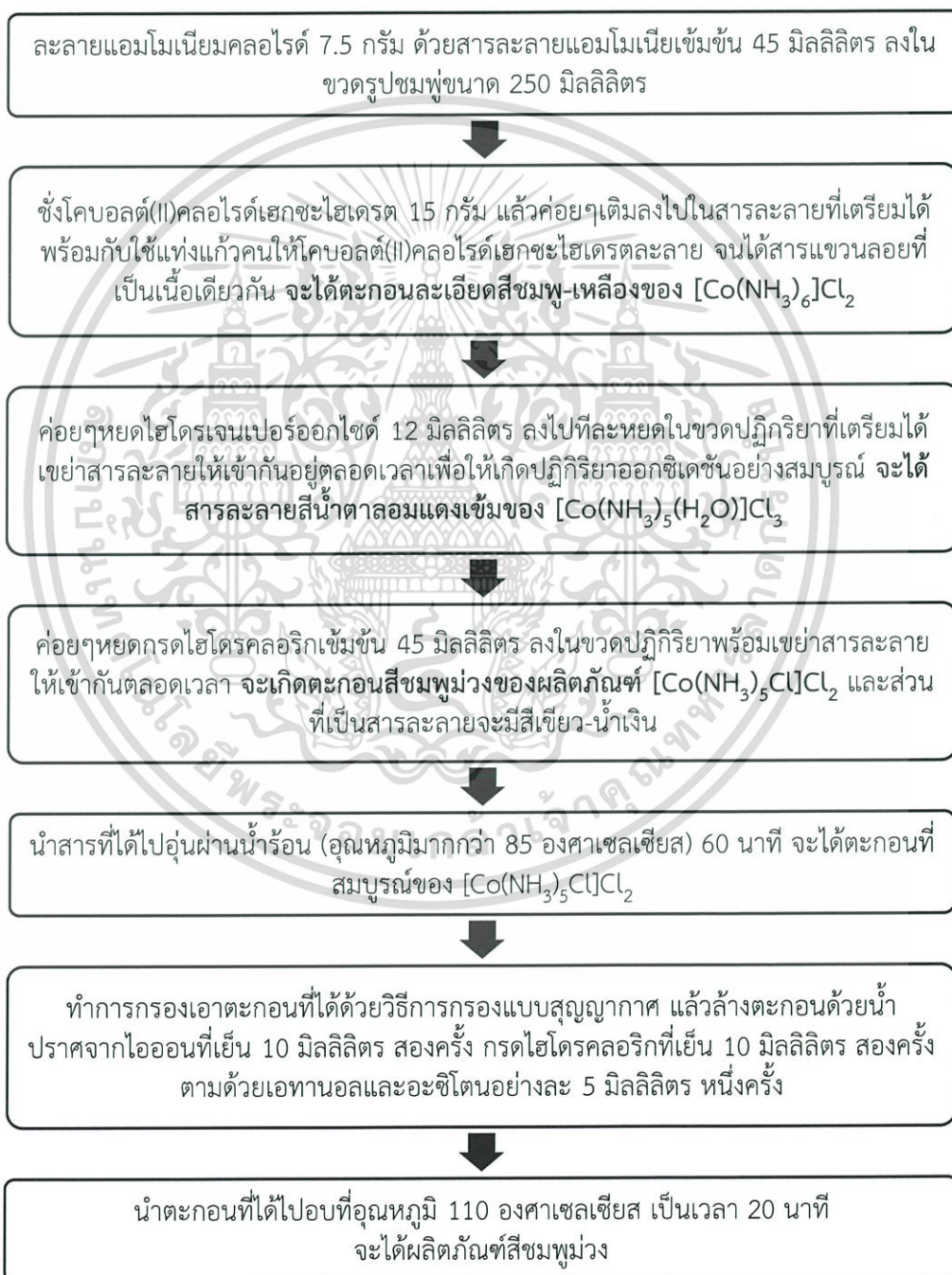
- 3.3.1 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$) [18]
 - 3.3.1.1 ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 7.5 กรัม ด้วยสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 30% 45 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
 - 3.3.1.2 ชั่งโคบอลต์(II)คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 15 กรัม แล้วค่อยๆเติมลงไปนในสารละลายที่เตรียมได้ พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้โคบอลต์(II)คลอไรด์เฮกซะไฮเดรตละลาย จนได้สารแขวนลอยที่เป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนนี้จะได้ตะกอนละเอียดสีชมพู-เหลืองของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$
 - 3.3.1.3 ค่อยๆใช้หลอดหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิลิตร ที่ละลายลงในขวดปฏิกิริยาที่เตรียมได้ เขย่าสารละลายให้เข้ากันอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ จะได้สารละลายสีน้ำตาลอมแดงเข้มของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{H}_2\text{O})]\text{Cl}_3$
 - 3.3.1.4 ค่อยๆใช้หลอดหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% 45 มิลลิลิตร ที่ละลายลงในขวดปฏิกิริยาที่เตรียมได้ พร้อมเขย่าสารละลายให้เข้ากันตลอดเวลา จะเกิดตะกอนสีชมพูม่วงของผลิตภัณฑ์ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และส่วนที่เป็นสารละลายจะมีสีเขียว-น้ำเงิน
 - 3.3.1.5 นำสารที่ได้ไปอุ่นผ่านน้ำร้อน (อุณหภูมิมากกว่า 85 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 60 นาที จะได้ตะกอนที่สมบูรณ์ของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$
 - 3.3.1.6 ทำการกรองตะกอนด้วยวิธีการกรองแบบสุญญากาศ แล้วล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เย็น 10 มิลลิลิตร สองครั้ง กรดไฮโดรคลอริกที่เย็น 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตร สองครั้ง ตามด้วยเอทานอล และอะซิโตนอย่างละ 5 มิลลิลิตร หนึ่งครั้ง

3.3.1.7 นำตะกอนที่กรองได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีชมพูม่วง

3.3.1 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$)

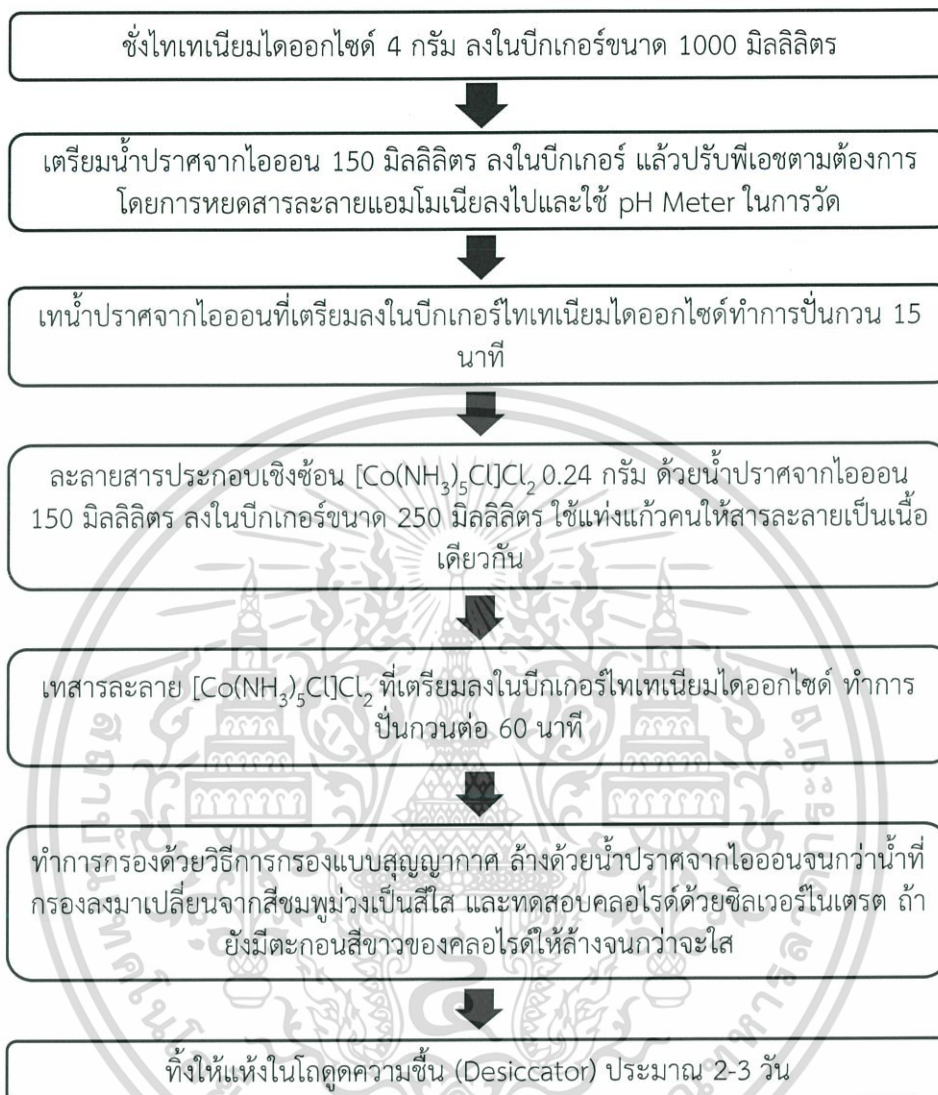


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

- 3.3.2.1 ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.3.2.2 เตรียมน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ แล้วปรับค่าพีเอชตามต้องการ โดยการหยดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 30% ลงไป และใช้ pH Meter ในการวัด
- 3.3.2.3 เติมน้ำปราศจากไอออนที่เตรียมลงในบีกเกอร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำการปั่นกวนให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวเป็นสารแขวนลอย เป็นเวลา 15 นาที
- 3.3.2.4 ละลายสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ 0.24 กรัม ด้วยน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้สารละลายสีชมพูม่วงใส
- 3.3.2.5 เติสารละลายเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ที่เตรียมลงในบีกเกอร์สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลา 60 นาที
- 3.3.2.6 ทำการกรองตะกอนด้วยวิธีการกรองแบบสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าน้ำที่กรองลงมาเปลี่ยนจากสีชมพูม่วงเป็นสีใส และทดสอบคลอไรด์ด้วยซิลเวอร์ไนเตรตถ้ายังมีตะกอนสีขาวของคลอไรด์ให้ล้างจนกว่าทดสอบแล้วได้เป็นสารละลายใส
- 3.3.2.7 ทิ้งให้แห้งในโถดูดความชื้น (Desiccator) ประมาณ 2-3 วัน

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$



ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม 3 อิทธิพล

อิทธิพลที่ 1 คือ อิทธิพลของค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำให้สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

อิทธิพลที่ 2 คือ อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมในการทำให้สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

อิทธิพลที่ 3 คือ อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เหมาะสมในการทำให้สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

อิทธิพล	ปริมาณ TiO_2 (กรัม)	ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (กรัม)	พีเอช	เวลาปั่นกวนเมื่อผสม TiO_2 กับ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (นาที)
อิทธิพลที่ 1	4	0.24	8	60
			9	
			11	
อิทธิพลที่ 2	4	0.24	11	15
				60
				120
อิทธิพลที่ 3	4	0.08 (2 wt. %)	11	60
		0.16 (4 wt. %)		
		0.24 (6 wt. %)		
		0.32 (8 wt. %)		
		0.40 (10 wt. %)		

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ในตู้มืด

3.3.3.1 การเตรียมสีอิมินดิโกคาร์มีน เข้มข้น 5×10^{-5} โมลาร์

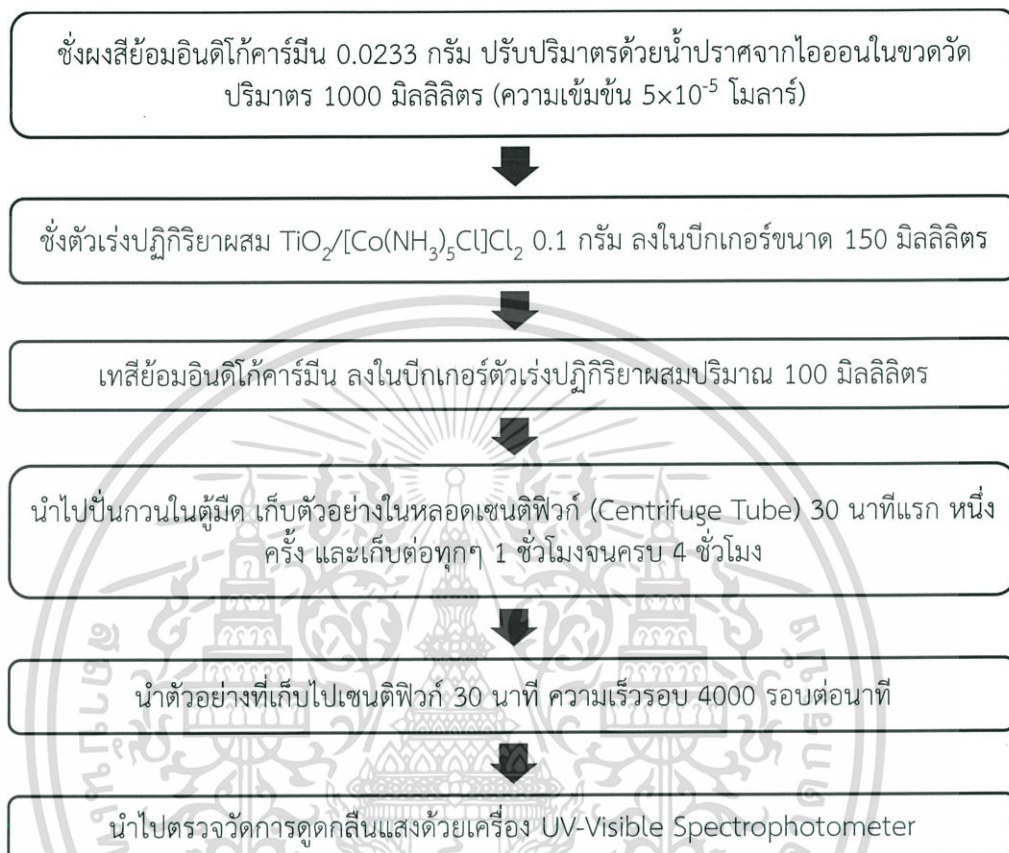
1. ชั่งผงสีอิมินดิโกคาร์มีน 0.0233 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

3.3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ในตู้มืด

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
2. เทสีอิมินดิโกคาร์มีน ลงในบีกเกอร์ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมปริมาณ 100 มิลลิลิตร
3. นำไปปั่นกวนในตู้มืดเก็บตัวอย่าง 30 นาทีแรก หนึ่งครั้ง และเก็บตัวอย่างต่อทุกๆ 1 ชั่วโมง ด้วยหลอดเซนติฟิวก์ 15 มิลลิลิตร จนครบ 4 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปเซนติฟิวก์ด้วยเครื่องเซนติฟิวก์เป็นเวลา 30 นาที ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที
5. นำไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ในตู้มืด



3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ ภายใต้การฉายแสง

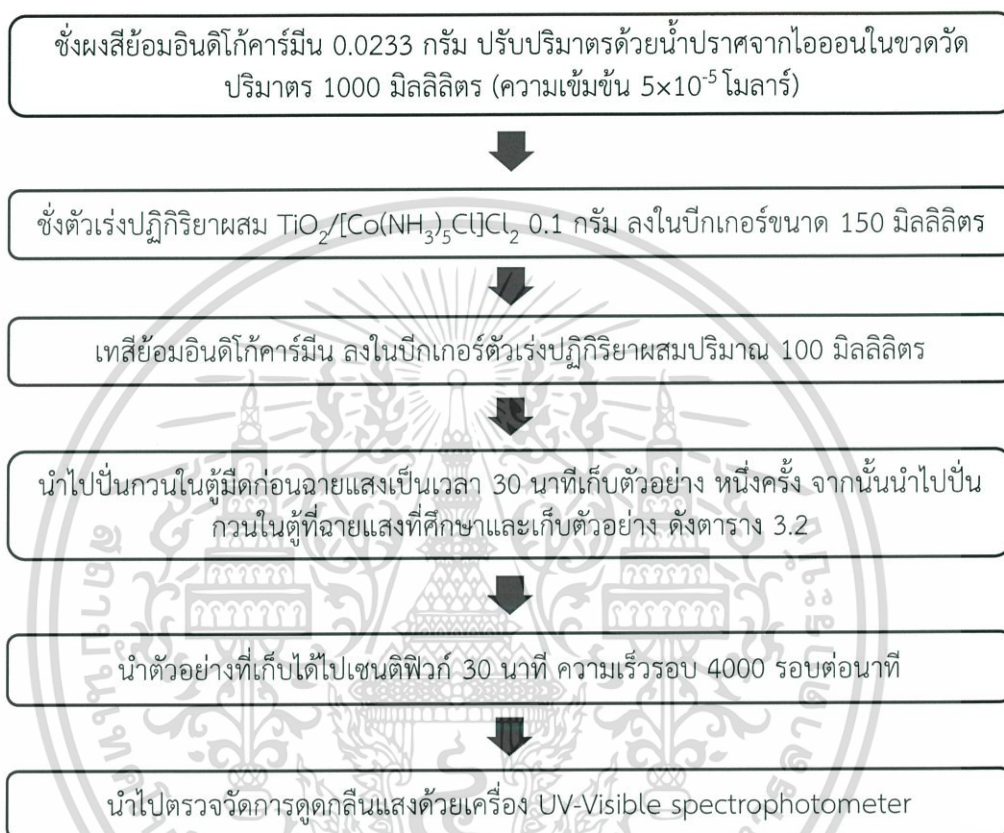
3.3.4.1 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
2. เทสีย้อมอินดิโกคาร์มีน (เตรียมที่ความเข้มข้น 5×10^{-5} โมลาร์ เหมือนกับ 3.3.3.1) ลงในบีกเกอร์ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมปริมาณ 100 มิลลิลิตร
3. นำไปปั่นกวนในตู้มืดก่อนฉายแสงเป็นเวลา 30 นาทีเก็บตัวอย่างในหลอดเซนติฟิวก์ หนึ่งครั้ง
4. นำไปปั่นกวนในตู้ที่ฉายแสงที่ศึกษา และเก็บตัวอย่าง ดังตาราง 3.2
5. นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปเซนติฟิวก์ด้วยเครื่องเซนติฟิวก์เป็นเวลา 30 นาที ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำไปตรวจวัดด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer)

3.3.4.1 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$



ตารางที่ 3.2 แสดงการเก็บตัวอย่างการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

แสงที่ศึกษา	ตัวอย่างที่ทดสอบ	วิธีการเก็บตัวอย่าง
แสงยูวี (Black light)	- โทเทเนียมไดออกไซด์ - พีเอช 8 9 และ 11 - เวลาในการปั่นกวน 15 60 และ 120 นาที	เก็บตัวอย่างในหลอดเซนติฟิวก์ทุกๆ 30 นาทีจนครบ 3 ชั่วโมง
แสงยูวี-วิสิเบิล (Day light)	- โทเทเนียมไดออกไซด์และทุกอิทธิพล	เก็บตัวอย่างในหลอดเซนติฟิวก์ทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 4 ชั่วโมง
แสงอาทิตย์	- โทเทเนียมไดออกไซด์ - ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.16 และ 0.24 กรัม - เวลาเก็บตัวอย่าง 11.00-13.00 น.	เก็บตัวอย่างในหลอดเซนติฟิวก์ทุกๆ 30 นาทีจนครบ 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์พหุสัจพจน์เอกลักษณ์

3.4.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ $\times 10,000$ เท่า การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจซึ่งภาพที่ได้จากเครื่องจะเป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าที่ดัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสัณฐานวิทยา และศึกษารายละเอียดลักษณะพื้นผิวของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

3.4.2 X-ray Diffraction (XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพหุสัจพจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มีมุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและระบุวิภาคองค์ประกอบต่างๆของสารตัวอย่าง โดยในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

3.4.3 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยการวัดค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้างและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ได้ งานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้าง และองค์ประกอบของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

3.4.4 UV-Vis Diffused Reflectance Spectrometer (DRS)

หลักการเหมือนกับเครื่อง UV-VIS แต่เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในสถานะ ของแข็ง เป็นเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (E_g) และในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 Photoluminescence Spectrophotometer (PL)

เป็นเครื่องมือที่วัดค่าการเปล่งแสงของสารโดยมีกระบวนการดูดกลืนและคายแสงที่อยู่ในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิล ค่าการคายแสงของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงที่เกิดจากความบกพร่องในผลึกของวัสดุอันเป็นผลทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้ากับประจุบวกบนแถบเวเลนซ์ จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณเป็นเทคนิคที่มีความไวสูงและสามารถใช้ตรวจสอบหรือพิสูจน์ชนิดของสารได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิเคราะห์หาการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

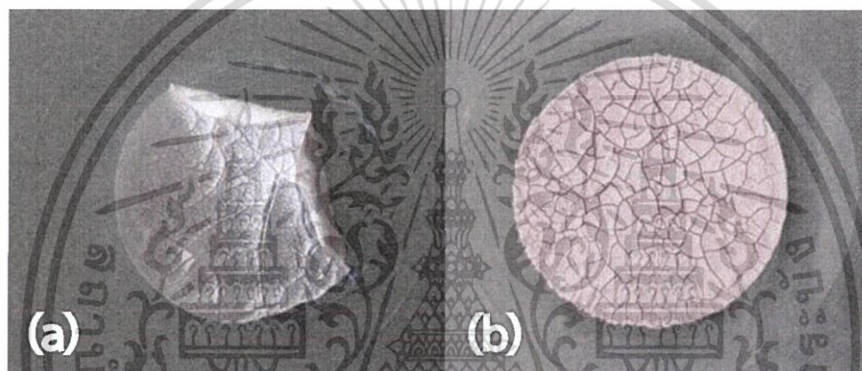
3.4.6 UV-VIS Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความเข้มของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิลที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารคือ เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิลที่ถูกดูดกลืนของของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์เป็นวัสดุตั้งต้นซึ่งเตรียมได้จากการเจือสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ซึ่งแบ่งเป็น 3 อิทธิพลคือ ค่าพีเอชที่ 8 9 และ 11 เวลาในการปั่นกวนที่ 15 60 และ 120 นาที และปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ที่ 0.08 0.16 0.24 0.32 และ 0.40 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.1



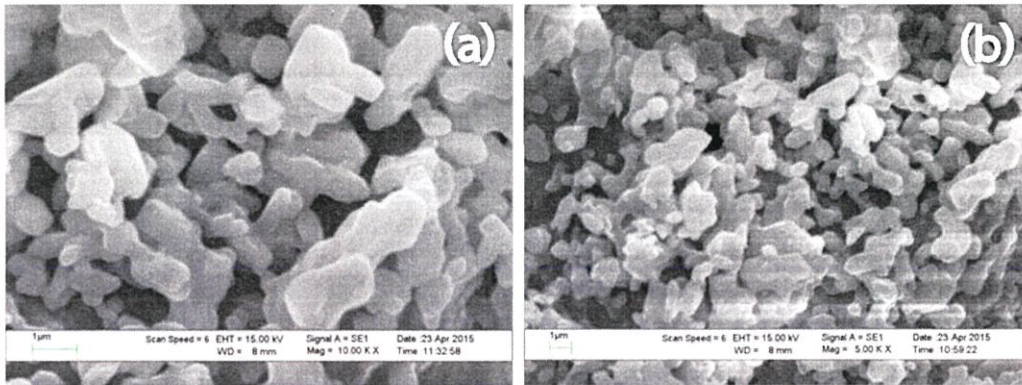
รูปที่ 4.1 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาผสมบนแผ่นกระจก (a) ไม่เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

4.1 การวิเคราะห์พิสูจน์เอกลักษณ์

4.1.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

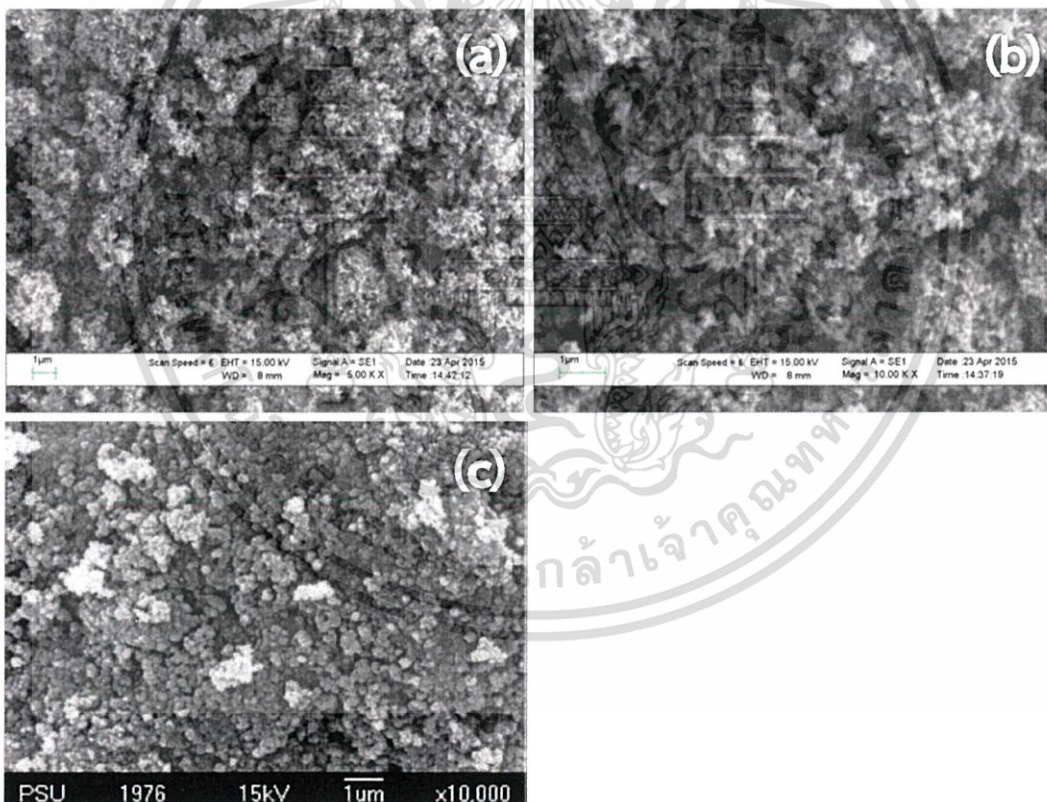
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการศึกษาสัญญาณวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาดและรูปร่างของอนุภาคผง หรือตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงานและแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของ $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ ดังแสดงต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ (a) และ (b)

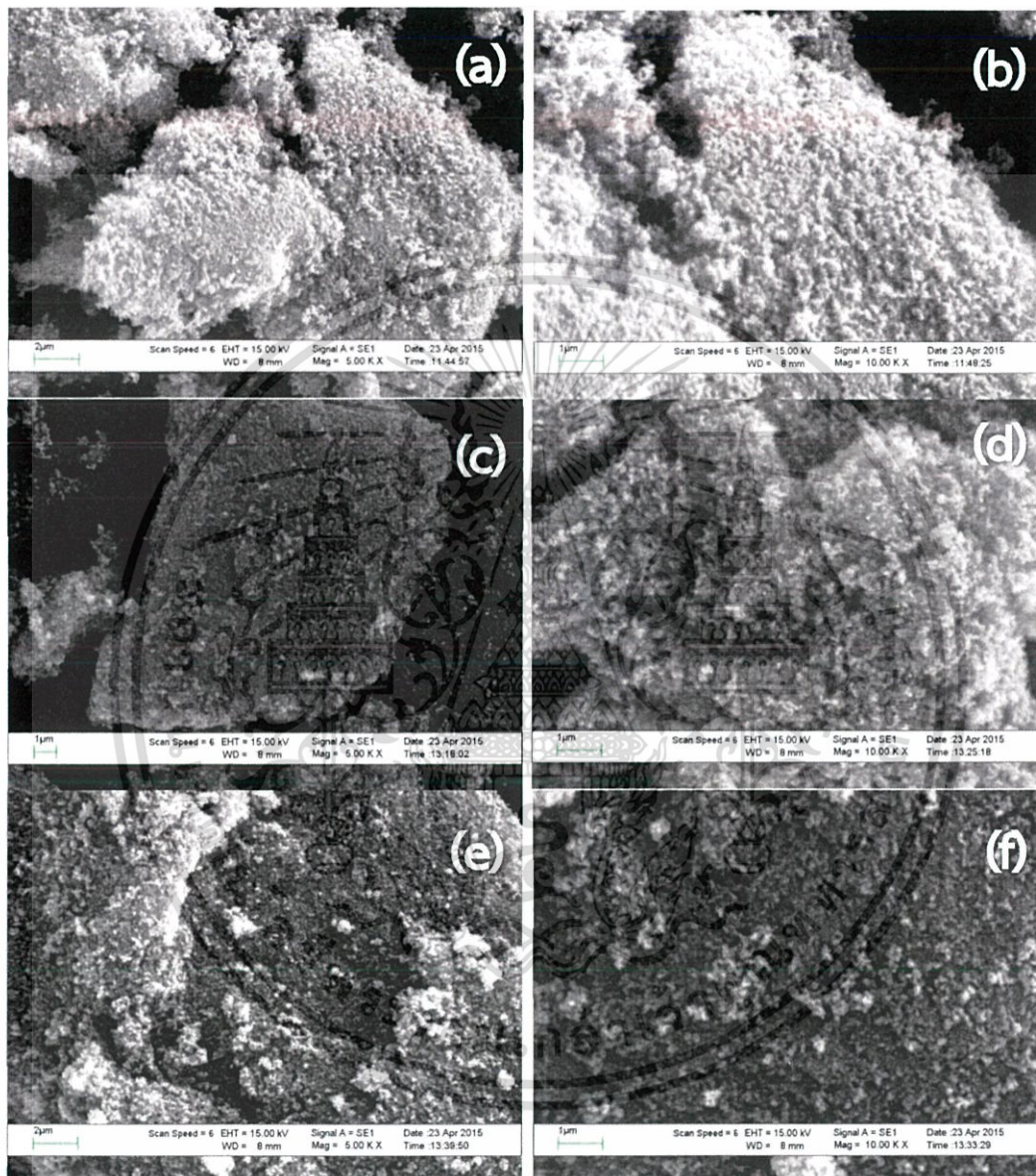
จากรูปที่ 4.2 เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์พบว่า อนุภาคมีขนาดเล็กลักษณะคล้ายแท่งกลมยาว มีลักษณะเกรนติดกัน และขนาดเกรนมีทั้งเกรนเล็กและเกรนใหญ่



รูปที่ 4.3 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านล่าง) [2] ของโพลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (a) (b) และ (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (a) และ (b) เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะเห็นว่า มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กละเอียดมีการเกาะตัวกันแต่ไม่แน่น ยังคงมีการกระจายตัวของอนุภาคโดยยืนยันได้จากการเปรียบเทียบกับรูป (c) ลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า [2]

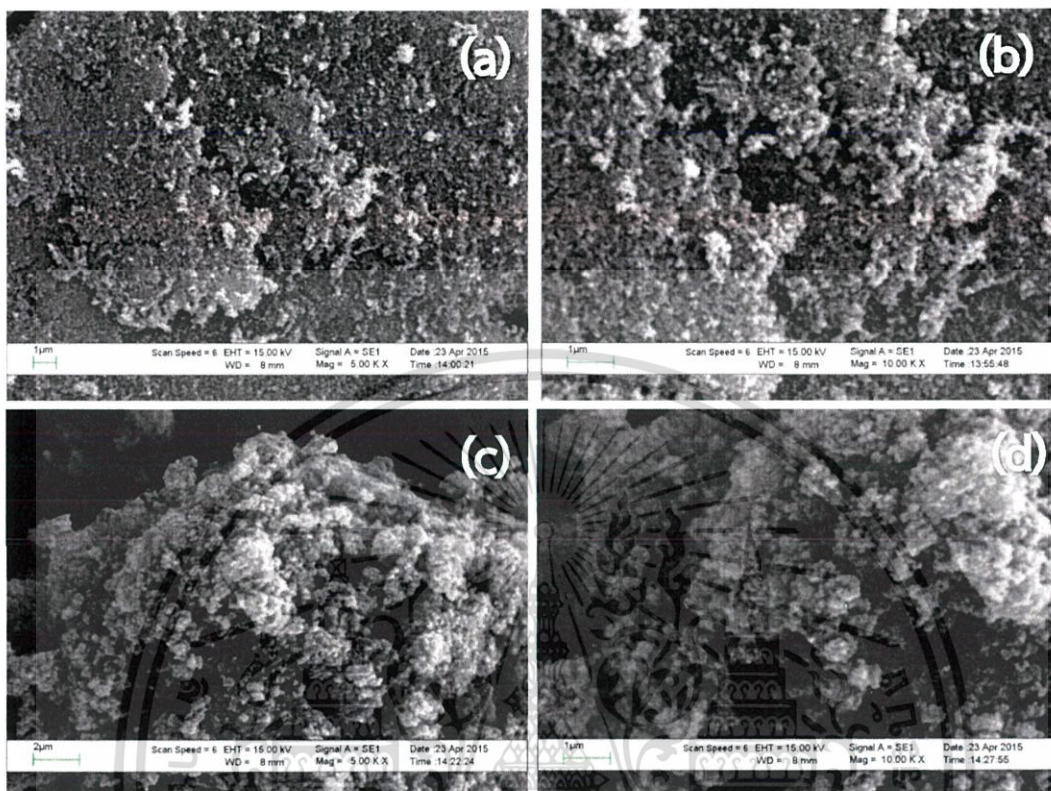


รูปที่ 4.4 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของ pH8 (a) และ (b) pH9 (c) และ (d) pH11 (e) และ (f)

จากรูปที่ 4.4 เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชที่ 8 9 และ 11 พบว่า ไม่มีความแตกต่างกับลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มากนัก ยังคงเห็นเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่แต่อนุภาคมีการเกาะกันแน่นขึ้น



รูปที่ 4.5 SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย $\times 5,000$ เท่า (ทางด้านซ้าย) และ $\times 10,000$ เท่า (ทางด้านขวา) ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือ 0.08 กรัม (a) และ (b) 0.40 กรัม (c) และ (d)

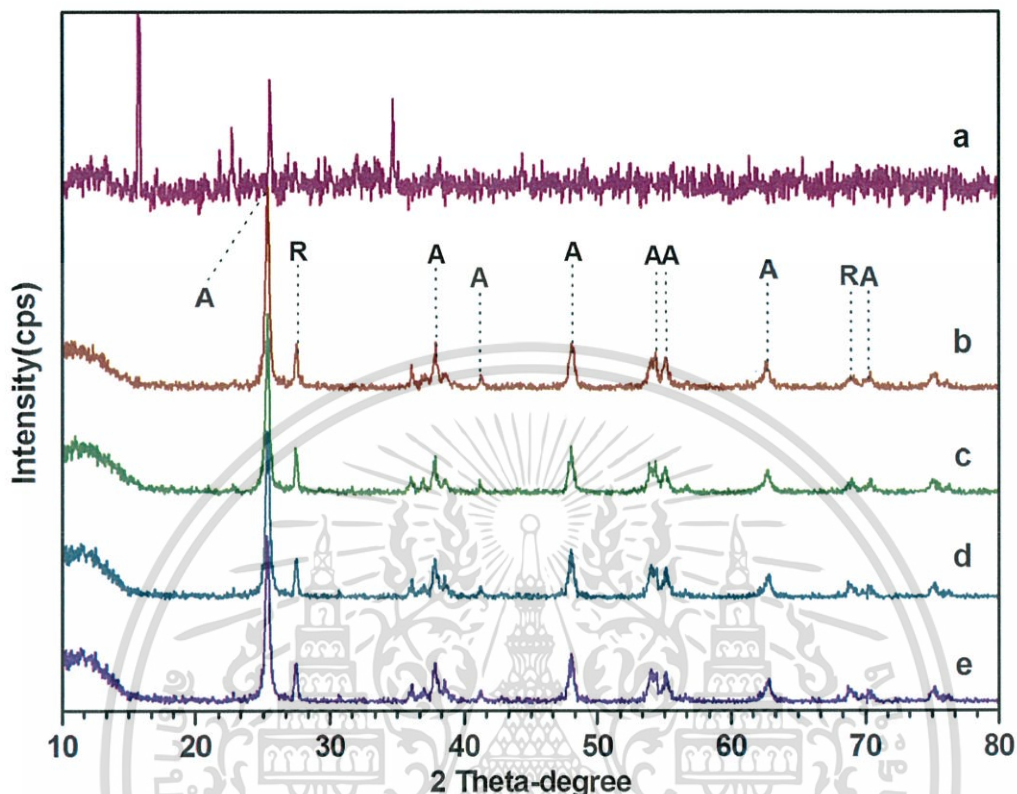
จากรูปที่ 4.5 เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้อิทธิพลปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0.08 กรัมและ 0.40 กรัมพบว่า ไม่มีความแตกต่างกับลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มากนัก ยังคงเห็นเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่แต่อนุภาคมีการเกาะกันแน่นขึ้น

4.1.2 X-ray diffraction (XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและระบุวิวัฒนาการของโครงสร้างของสารตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของ $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้

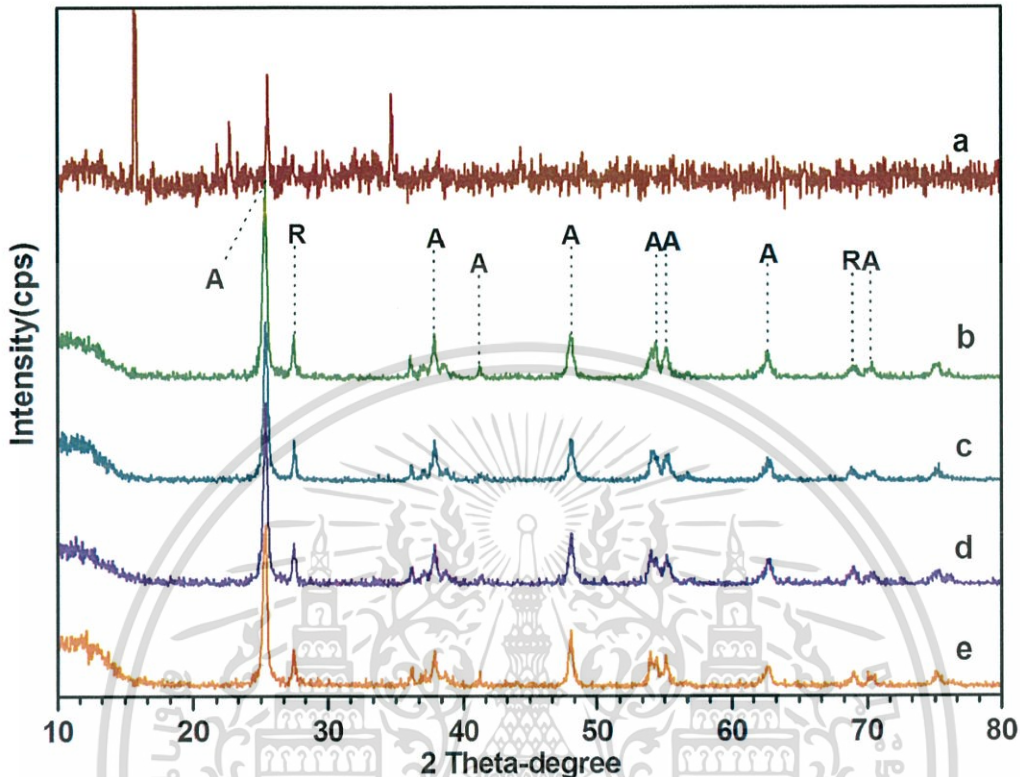


รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบ XRD ของ (a) สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช (c) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}8$ (d) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}9$ (e) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}11$

จากรูปที่ 4.6 (a) ผลการศึกษาลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 15.72^\circ, 25.52^\circ$ และ 34.68° พิกมีความเข้มสูง ซึ่งถือว่ามีค่าความเป็นผลึกสูง และจากการศึกษาลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ รูปที่ 4.6 (b) จะพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 25.36^\circ, 37.88^\circ, 41.24^\circ, 48.04^\circ, 54.32^\circ$ และ 55.12° ซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของเฟสอะนาเทส และพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมการเลี้ยวเบน $2\theta = 27.48^\circ$ และ 69.18° ซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของเฟสรูไทล์ ยืนยันได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นของผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์ โดยผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้นำไปเทียบกับข้อมูลมาตรฐานอย่างไรก็ตามจากการศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช รูปที่ 4.6 (c) (d) และ (e) พบว่าพิกไม่มีความแตกต่างกับพิกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และไม่ปรากฏพิกของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่นำมาเจือลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจือลงไปในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction หรือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายอาจทำให้สูญเสียความเป็นผลึกไป



รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบ XRD ของ (a) สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของเวลาในการป่นกวน (c) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที (d) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 60 นาที (e) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 120 นาที

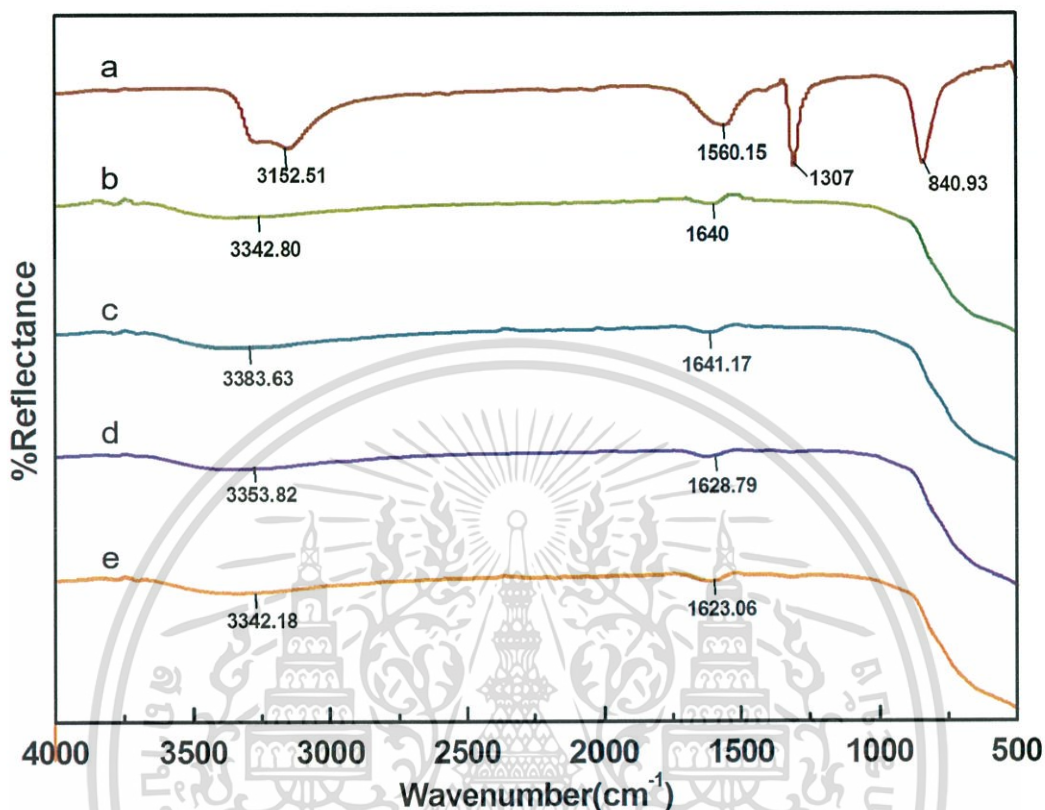
จากรูปที่ 4.7 (c) (d) และ (e) ผลการศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการป่นกวนด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่าพีคไม่มีความแตกต่างกับพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และไม่ปรากฏพีคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่นำมาเจือลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเจือลงไปในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction หรือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายอาจทำให้สูญเสียความเป็นผลึกไป

4.1.3 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทต่างๆของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล ใช้เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้

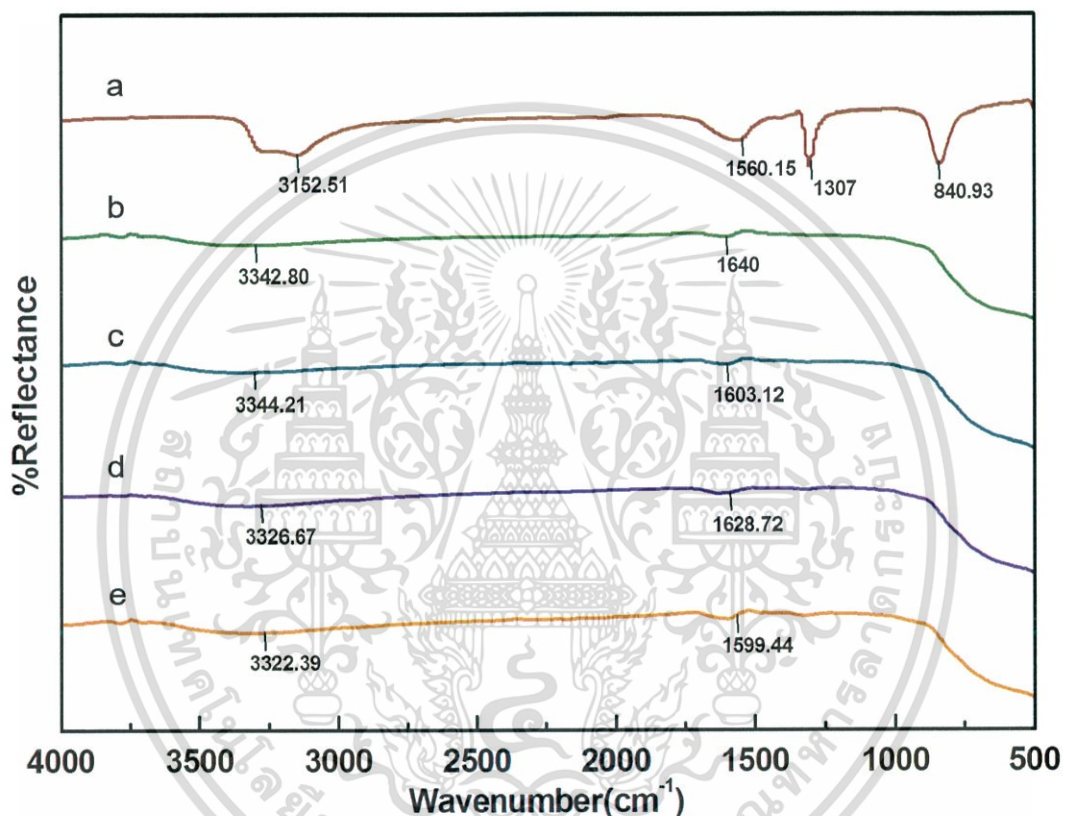


รูปที่ 4.8 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (a) สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) โทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช (c) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}8$ (d) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}9$ (e) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}11$

จากการวิเคราะห์ผลของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ด้วยเครื่อง FT-IR รูปที่ 4.8 (a) พบการสั่นของคลิ่นที่ 3152.52 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching พบการสั่นของคลิ่นที่ 1560.15 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน N-H Bending พบการสั่นของคลิ่นที่ 1307 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน N-H Rocking และพบการสั่นของคลิ่นที่ 840.93 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน Co-Cl (Nada et al., 2015) และจากการวิเคราะห์ผลของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ รูปที่ 4.8 (b) จะพบการสั่นของคลิ่นที่ประมาณ 3300 cm^{-1} และ 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching และ O-H Bending ตามลำดับ และยังพบการสั่นของคลิ่นที่บริเวณต่ำกว่า 800 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนแบบกว้างๆ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของโทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่าง Ti-O (Chaval et al., 2014) และจากตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช รูปที่ 4.8 (c) (d) และ (e) จะเห็นว่า FT-IR สเปกตรัมที่ได้ไม่แตกต่างจากสเปกตรัมของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

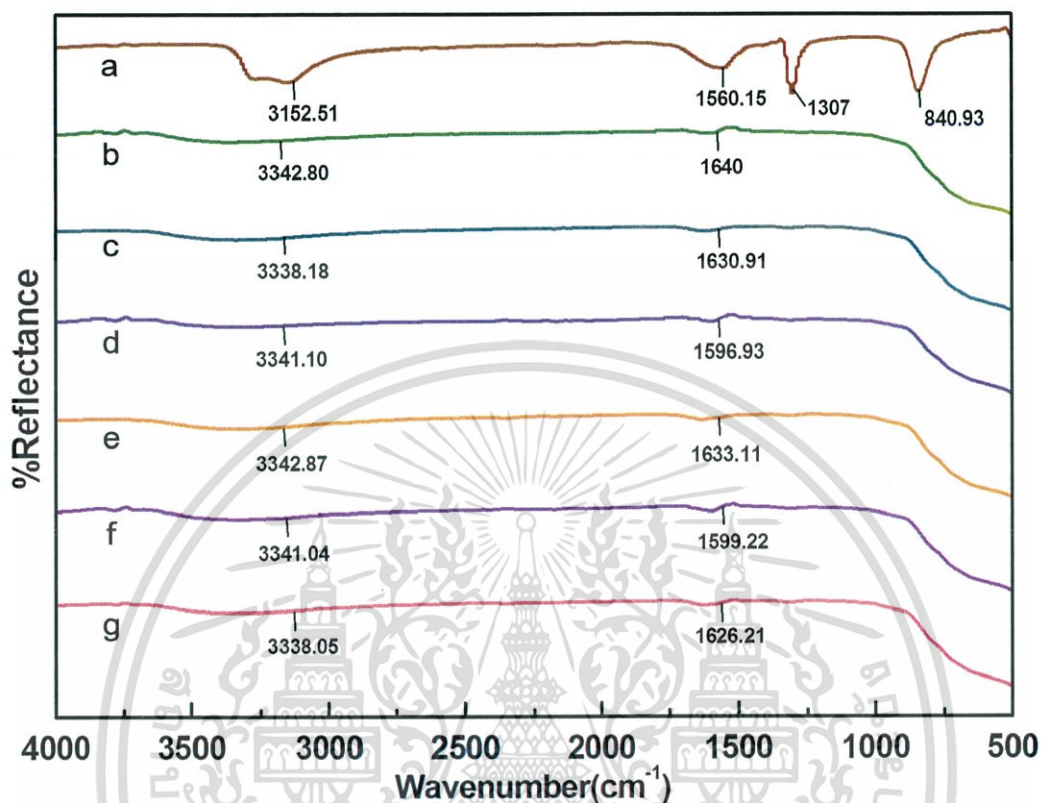
สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และจะพบการสั่นของคลื่นที่ประมาณ 3300 cm^{-1} และ 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching และ O-H Bending ตามลำดับ การที่พบแถบการสั่นของ O-H อาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณความชื้นในอากาศที่ส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และนอกจากนี้ยังไม่ปรากฏพีคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่นำมาเจือลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเจือลงไปในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง FT-IR หรือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายอาจทำให้สูญเสียความเป็นผลึกไป



รูปที่ 4.9 แสดง FT-IR สเปกตราของ (a) สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ (b) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน (c) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - 15$ นาที (d) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - 60$ นาที (e) $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - 120$ นาที

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน รูปที่ 4.9 (c) (d) และ (e) จะเห็นว่า FT-IR สเปกตราที่ได้ไม่แตกต่างจากสเปกตราของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะพบการสั่นของคลื่นที่ประมาณ 3300 cm^{-1} และ 1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching และ O-H Bending ตามลำดับ การที่พบแถบการสั่นของ O-H อาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณความชื้นในอากาศที่ส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และนอกจากนี้ยังไม่ปรากฏพีคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่นำมาเจือลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจาก

เจือลงไปในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง FT-IR หรือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายอาจทำให้สูญเสียความเป็นผลึกไป



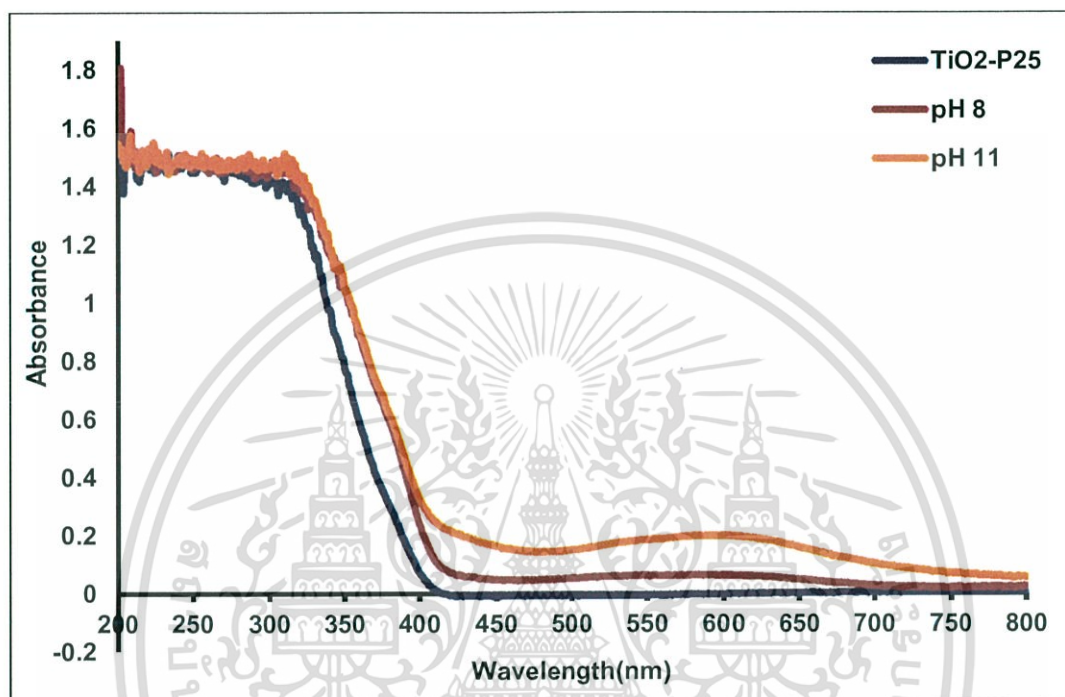
รูปที่ 4.10 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (a) สารประกอบเชิงซ้อน [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ (b) โทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ ที่เจือ (c) TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ - 0.08 กรัม (d) TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ - 0.16 กรัม (e) TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ - 0.24 กรัม (f) TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ - 0.32 กรัม (g) TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ - 0.40 กรัม

จากการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ ที่เจือ รูปที่ 4.10 (c) (d) (e) (f) และ (g) จะเห็นว่า FT-IR สเปกตรัมที่ได้ไม่แตกต่างจากสเปกตรัมของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ จะพบการสั่นของคลื่นที่ประมาณ 3300 cm⁻¹ และ 1600 cm⁻¹ ซึ่งเป็นแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching และ O-H Bending ตามลำดับ การที่พบแถบการสั่นของ O-H อาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณความชื้นในอากาศที่ส่งผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO₂/[Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ และนอกจากนี้ยังไม่ปรากฏพีคของสารประกอบเชิงซ้อน [Co(NH₃)₅Cl]Cl₂ ที่นำมาเจือลงบนพื้นผิวของโทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากเจือลงไปในปริมาณที่น้อยมากจึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง FT-IR หรือเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายอาจทำให้สูญเสียความเป็นผลึกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 UV-Vis Diffused Reflectance Spectrometer (DRS)

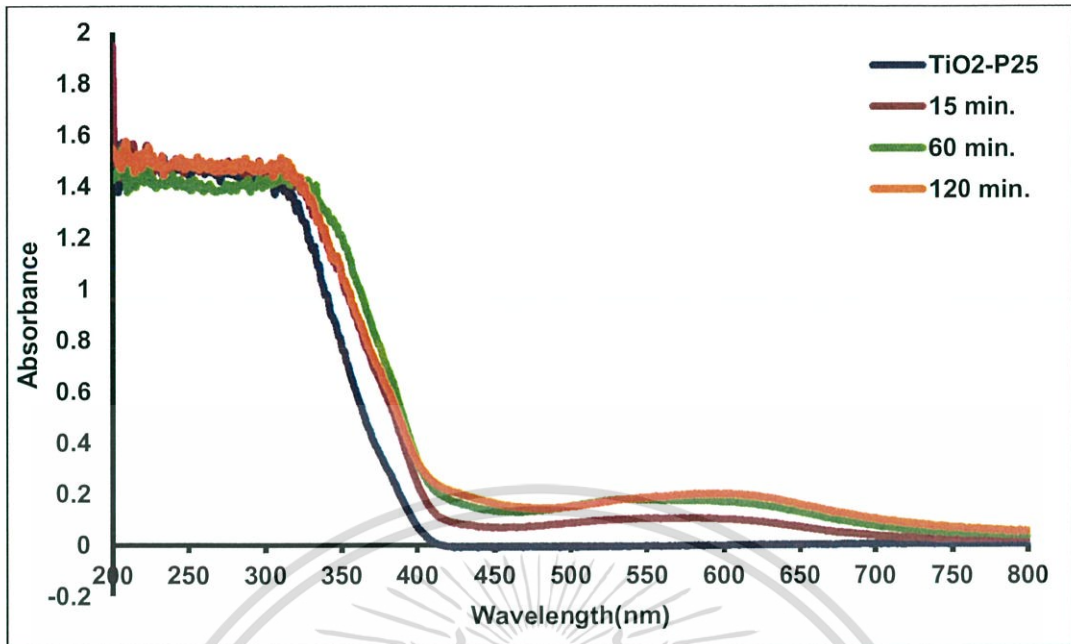
หลักการเหมือนกับเครื่อง UV-VIS แต่เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในสถานะ ของแข็ง เป็นเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน (Eg) และในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$



รูปที่ 4.11 แสดง DRS สเปกตรัมของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น ที่พีเอช 11 ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นจะมีค่ามากกว่าพีเอช 8, 9 และโทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของโทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมาก และอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างโทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียม คือเมื่อสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แตกตัวจะกลายเป็น $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]^{3+}$ และมีการปรับประจุบนพื้นผิวของโทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความเป็นลบมากขึ้น จะเห็นได้ว่าถ้ามีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของโทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้นเนื่องจากค่าพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มาก ส่งผลให้แถบพลังงานจะแคบลง เป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดง DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการบ่มกวน

จากรูปที่ 4.12 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการบ่มกวนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น ที่เวลา 120 นาที ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นจะมีความมากกว่า 15 นาที, 60 นาที และไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมาก และอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียม คือเมื่อสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แตกตัวจะกลายเป็น $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]^{3+}$ และมีการปรับประจุบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความเป็นลบมากขึ้น จะเห็นได้ว่าถ้ามีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มากเนื่องจากเวลาในการบ่มกวนเพิ่มขึ้นจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มาก ส่งผลให้แถบพลังงานจะแคบลง เป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แต่จะเห็นว่าที่เวลา 120 นาทีมีค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปใกล้เคียงกับที่เวลา 60 นาทีมาก อาจจะเป็นเพราะปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณที่อิ่มตัว

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 นำมาลากตัดและนำค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงเริ่มต้น (λ_{onset}) ที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าแถบพลังงาน จากสูตร

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda}$$

จะได้ค่าดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้

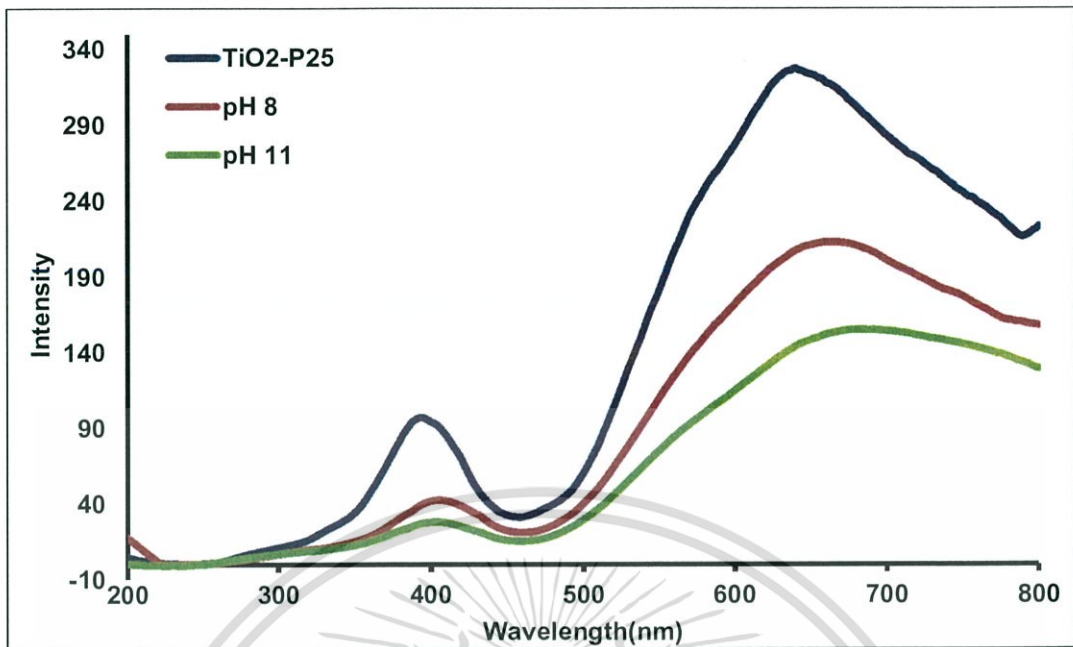
Sample	DRS	
	λ_{onset} (nm)	Band gap (eV.)
TiO ₂ -P25	401	3.09
TiO ₂ -Co-pH8	411	3.01
TiO ₂ -Co-pH11	416	2.98
TiO ₂ -Co-15 min.	410	3.02
TiO ₂ -Co-60 min.	418	2.97
TiO ₂ -Co-120 min.	419	2.96

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช มีค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงเริ่มต้นมากขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานแคบลง ตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน มีค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงเริ่มต้นมากขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานแคบลง ตามเวลาในการปั่นกวนที่เพิ่มขึ้น

4.1.4 Photoluminescence Spectrophotometer (PL)

เป็นเครื่องมือที่วัดค่าการเปล่งแสงของสารโดยมีกระบวนการดูดกลืนและคายแสงที่อยู่ในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิล ค่าการคายแสงของสารเป็นสัดส่วนโดยตรงที่เกิดจากความบกพร่องในผลึกของวัสดุอันเป็นผลทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้ากับประจุบวกบนแถบเวเลนซ์ จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่มีความไวสูงและสามารถใช้ตรวจสอบหรือพิสูจน์ชนิดของสารได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิเคราะห์หาการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

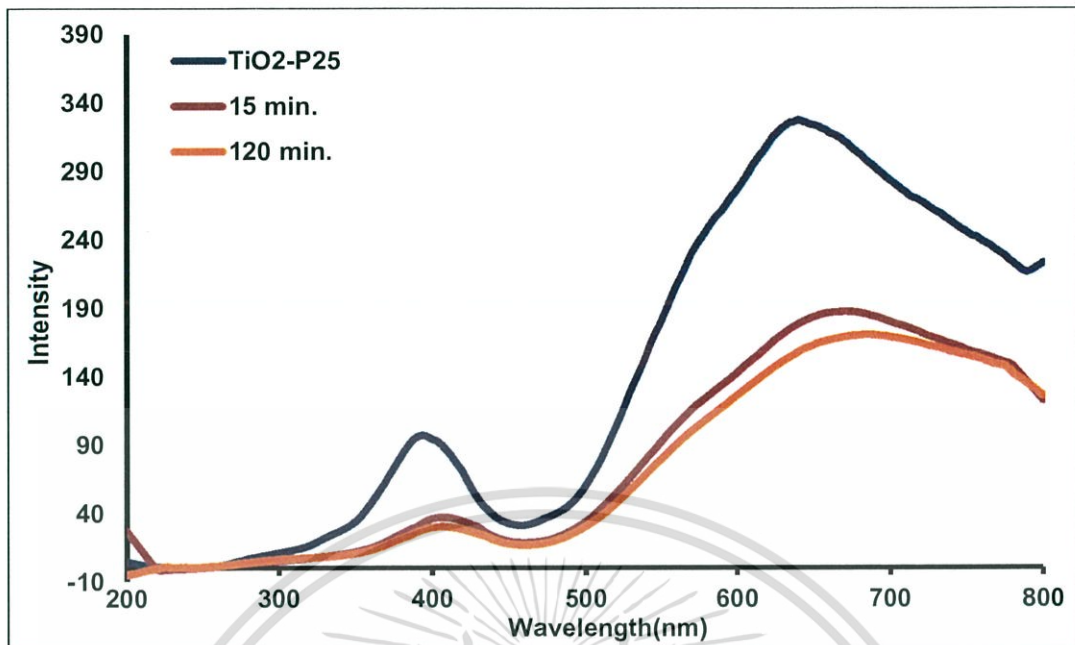
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดง PL สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-800 นาโนเมตรเป็นช่วงที่แสดงค่าการคายพลังงานแสงของวัสดุ ที่สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเข้มของพีคสูงที่สุดอาจเกิดจากความบกพร่องในโครงสร้าง Ti-O ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล แต่ความเข้มของพีคก็ยังไม่สูงมากนัก เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นเกรดเชิงการค้าจะมีความบกพร่องน้อย และที่สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชที่ 8 และ 11 มีความเข้มของพีคลดลงตามลำดับ เป็นผลมาจากการเจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสารพวกนี้จะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) แทนที่เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าปกติจะมีโอกาสรวมตัวกันกับโฮล แต่อาจจะส่งอิเล็กตรอนไปที่สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แทนถ้ายังมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มาก โอกาสที่อิเล็กตรอนรวมตัวกันกับโฮลจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดง PL สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่น กวน

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-800 นาโนเมตรเป็นช่วงที่ แสดงค่าการคายพลังงานแสงของวัสดุ ที่สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเข้มของพีคสูง ที่สุดอาจเกิดจากความบกพร่องในโครงสร้าง Ti-O ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล แต่ ความเข้มของพีคก็ยังไม่สูงมากนัก เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นกรดเชิงการค้าจะมีความ บกพร่องน้อย และที่สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของ เวลาในการปั่นกวนที่ 15 และ 60 นาที มีความเข้มของพีคลดลงตามลำดับ เป็นผลมาจากการเจือสาร ประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสารพวกนี้จะทำหน้าที่ รับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) แทนที่เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการ นำไฟฟ้าปกติจะมีโอกาสรวมตัวกันกับโฮล แต่อาจจะส่งอิเล็กตรอนไปที่สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แทน ถ้ายังมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เกะบนพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์มาก โอกาสที่อิเล็กตรอนรวมตัวกันกับโฮลจะลดลง

4.1.6 UV-VIS Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดค่าความเข้มของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิลที่ถูก ดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและ ชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารคือ เมื่อ โมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการ ดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ได้ ในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงแสงยูวีและแสงวิสิเบิลที่

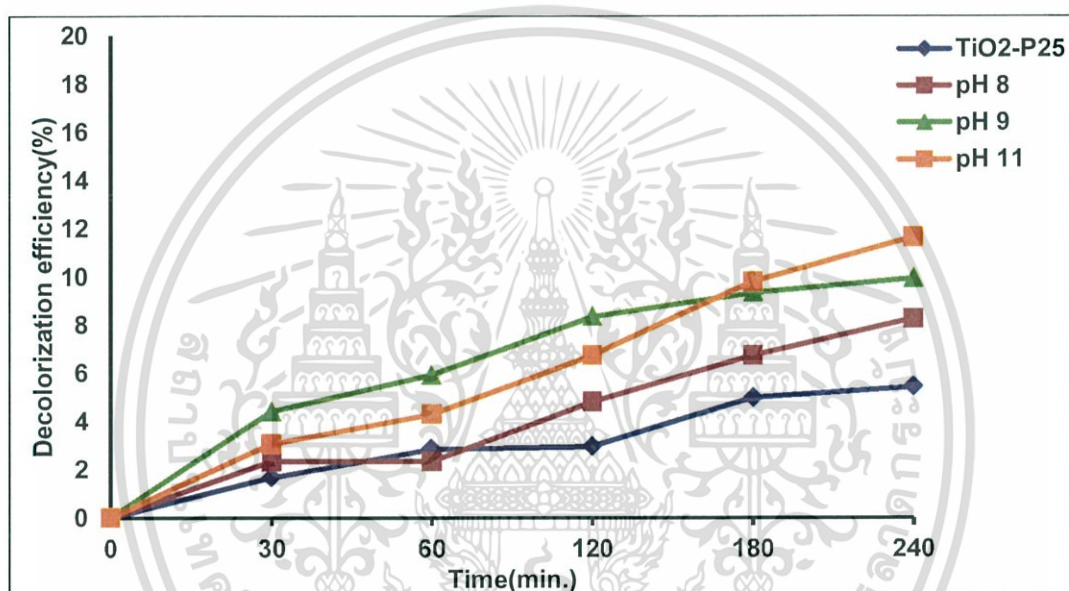
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกดูดกลืนของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ทั้งนี้เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องแล้วสามารถหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับและการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินได้จากสูตร

$$\text{Decolorization efficiency} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 = \%$$

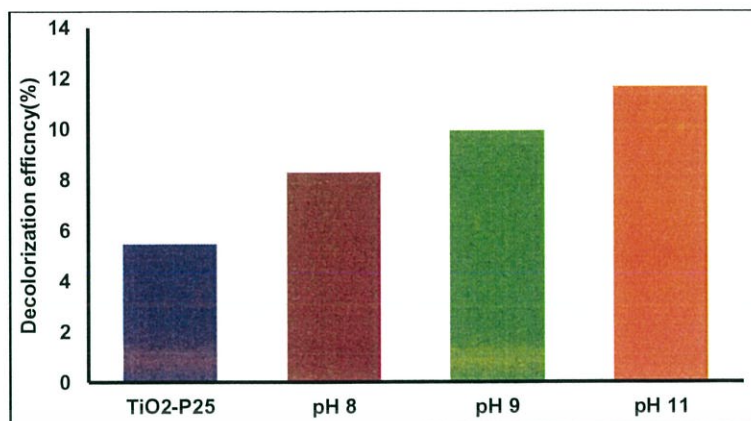
เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาใดๆ



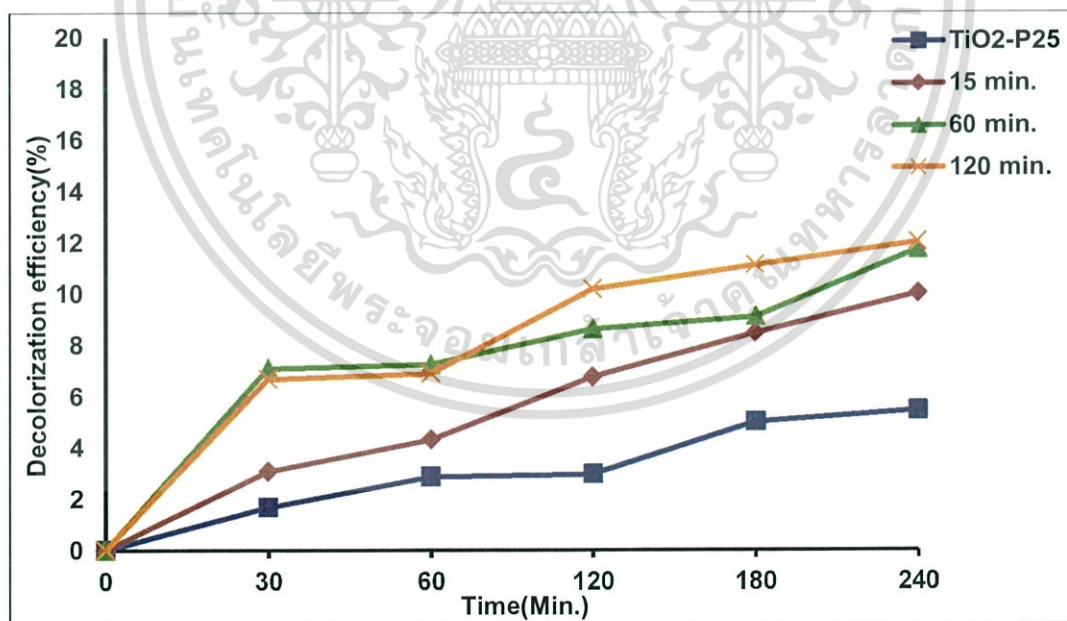
จากรูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชในตัวเร่ง เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



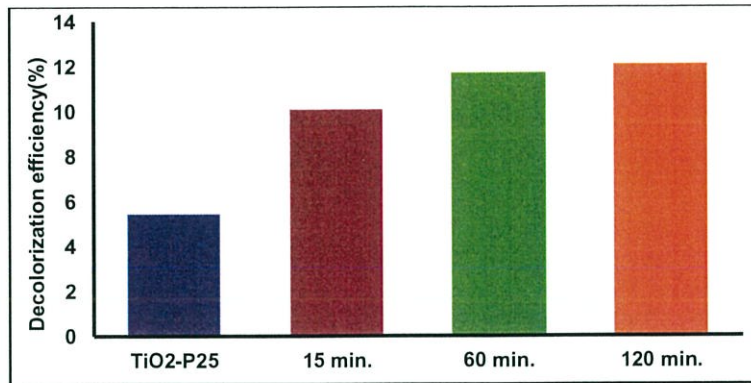
รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชในตุ้มมืด ที่เวลา 240 นาที

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอช ในตุ้มมืด พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสี้อมเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสี้อมจะเพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$



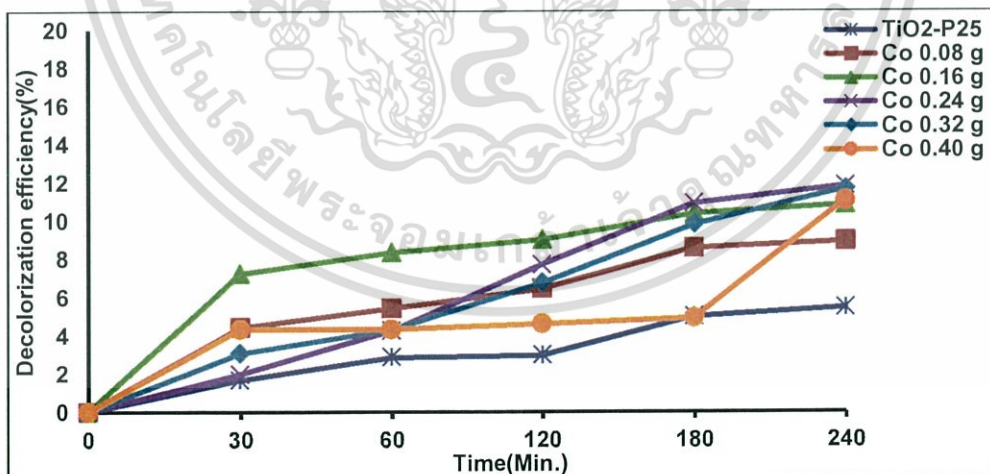
จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการบ่มกวนในตุ้มมืด เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

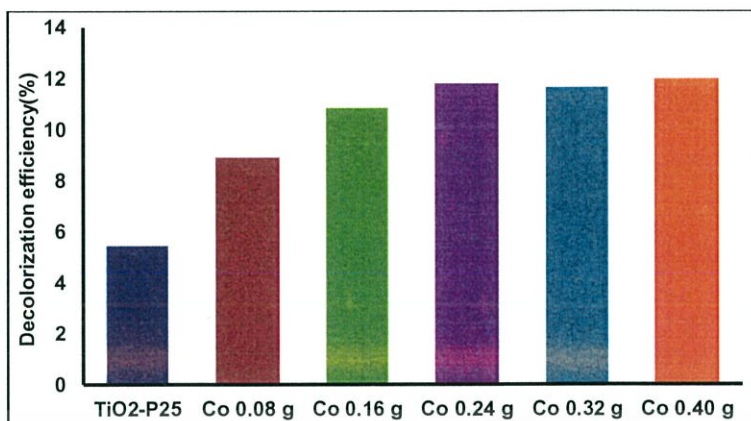


รูปที่ 4.18 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการบ่มกวนในตู้มืด ที่เวลา 240 นาที

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการบ่มกวนในตู้มืด พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่มกวนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินเพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แต่จะสังเกตได้ว่าที่เวลาในการบ่มกวน 120 นาที จะมีประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินที่ใกล้เคียงกับเวลา 60 นาที อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณที่อิ่มตัว

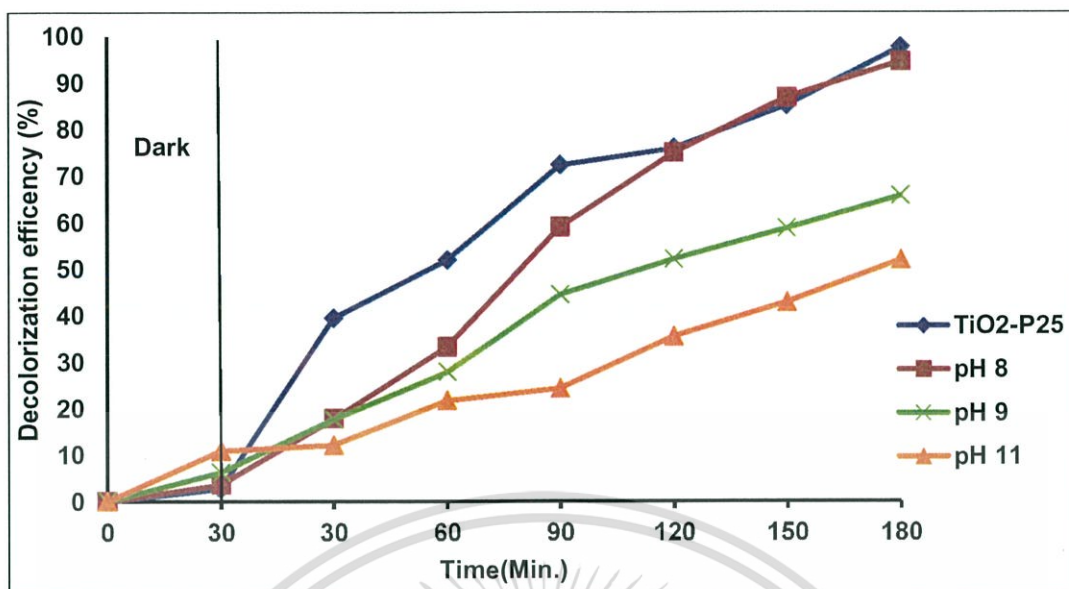


จากรูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือในตู้มืด เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

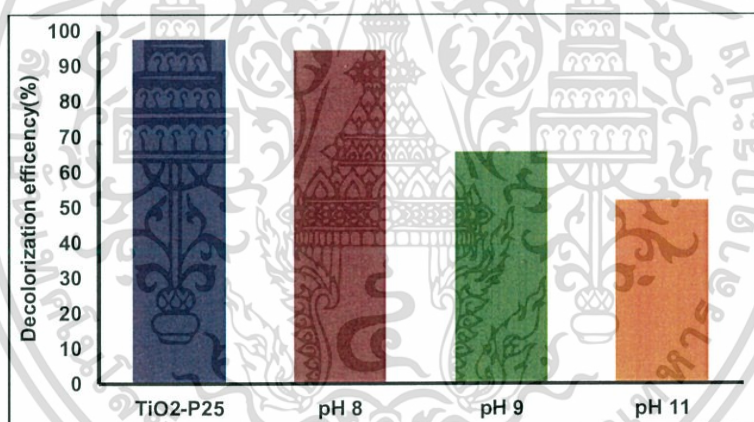


รูปที่ 4.20 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือในตัวเร่ง ที่เวลา 240 นาที

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือในตัวเร่ง พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมจะเพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แต่จะสังเกตได้ว่า ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ 0.24 0.32 และ 0.40 กรัม จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมที่ใกล้เคียงกัน อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณที่อิ่มตัว



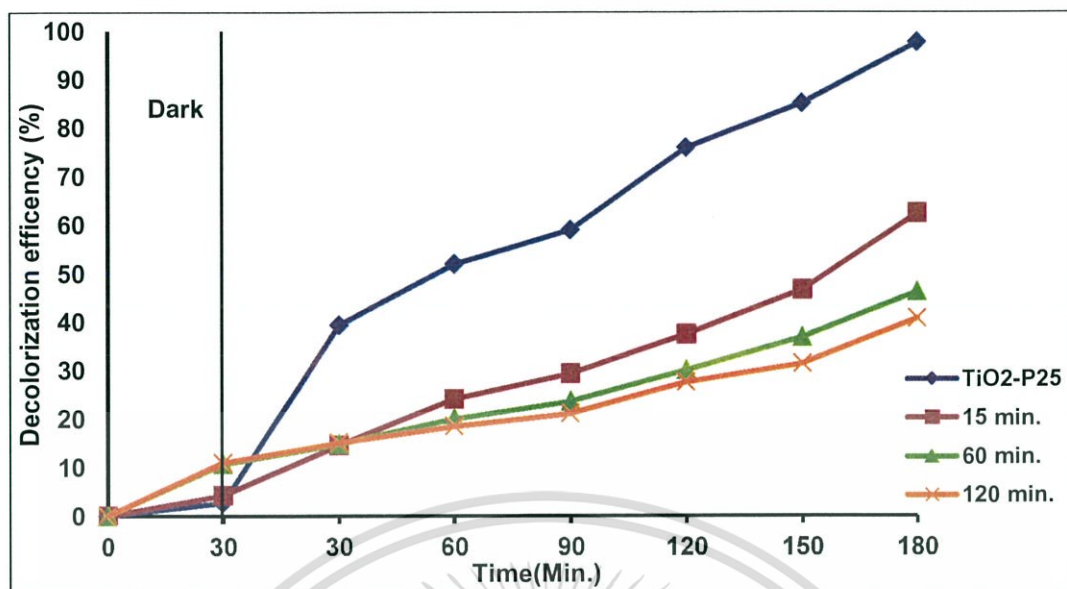
จากรูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของพีเอชภายใต้แสงยูวี เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



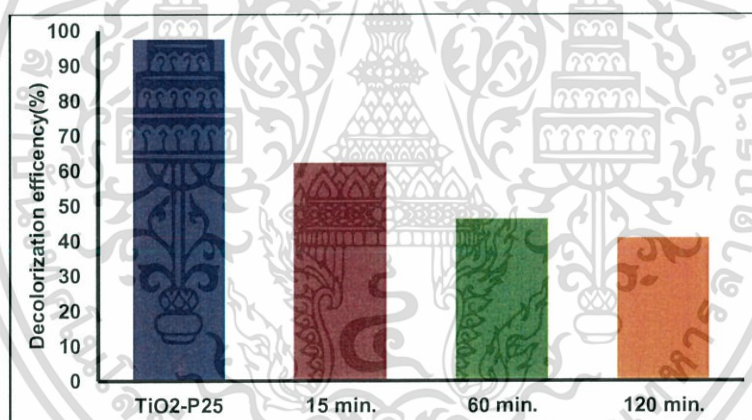
รูปที่ 4.22 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชภายใต้แสงยูวี ที่เวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชภายใต้แสงยูวี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีของอินดิโกคาร์มินลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น อาจทำให้ไปยับยั้งการดูดกลืนแสงยูวีในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เป็นผลมาจากอนุภาคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไปบดบังพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



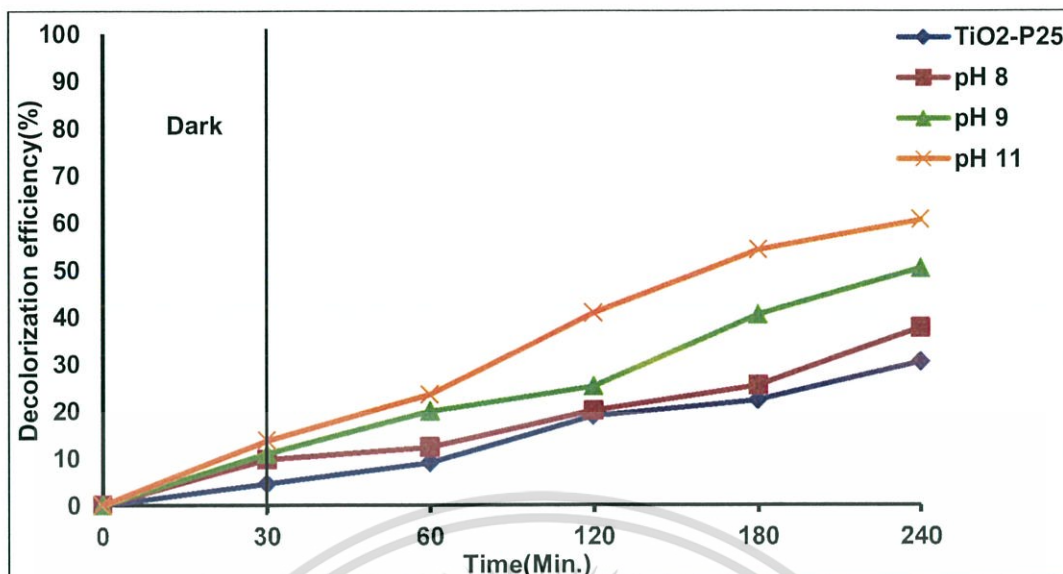
จากรูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนภายใต้แสงยูวี เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



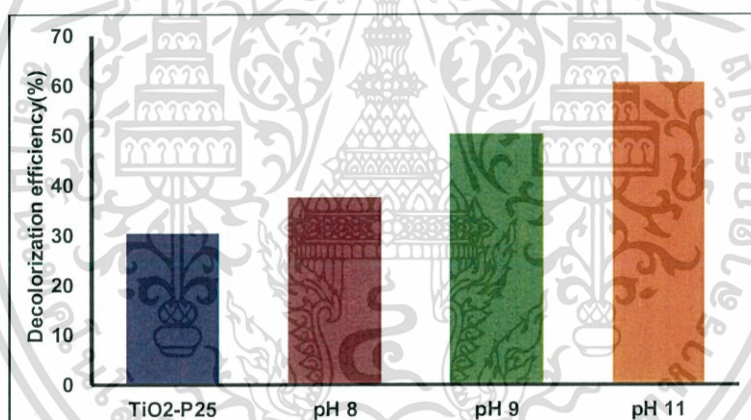
รูปที่ 4.24 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนภายใต้แสงยูวี ที่เวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนภายใต้แสงยูวี พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมลดลงเมื่อเวลาในการปั่นกวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น อาจทำให้ยับยั้งการดูดกลืนแสงยูวีในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เป็นผลมาจากอนุภาคของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ไปบดบังพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



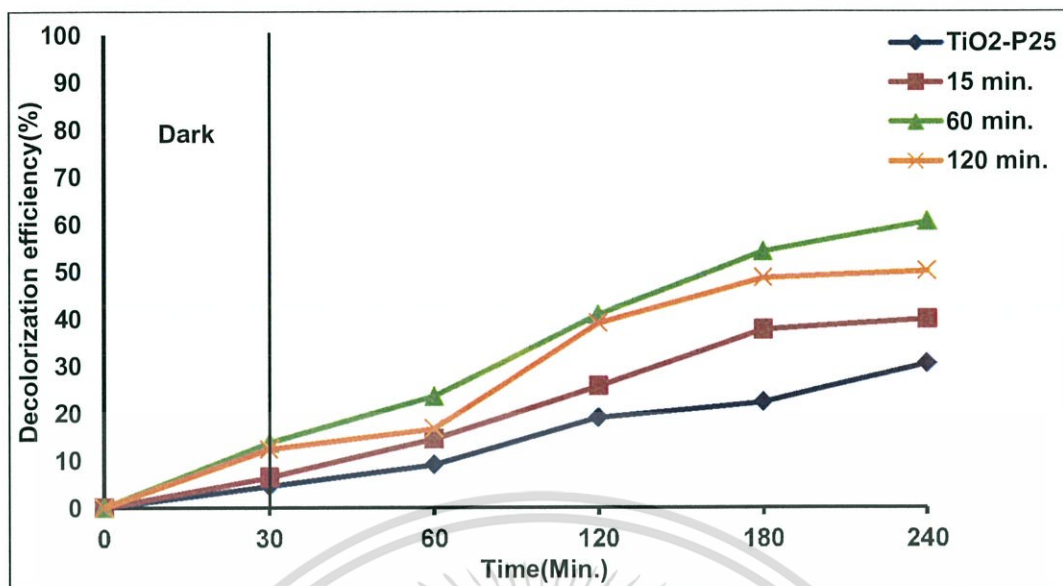
จากรูปที่ 4.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



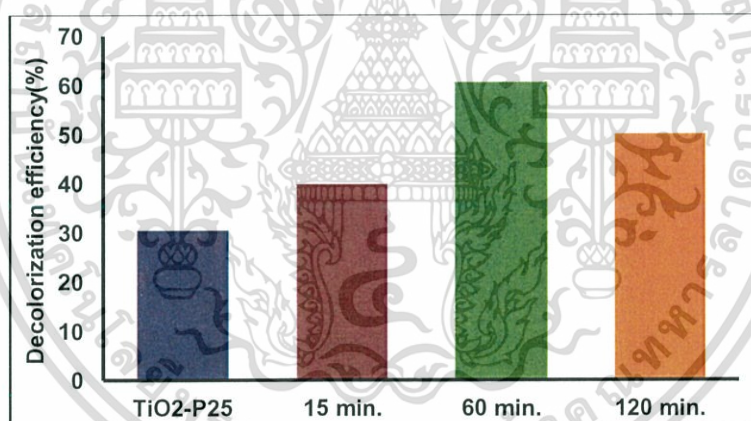
รูปที่ 4.26 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล ที่เวลา 240 นาที

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากรูปที่ 4.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือสารด้วยประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

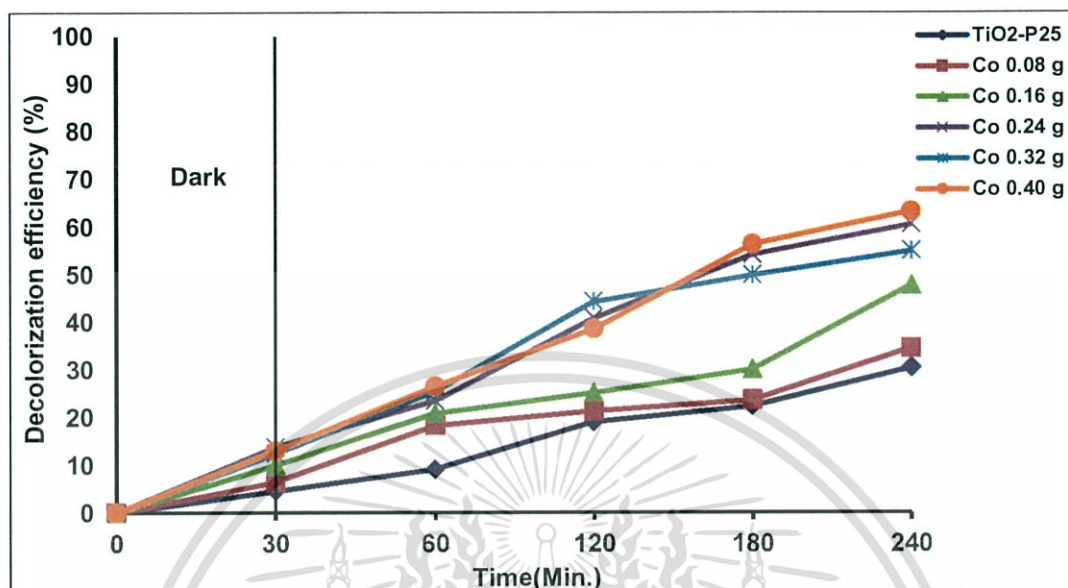


รูปที่ 4.28 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวนภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล ที่เวลา 240 นาที

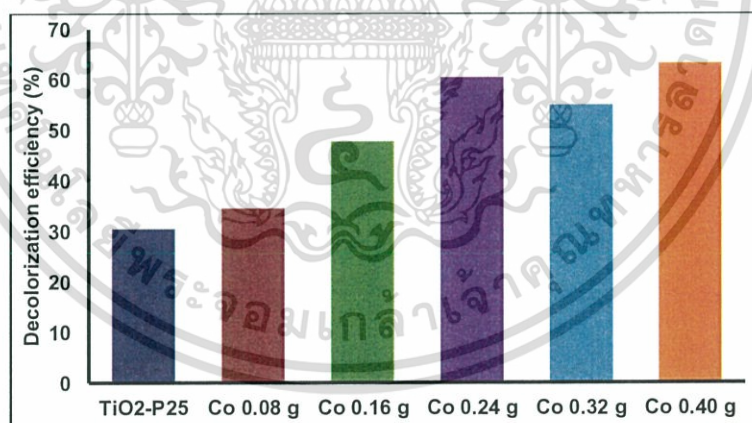
จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มีนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของเวลาในการปั่นกวน ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการปั่นกวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่จะเห็นได้ว่าที่เวลาในการปั่นกวน 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมลดลง อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณที่อิ่มตัวที่เวลา 60 นาที



จากรูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

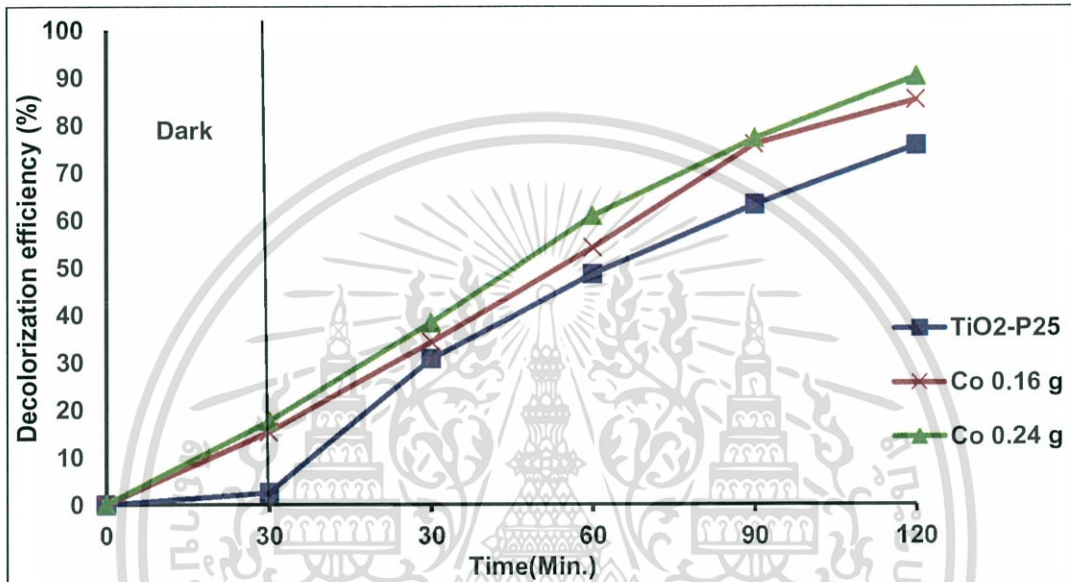


รูปที่ 4.30 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล ที่เวลา 240 นาที

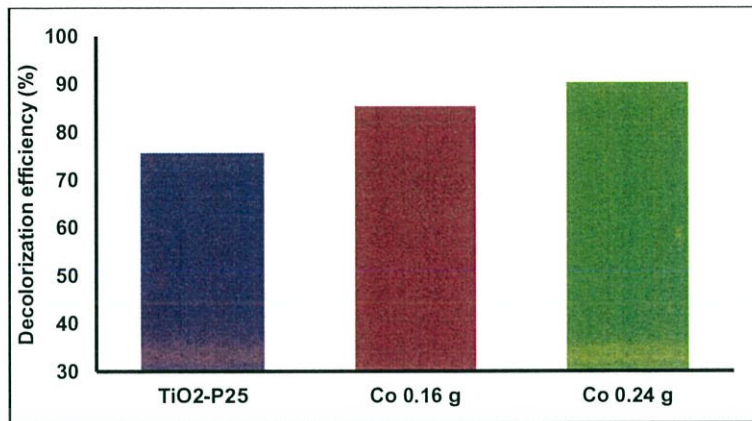
จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่จะสังเกตได้ว่าที่ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ 0.24 0.32 และ 0.40 กรัม จะมีประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสี้อมที่ใกล้เคียงกัน อาจเป็นผลมาจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณที่อิ่มตัว

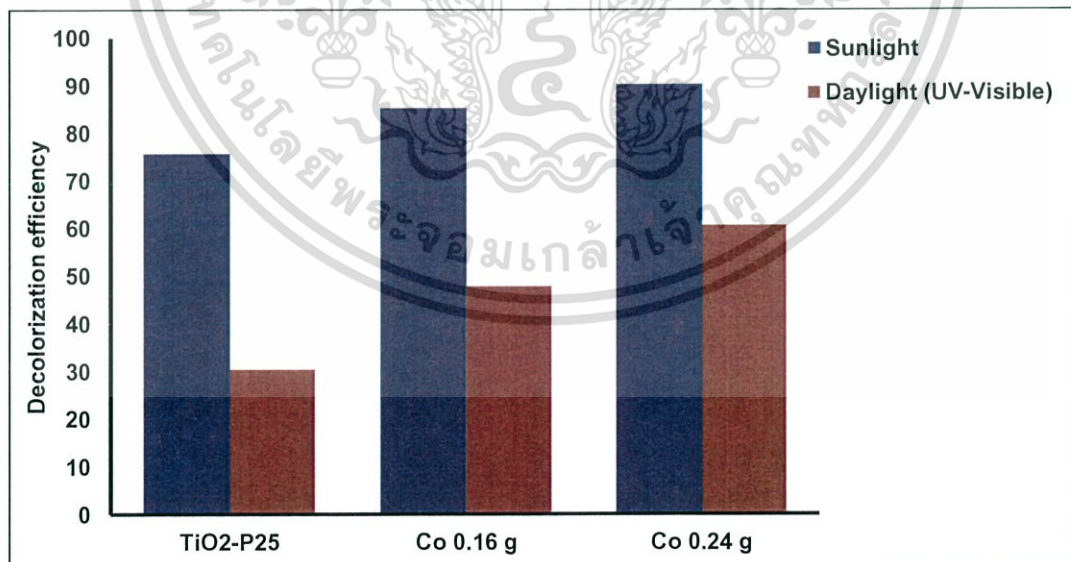


จากรูปที่ 4.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือภายใต้แสงอาทิตย์ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป



รูปที่ 4.32 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือ ภายใต้แสงอาทิตย์ ที่เวลา 120 นาที

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสี้อมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เจือเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ จะช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 4.33 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้แสงอาทิตย์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วย

สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่เวลา 120 นาที

จากรูปที่ 4.33 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้แสงอาทิตย์ที่เวลา 120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้แสงยูวี-วีลึบิลมาก เนื่องจากแสงอาทิตย์มีความเข้มของแสงมากกว่าแสงยูวี-วีลึบิล ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้เร็วกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยศึกษาอิทธิพลที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม โดยแบ่งเป็น 3 อิทธิพลคือ ค่าพีเอชที่ 8 9 และ 11 เวลาการป่นกวนที่ 15 60 และ 120 นาที และปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ที่ 0.08 0.16 0.24 0.32 และ 0.40 กรัม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกับลักษณะสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มากนัก ยังคงเห็นเป็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่แต่อนุภาคมีการเกาะกันแน่นขึ้น
2. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ เนื่องจากเจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงไปในปริมาณที่น้อยมาก
3. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากเจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงไปในปริมาณที่น้อยมาก
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DRS พบว่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชและเวลาในการป่นกวนมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แถบพลังงานแคบลง ซึ่งการที่แถบพลังงานแคบลงนั้นจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ สามารถตอบสนองต่อช่วงแสงวิสิเบิลได้
5. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PL พบว่าความเข้มของพีคช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-800 นาโนเมตร (เป็นช่วงที่เกิดจากความบกพร่องในโครงสร้าง Ti-O ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล) ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลของค่าพีเอชและเวลาในการป่นกวนลดลงจากพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เป็นผลมาจากการเจือสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ลงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสารพวกนี้จะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) แทน เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าปกติจะมีโอกาสรวมตัวกันกับโฮล แต่อาจจะส่งอิเล็กตรอนไปที่สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ แทน ทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนรวมตัวกันกับโฮลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-VIS พบว่า
 - 6.1 ในตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในการดูดซับสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ เพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ มาเกาะจะมีประจุเป็นบวก ดังนั้นสีย้อมอินดิโกคาร์มินซึ่งเป็นสีย้อมชนิดแอนไอออน (ประจุเป็นลบ) จะเกาะบนพื้นผิวได้ดี
 - 6.2 ภายใต้แสงยูวีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ ลดลงจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ยึดเกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยับยั้งการดูดกลืนแสงยูวีในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
 - 6.3 ภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิลประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ เพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
 - 6.4 ภายใต้แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้อิทธิพลต่างๆ เพิ่มขึ้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ช่วยสนับสนุนการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
7. ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายสีย้อมอินดิโกคาร์มินของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ภายใต้แสงอาทิตย์ดีกว่าภายใต้แสงยูวี-วิสิเบิลเนื่องจากแสงอาทิตย์มีความเข้มของแสงมากกว่าแสงยูวี-วิสิเบิล ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้เร็วกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ควรศึกษาวิธีการกำจัดออก
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดสารละลายสีย้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติก
3. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์ (III)คลอไรด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
4. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นผงขนาดเล็ก เป็นสารพิษ และอันตราย ควรสวมถุงมือและผ้าปิดจมูกทุกครั้งเพื่อป้องกันอันตราย
5. ศึกษา พิสูจน์คุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการทดลองบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียเช่น สารแขวนลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lei et al. 2014. "Preparation and characterization of Ag-doped TiO₂ nanomaterials and their photocatalytic reduction of Cr(VI) under visible light." *Applied Surface Science*. 321(2014) : 396-403
- [2] Chaval et al. 2014. "Curcumin-sensitized TiO₂ for enhanced photodegradation of dyes under visible light." *Springer Science and Business Media Dordrecht*. 2014(10) : 1-21
- [3] ธรรมบุญ ศรีทวงค์. 2007. ไทเทเนียม : ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม. [online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>
- [4] Joe Smyth. ม.ป.ป. Mineral structure. [online]. Available : <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>
- [5] สยามเคมี. ม.ป.ป. ไทเทเนียมไดออกไซด์. [online]. Available : <http://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์>
- [6] Jim Clark. 2010. Progress of reaction. [online]. Available : <http://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/energyprofiles.html>
- [7] Kotz, Treichel and Weaver. 2015. สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. [online]. Available : <http://ritchem.blogspot.com>
- [8] _____. ม.ป.ป. องค์ประกอบของรังสียูวี. [online]. Available : <http://www.siamchemi.com>
- [9] ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2005. กระบวนการโฟโตคะตะไลติก. [online]. Available : <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>
- [10] Taketoshi Murakami. 2010. Principles of oxidative decomposition of photocatalyst. [online]. Available : https://sangakukan.jp/journal/journal_contents/2010/06/articles
- [11] _____. 2005. Photocatalysis. [online]. Available : <http://dev.nsta.org/ewwebs/1952/photocatalysis.htm>
- [12] Hoffman et al. 1995. Semiconductor Photocatalysis. [online]. Available : <http://www.chiangmai.ac.th/emac/journal>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] _____. ม.ป.ป. เคมีโคออร์ดิเนชัน. [online]. Available :
www.udru.ac.th/website/attachments/elearning/03/05.pdf
- [14] Jiranda et al. 2013. Preparation Characterization and Photocatalyst properties of TiO₂ – Graphite composite rubber sheets.
- [15] Yikrazuul. 2009. Indigo carmine. [online]. Available :
https://en.wikipedia.org/wiki/Indigo_carmine#/media/File:Indigo_carmine.svg
- [16] Supat et al. 2015. “Removal of dyes by photocatalytically active curcumin-sensitized amorphous TiO₂ under visible light irradiation.” *J Sol-Gel Sci Technol.* (2015) : 152-163
- [17] Nada et al. 2015. “Preparation of Chloro Penta Amine Cobalt(III) Chloride and Study of Its Influence on the Structural and Some Optical Properties of Polyvinyl Acetate.” *International Journal of Polymer Science.* (2015) : 1-8
- [18] Schlessinger et al. 1976. “Inorganic Synthesis.” 9(1967) : 160-163.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

การเตรียมความเข้มข้นของสีย้อม

สูตรโครงสร้างและมวลโมเลกุล

อินดิโกคาร์มีน ($\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$)

มวลโมเลกุล 466.36

สีย้อมอินดิโกคาร์มีน

จาก ความเข้มข้นของสารละลาย = $\frac{\text{ปริมาณตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาณตัวทำละลาย}}$

ต้องการเตรียมที่ความเข้มข้น 5×10^{-5} โมล ต่อ ลิตร

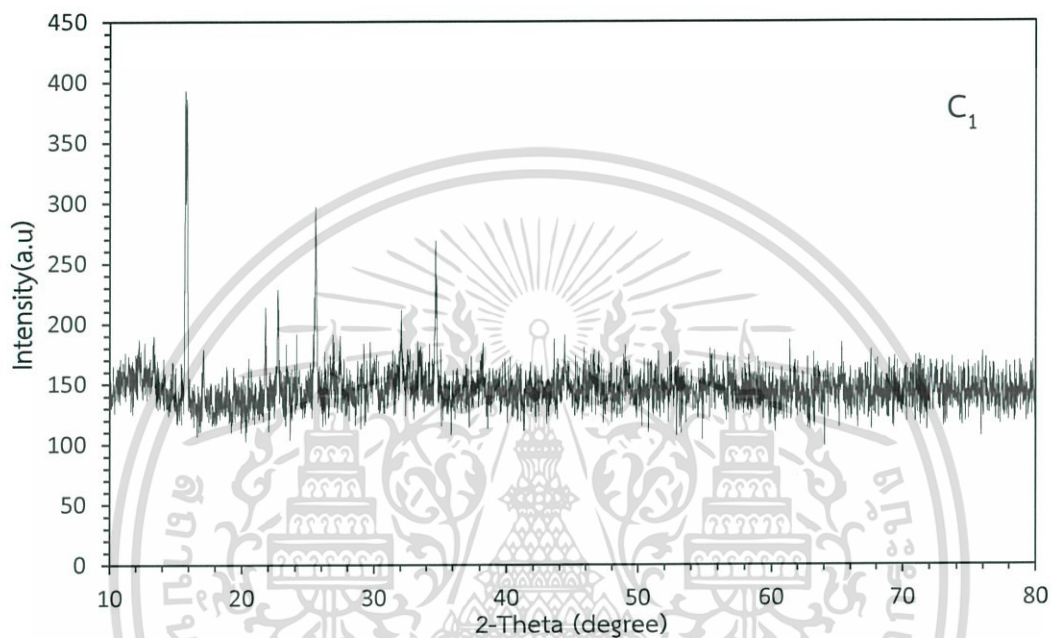
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } C_c &= \frac{g}{M_w \times V} \\ 5 \times 10^{-5} &= \frac{g}{466.36 \times 1} \\ g &= 0.0233 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น เตรียมความเข้มข้นของสีย้อมอินดิโกคาร์มีนที่ความเข้มข้น 5×10^{-5} โมล ต่อ ลิตรจะต้องชั่งสีย้อม 0.0233 กรัม

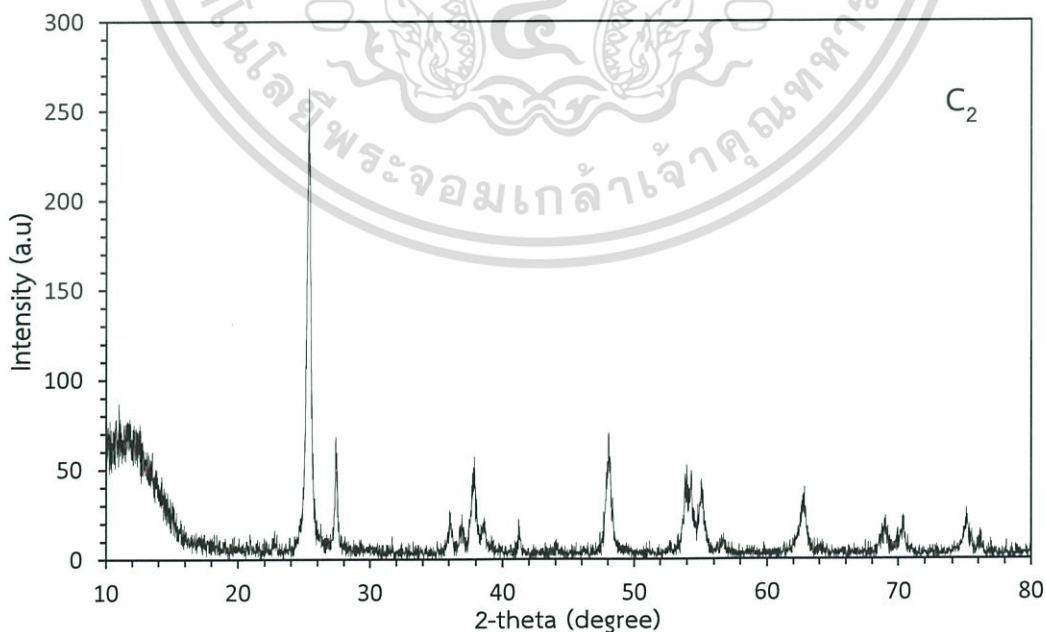
ภาคผนวก ข

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความว่องไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

1. X-ray Diffraction (XRD)

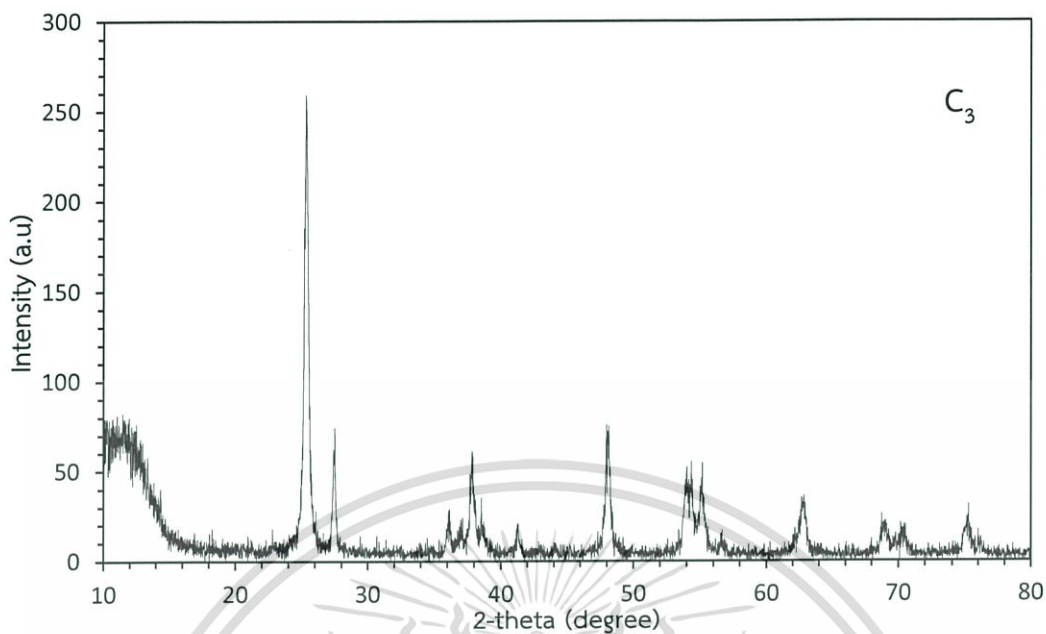


รูปที่ ข-1 รูปแบบ XRD ของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์

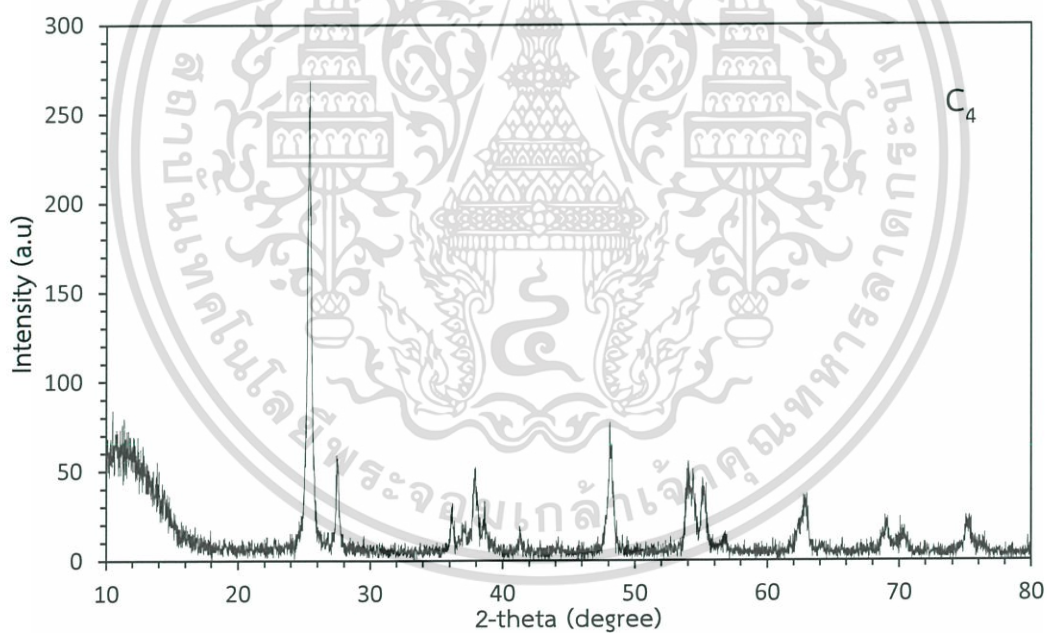


รูปที่ ข-2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

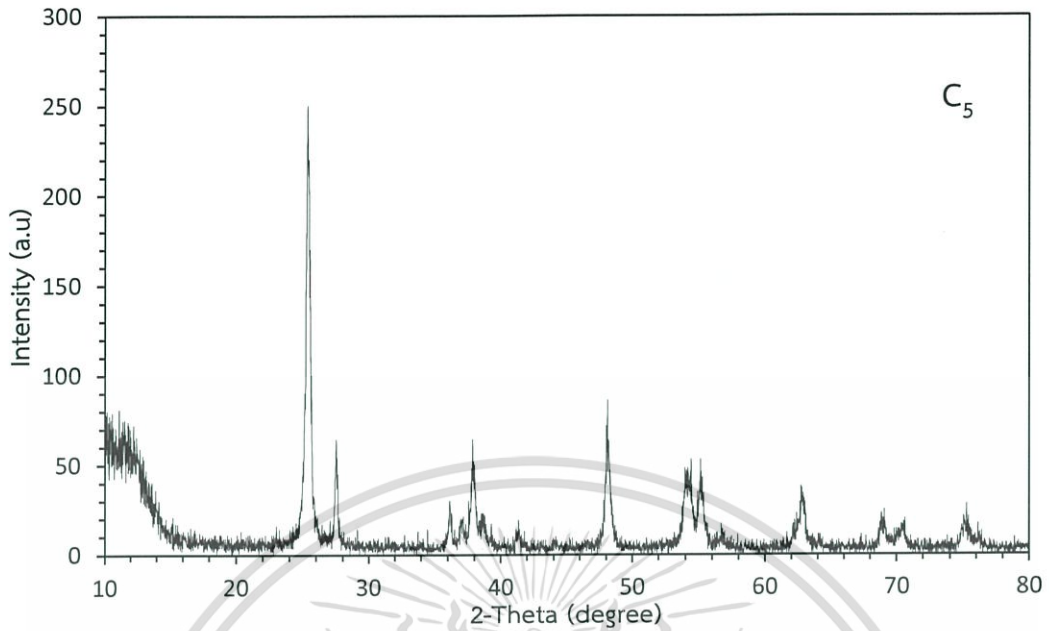


รูปที่ ข-3 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH9

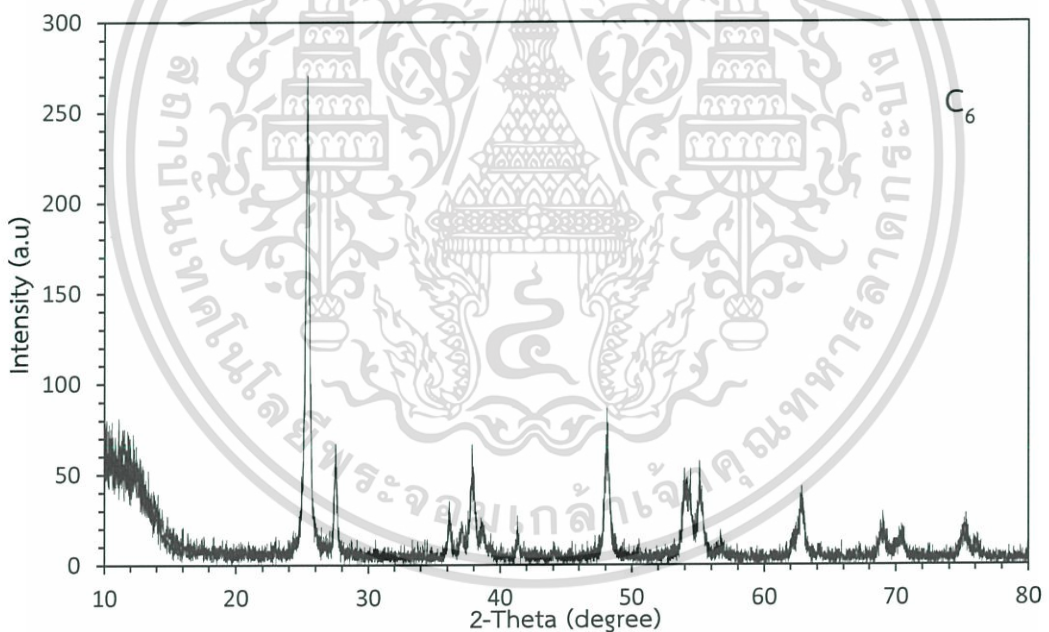


รูปที่ ข-4 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

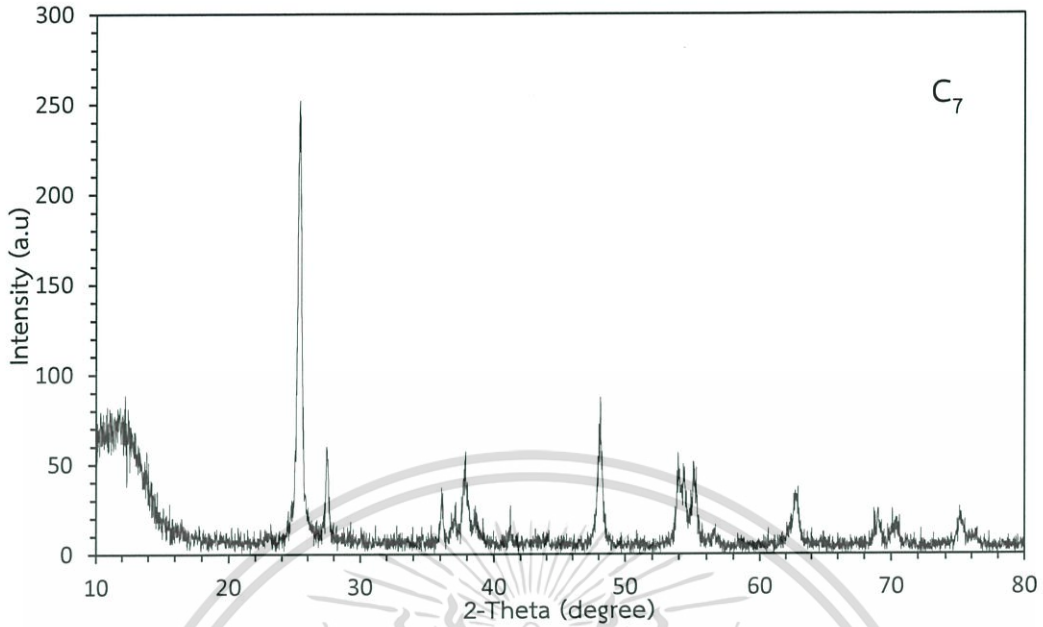


รูปที่ ข-5 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที

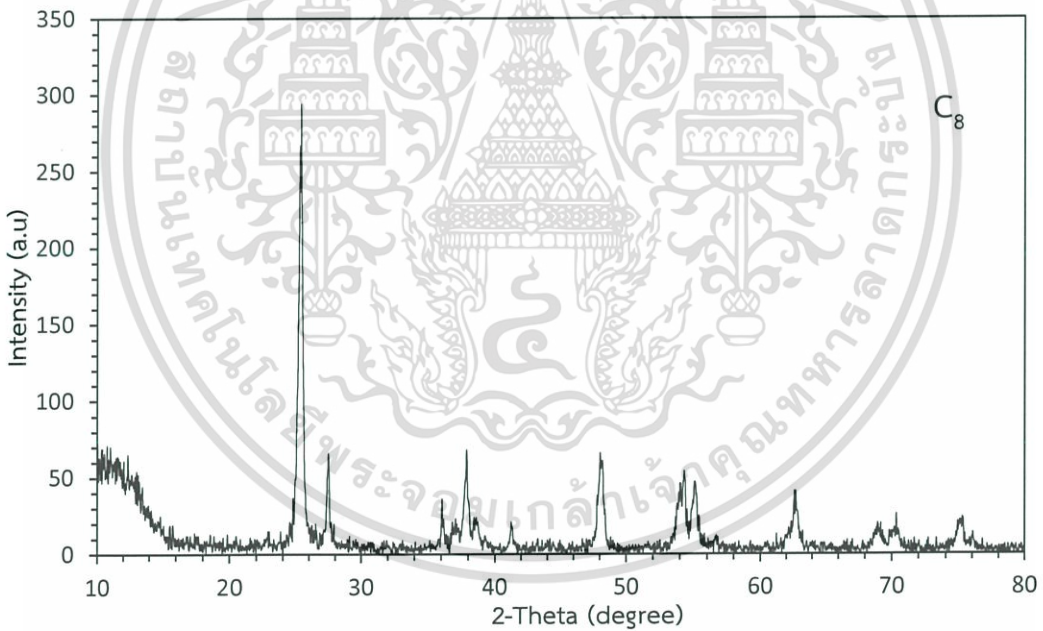


รูปที่ ข-6 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



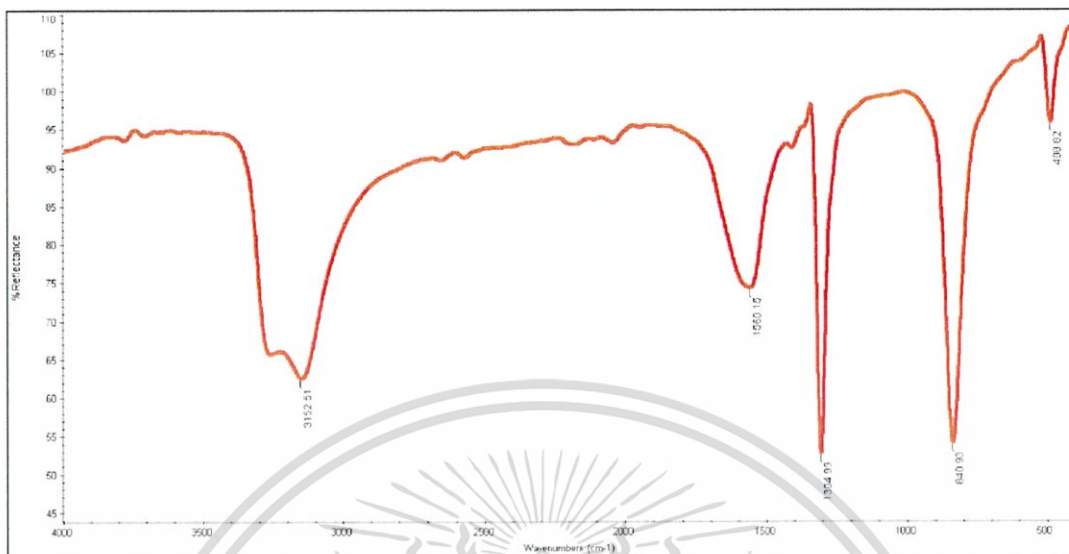
รูปที่ ข-7 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 120 นาที



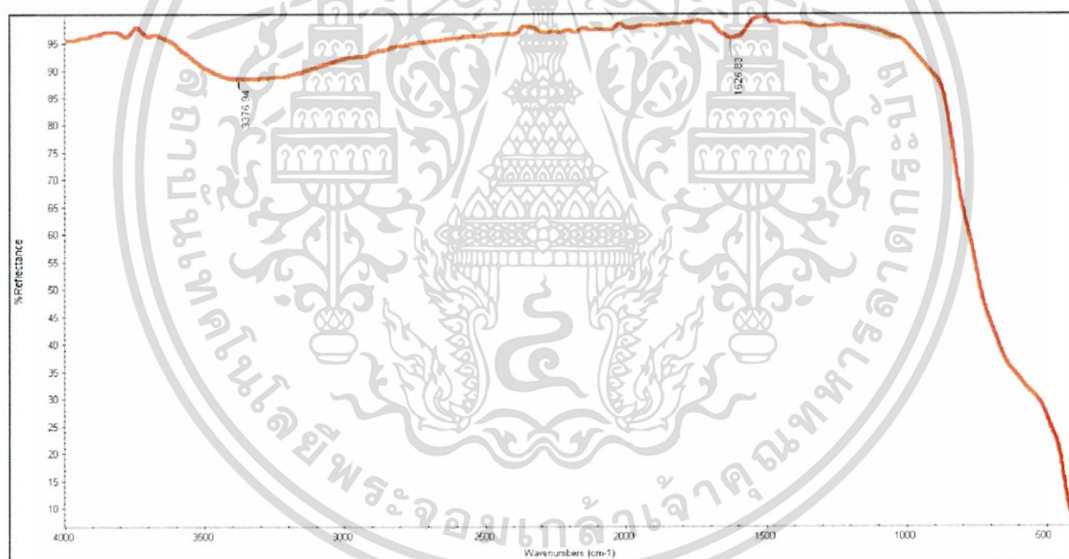
รูปที่ ข-8 รูปแบบ XRD ของไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

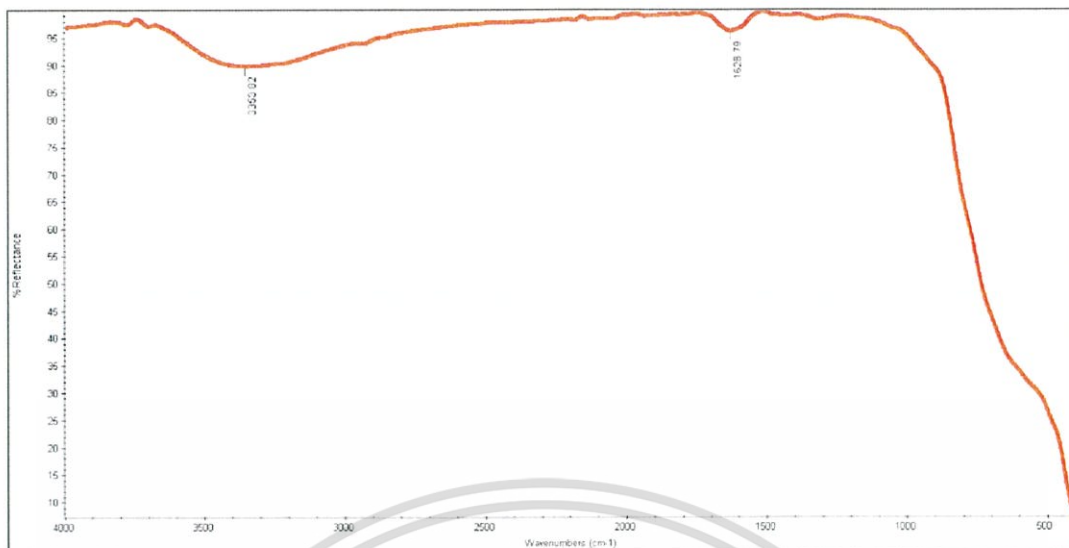


รูปที่ ข-9 FT-IR สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนโคบอลต์(III)คลอไรด์



รูปที่ ข-10 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

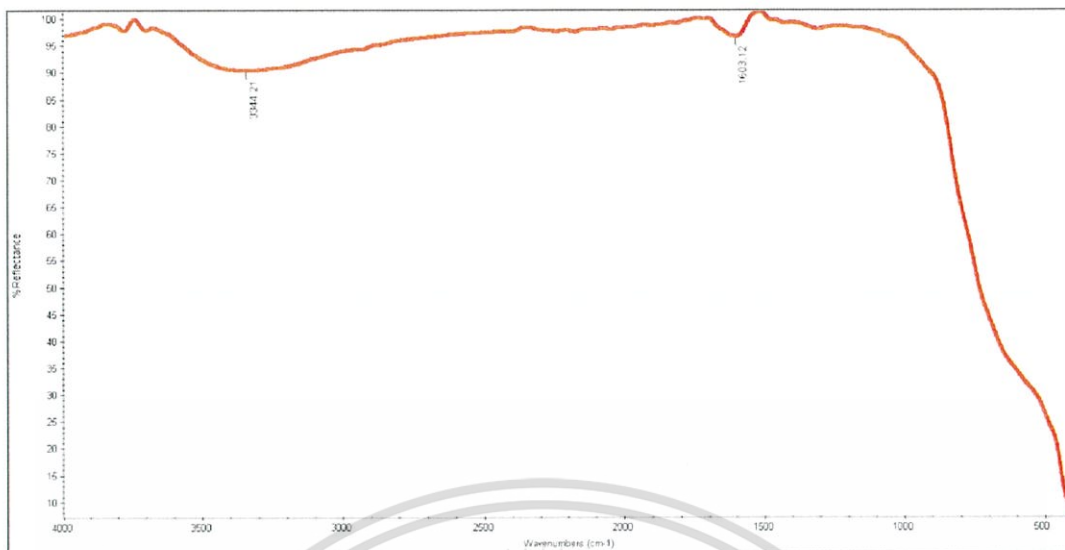


รูปที่ ข-11 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH9

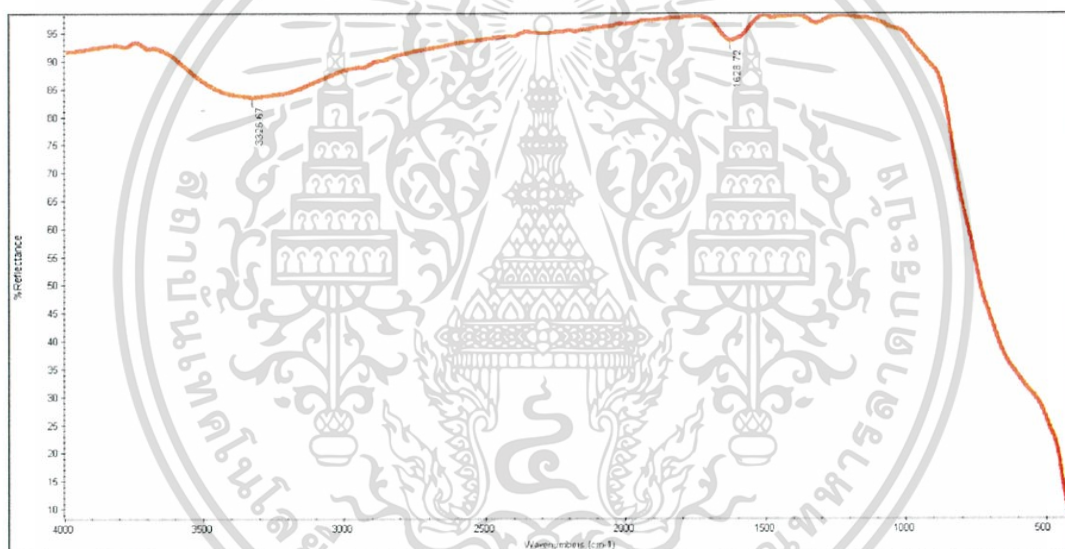


รูปที่ ข-12 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

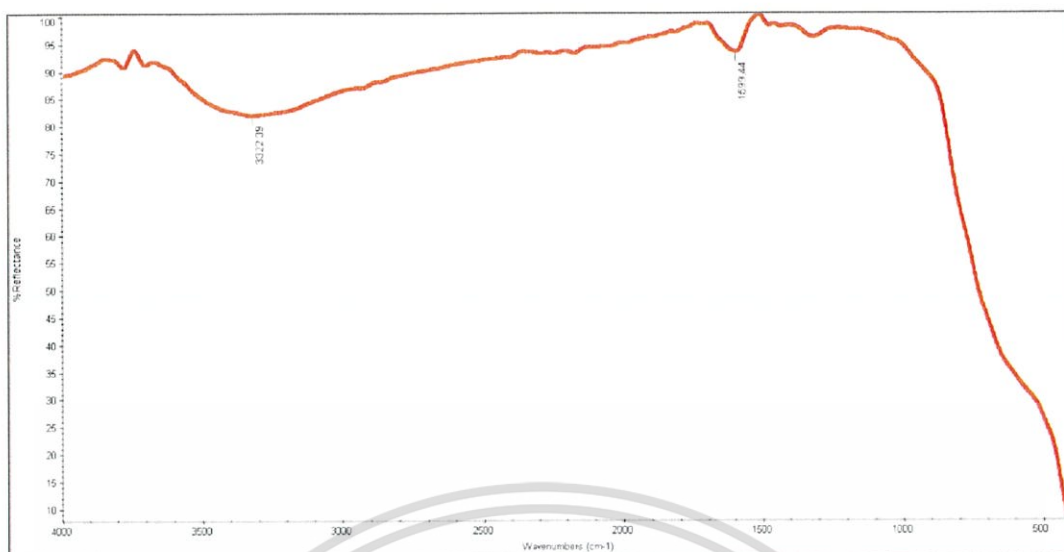


รูปที่ ข-13 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที

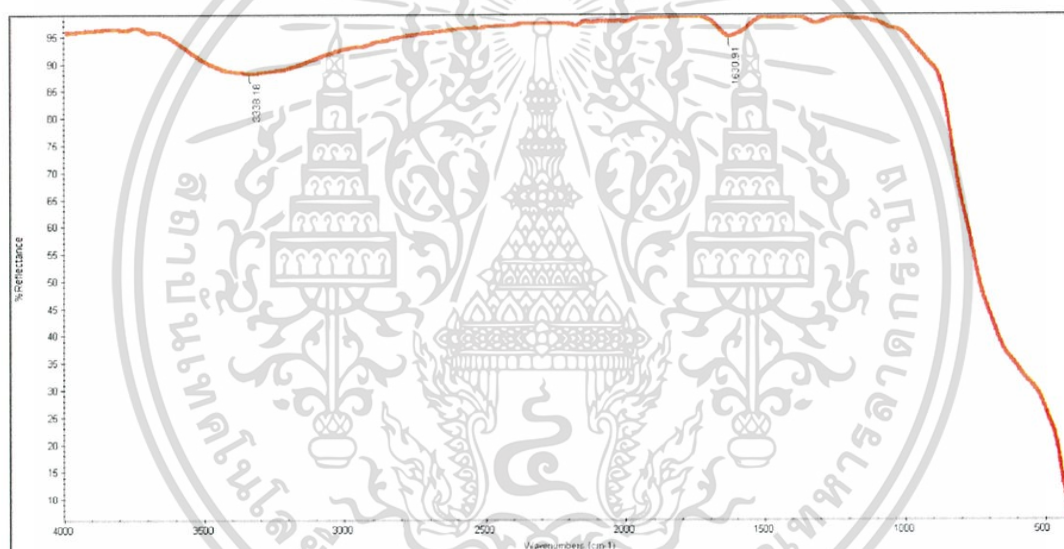


รูปที่ ข-14 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

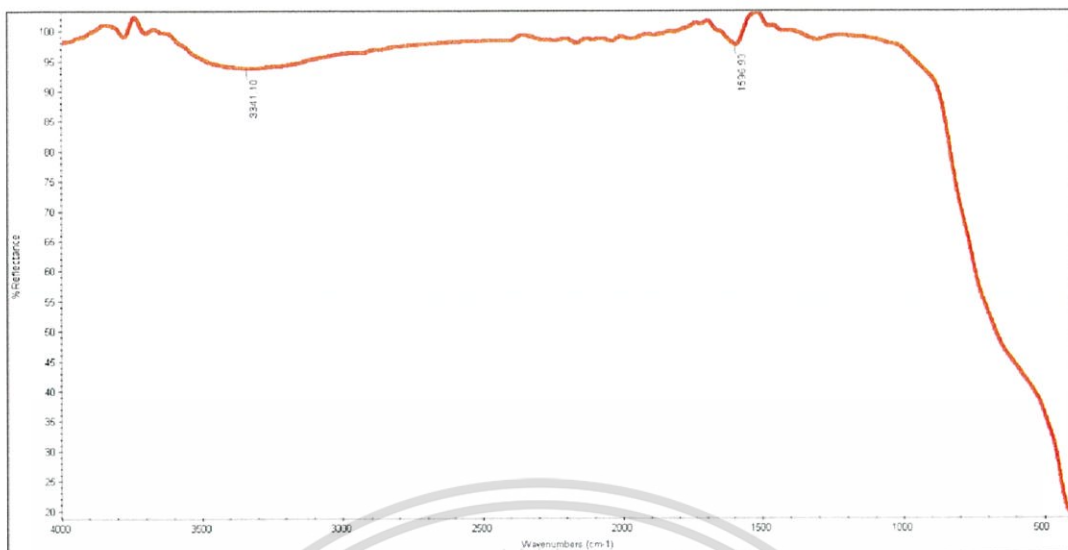


รูปที่ ข-15 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 120 นาที



รูปที่ ข-16 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 - ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.08 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

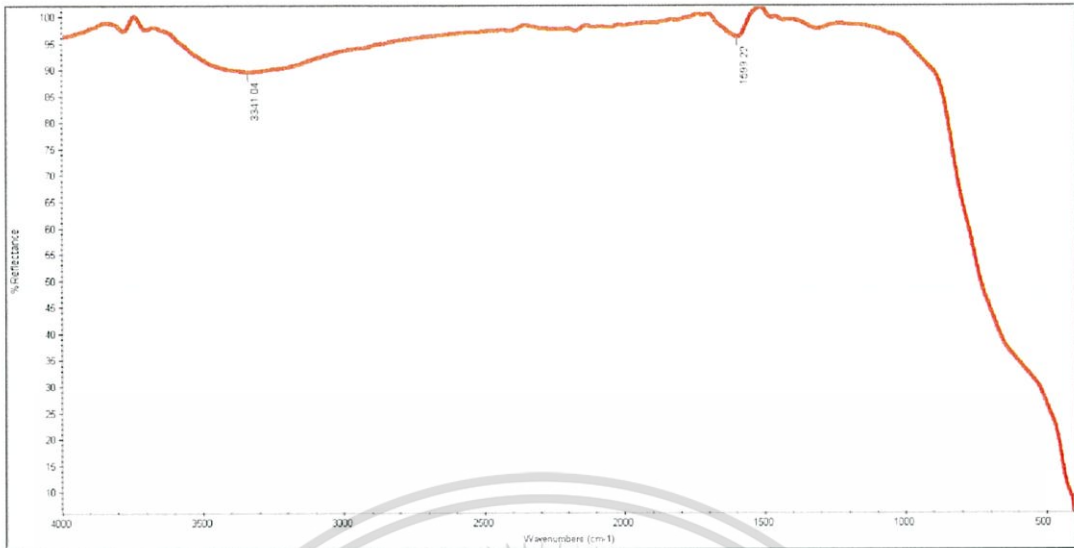


รูปที่ ข-17 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 - ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.16 กรัม



รูปที่ ข-18 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 - ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.24 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

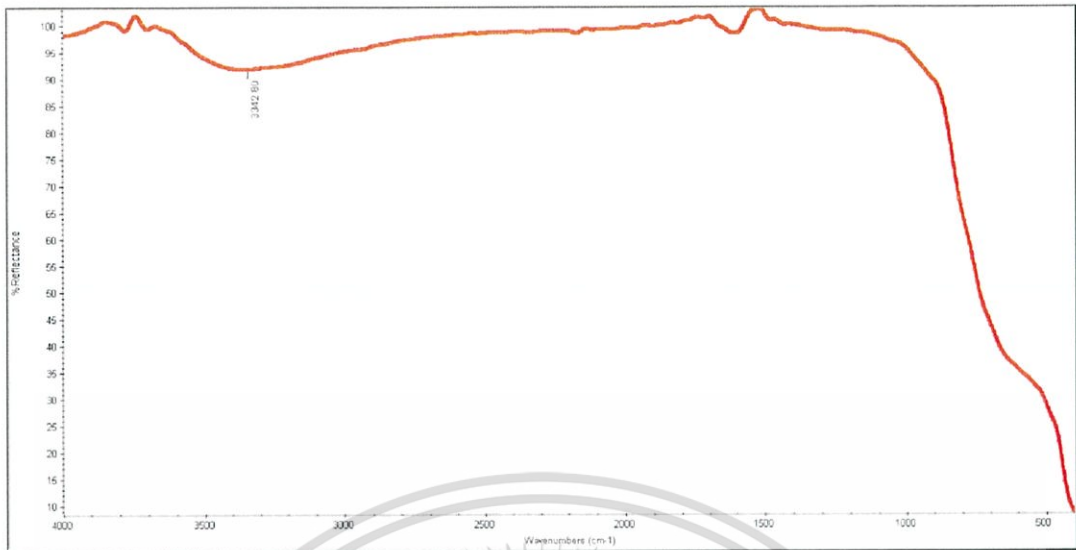


รูปที่ ข-19 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.32 กรัม



รูปที่ ข-20 FT-IR สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม TiO_2 – ปริมาณ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ 0.40 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

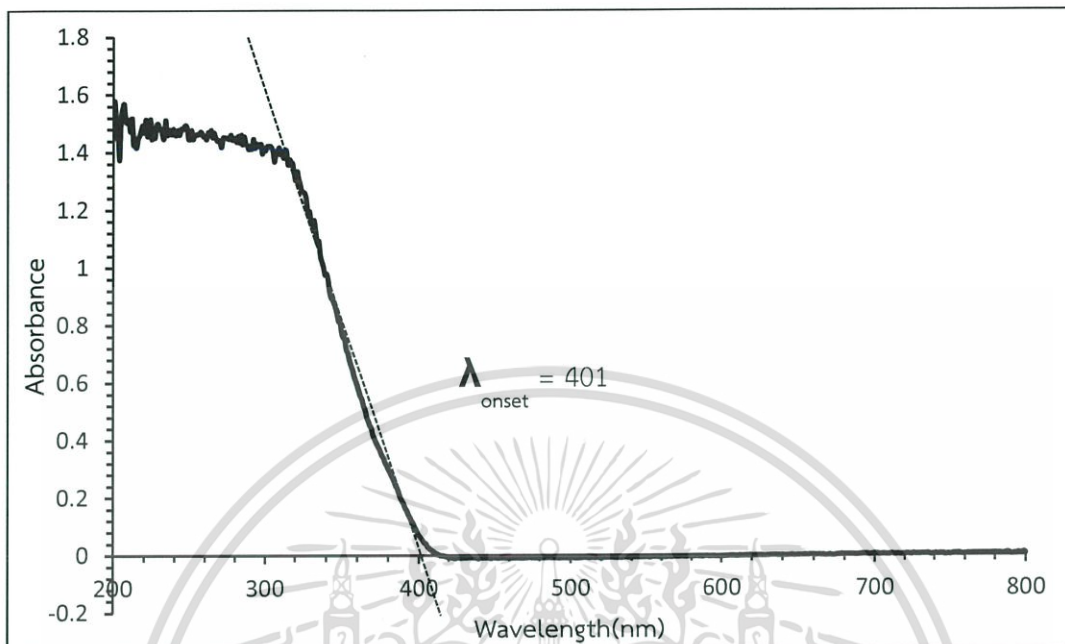


รูปที่ ข-21 FT-IR สเปกตรัมของโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

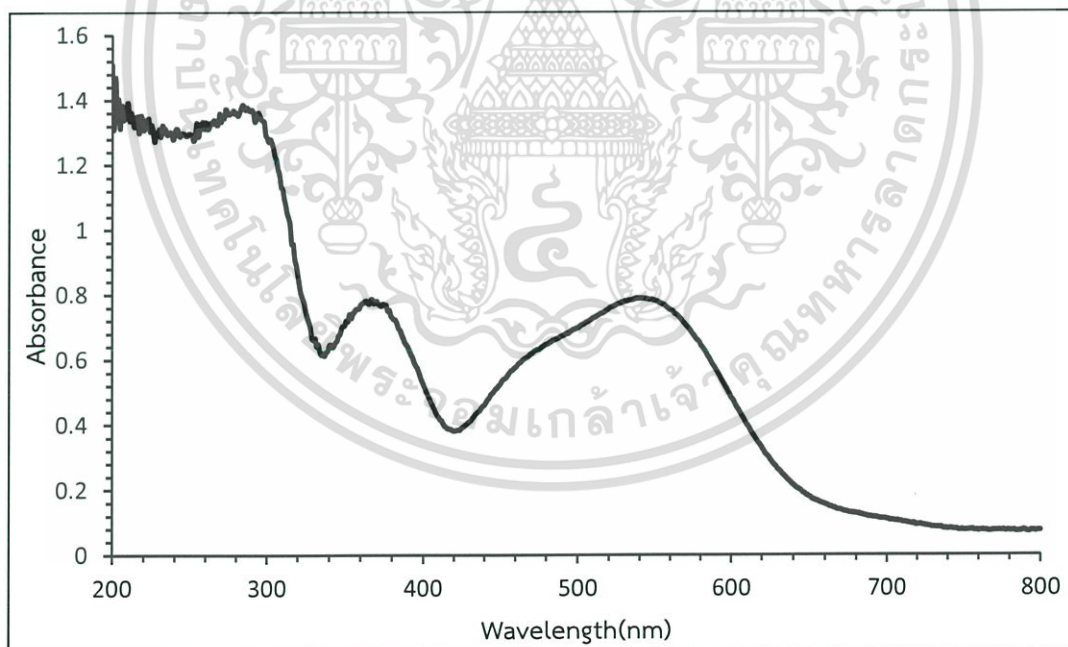


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. UV-Vis Diffused Reflectance Spectrometer (DRS)

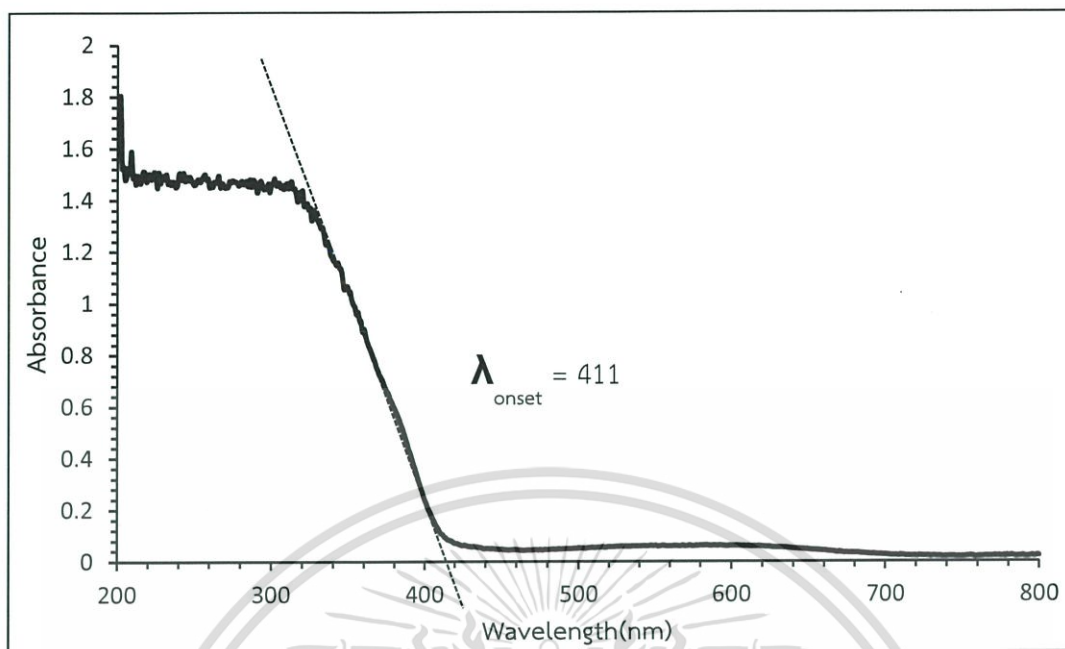


รูปที่ ข-22 DRS สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์

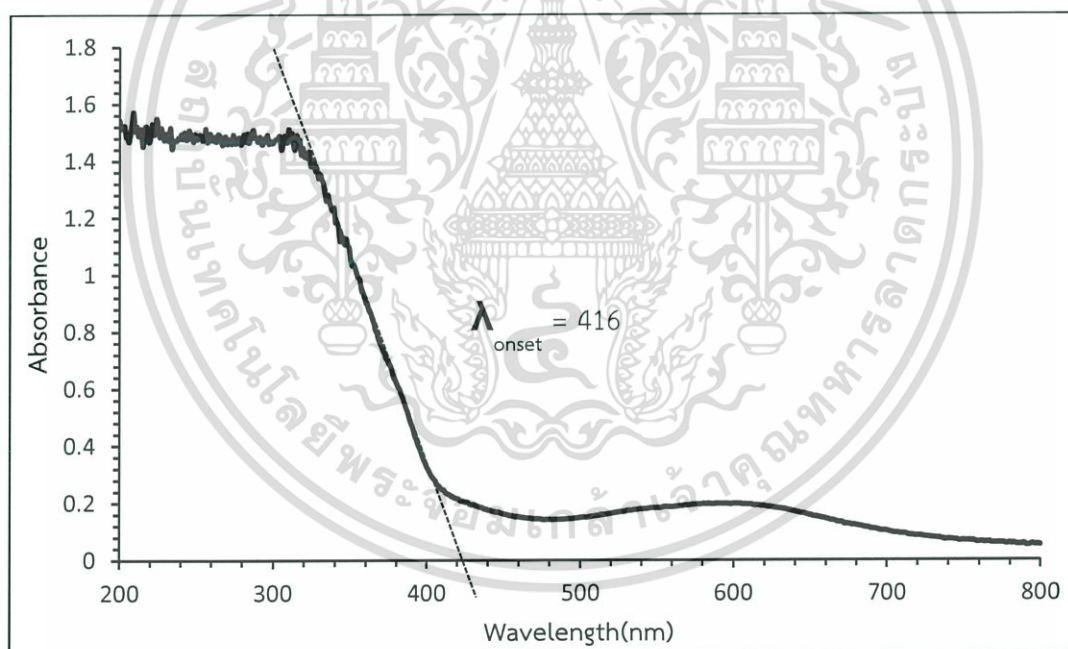


รูปที่ ข-23 DRS สเปกตรัมของสารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโรโคบอลต์(III)คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

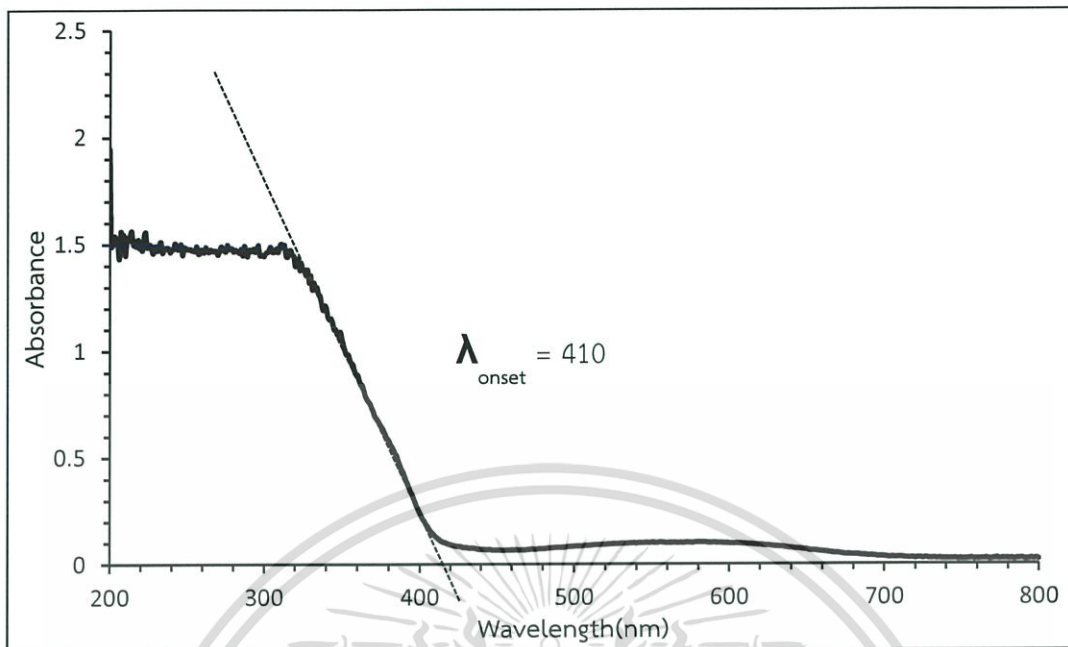


รูปที่ ข-24 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH8

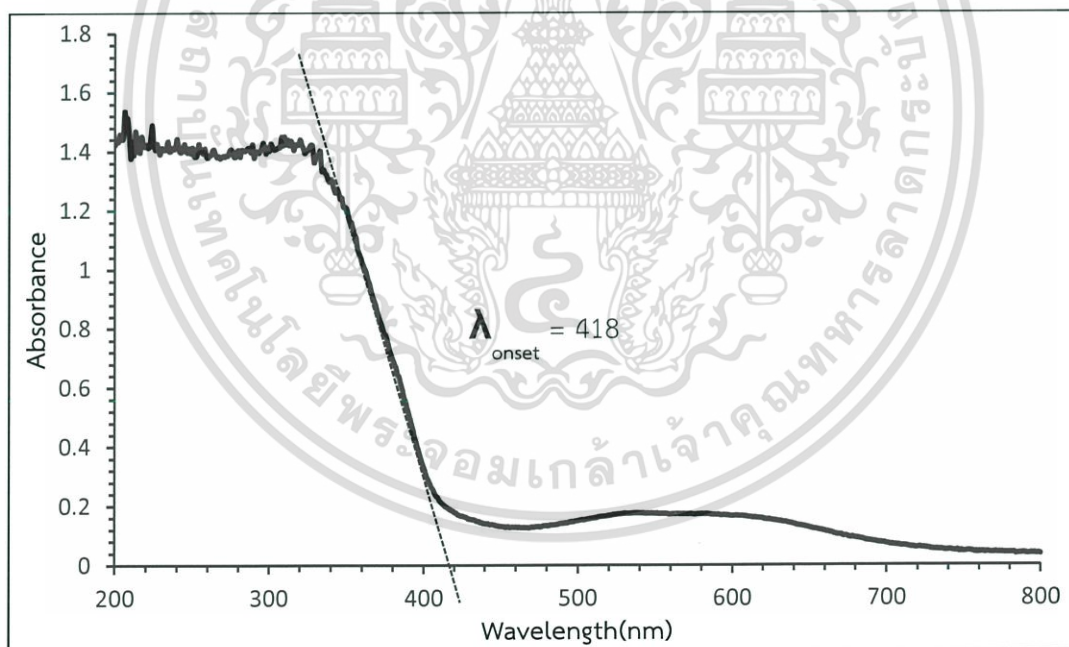


รูปที่ ข-25 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

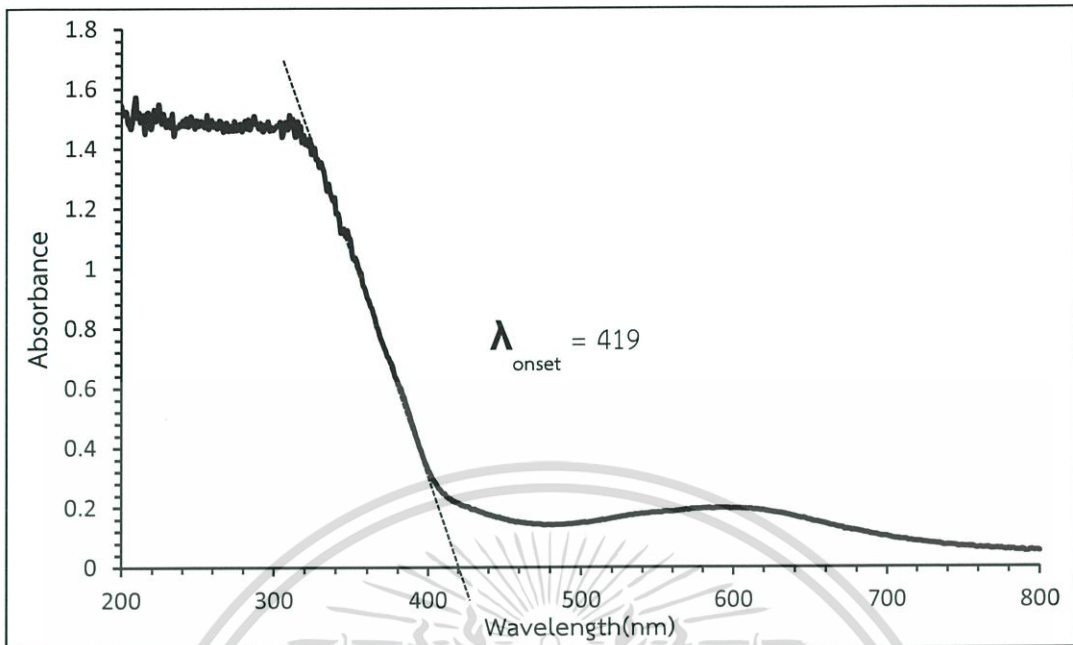


รูปที่ ข-26 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที



รูปที่ ข-27 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-28 DRS สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 120 นาที

นำค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนเริ่มต้น (λ_{onset}) ที่ได้จาก DRS สเปกตร้า ของแต่ละตัวมา
คำนวณเพื่อหาค่าแถบพลังงานจากสูตร

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} = \frac{1240}{401} = 3.09$$

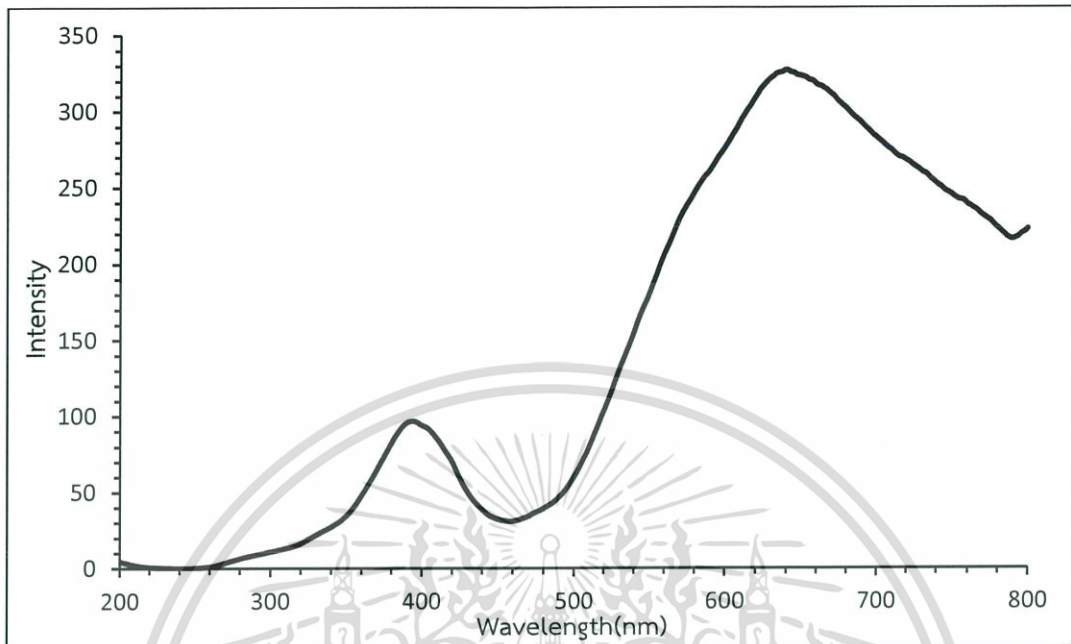
จะได้ค่าดังตาราง

ตารางที่ ข-1 ค่าแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ ที่ได้จาก
DRS สเปกตร้า ข้างต้น

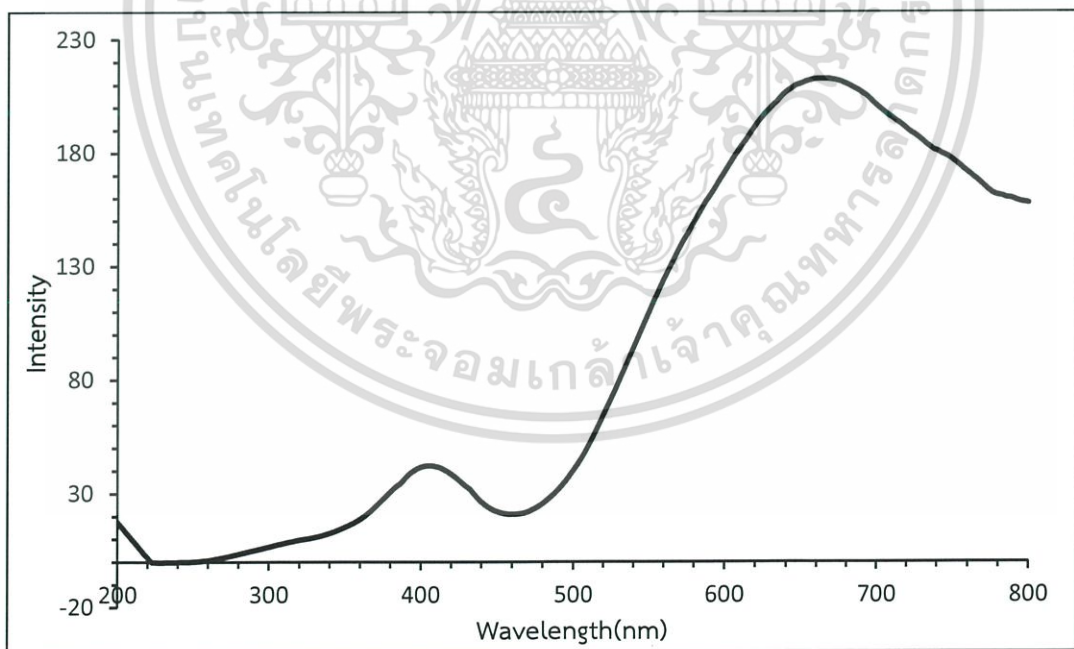
Sample	DRS	
	λ_{onset} (nm)	Band gap (eV.)
TiO_2 -P25	401	3.09
TiO_2 -Co-pH8	411	3.01
TiO_2 -Co-pH11	416	2.98
TiO_2 -Co-15min.	410	3.02
TiO_2 -Co-60min.	418	2.97
TiO_2 -Co-120min.	419	2.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Photoluminescence Spectrophotometer (PL)

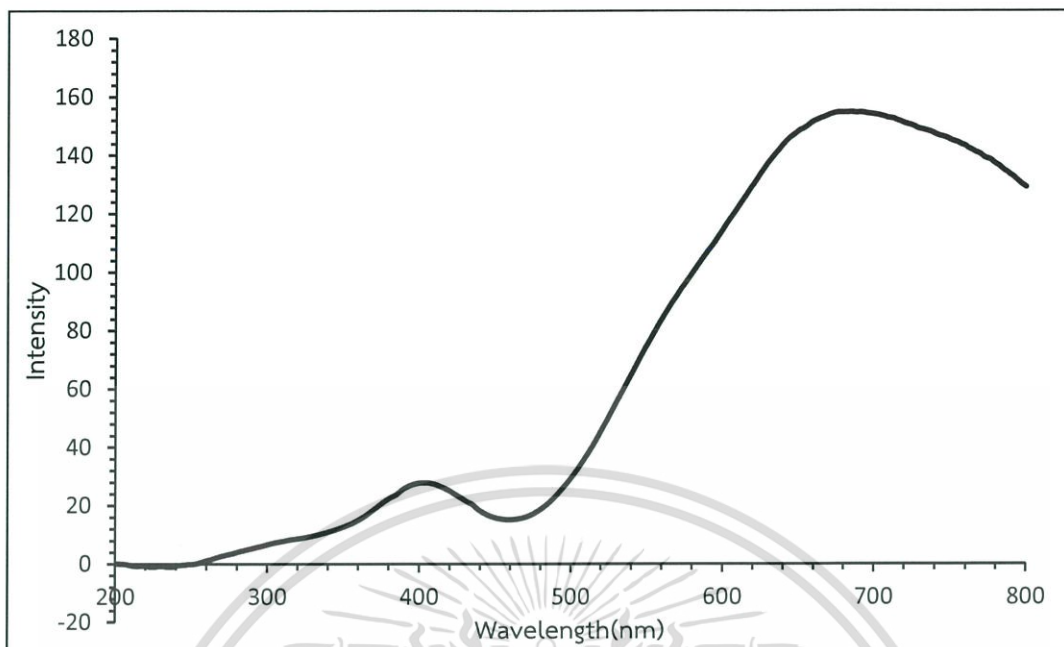


รูปที่ ๒-29 PL สเปกตรัมของไทเทเนียมไดออกไซด์

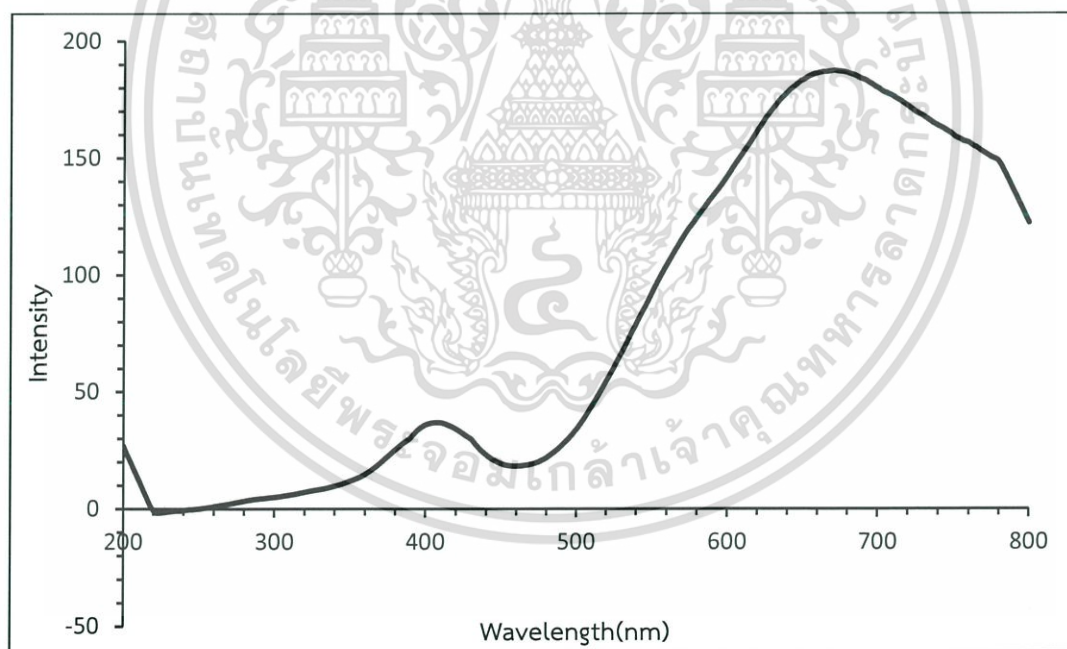


รูปที่ ๒-30 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2 - \text{pH}8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

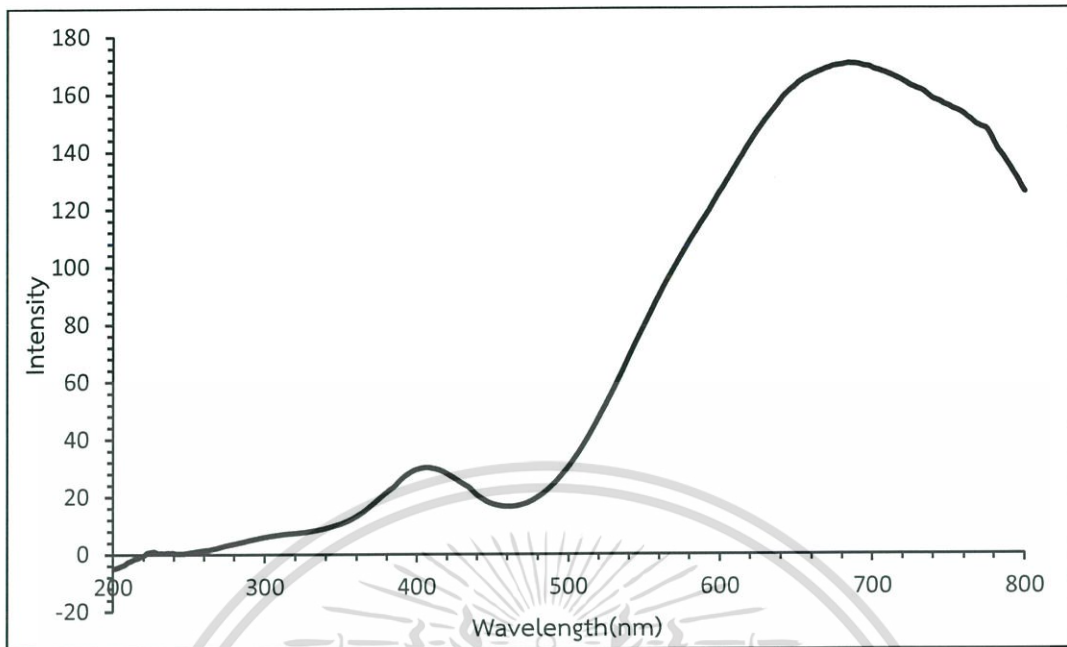


รูปที่ ข-31 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11



รูปที่ ข-32 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-33 PL สเปกตรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 120 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

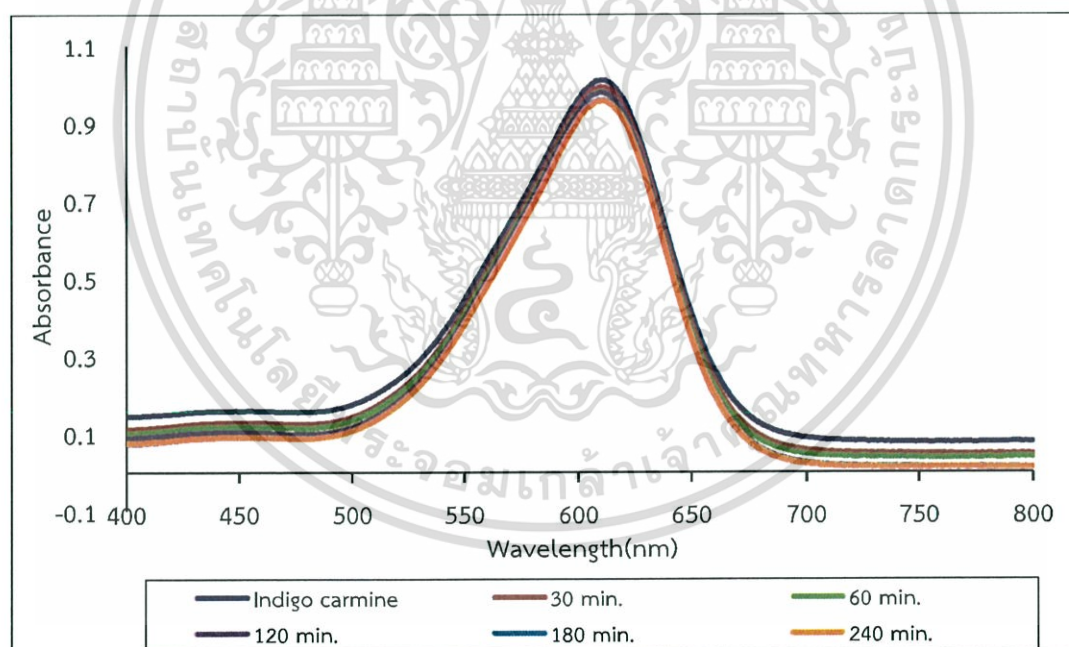
5. UV-visible Spectrophotometer

5.1 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มีนในตุ้มวัดเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ ข-2 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายอินดิโกคาร์มีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11 ในตุ้มวัด เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา(นาทื)	ค่าการดูดซับสี้อม(A)	%การดูดซับสี้อม
0	0.9790	0
30	0.9490	3.06
60	0.9370	4.29
120	0.9130	6.74
180	0.8830	9.80
240	0.8650	11.64

จากสูตร $\frac{A_o - A_t}{A_o} \times 100 = \% = \frac{0.9790 - 0.9490}{0.9790} \times 100 = 3.06 \%$



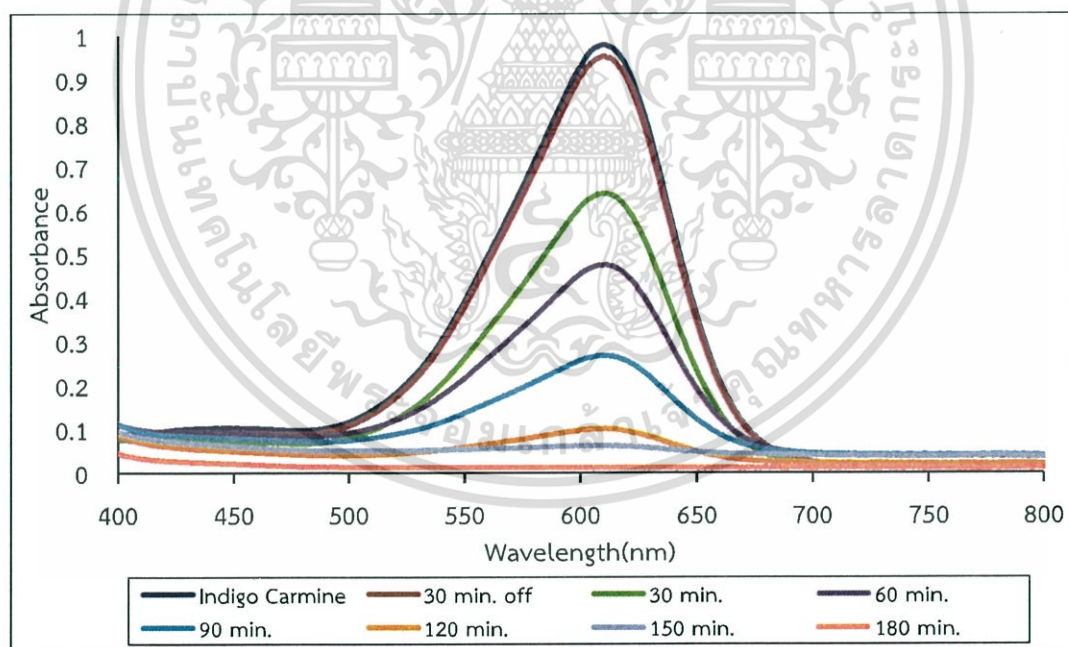
รูปที่ ข-34 ตัวอย่าง UV-Visible สเปกตราแสดงการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH11 ในตุ้มวัด เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

5.2 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงการกำจัดสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มินภายใต้แสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ตารางที่ ข-3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสี้อมอินดิโกคาร์มินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH8 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

เวลา(นาที)	ค่าการดูดซับสี้อม(A)	%การกำจัดสี้อม
0	0.9660	0
30 (ก่อนฉายแสง)	0.9311	3.61
30	0.7940	17.80
60	0.6441	33.32
90	0.2644	72.63
120	0.2422	74.93
150	0.1276	86.79
180	0.0533	94.48

จากสูตร $\frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 = \% = \frac{0.9660 - 0.9311}{0.9660} \times 100 = 3.61 \%$



รูปที่ ข-35 ตัวอย่าง UV-Visible สเปกตราแสดงการเปลี่ยนแปลงการดูดซับสารละลายสี้อมอินดิโกคาร์มิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH8 ภายใต้การฉายแสงยูวีเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

ภาคผนวก ค

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

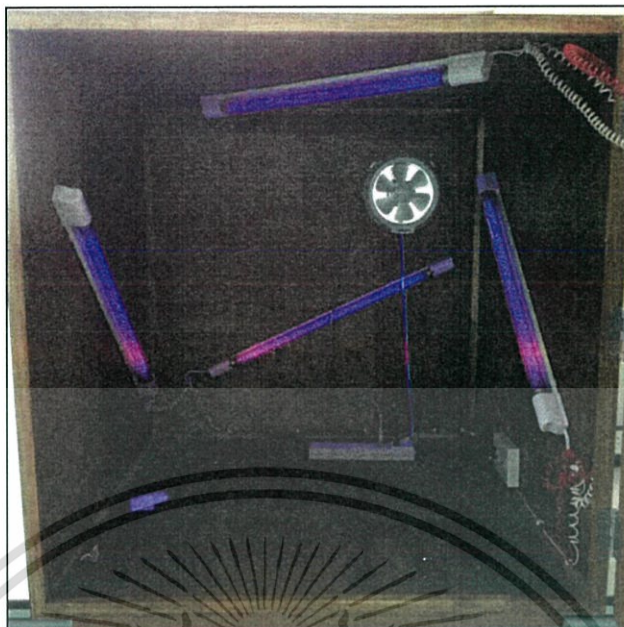
1. Photocatalyst apparatus



รูปที่ ค-1 ตู้มืด

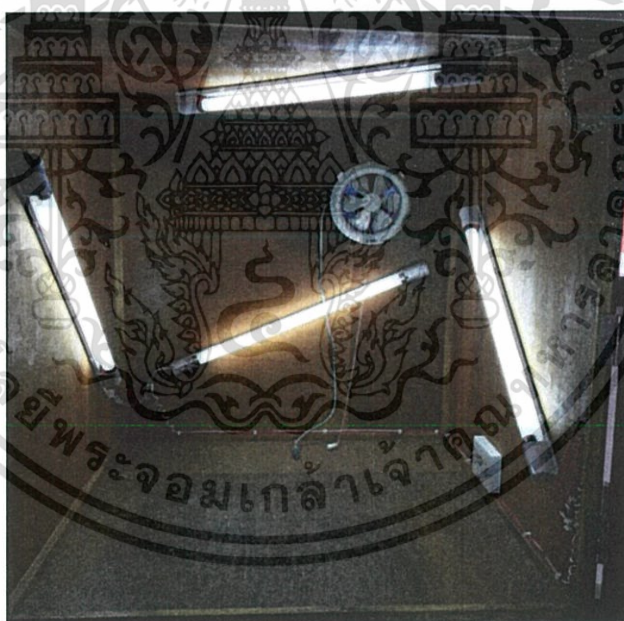
The wooden compartment 0.9 m x 0.9 x 0.9 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-2 ตู้ฉายแสงยูวี

The wooden compartment 0.9 m x 0.9 x 0.9 m



รูปที่ ค-3 ตู้ฉายแสงยูวี-วิสิเบิล (Fluorescent)

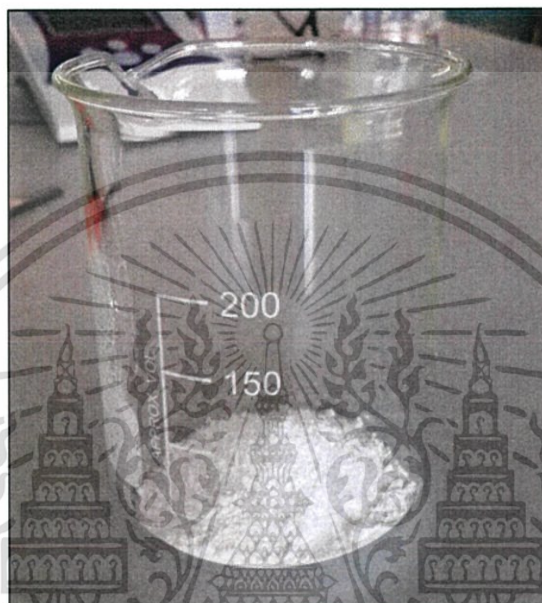
The wooden compartment 0.9 m x 0.9 x 0.9 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การเตรียม การพิสูจน์เอกลักษณ์และความไวต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$

1. ลักษณะของสารผสม

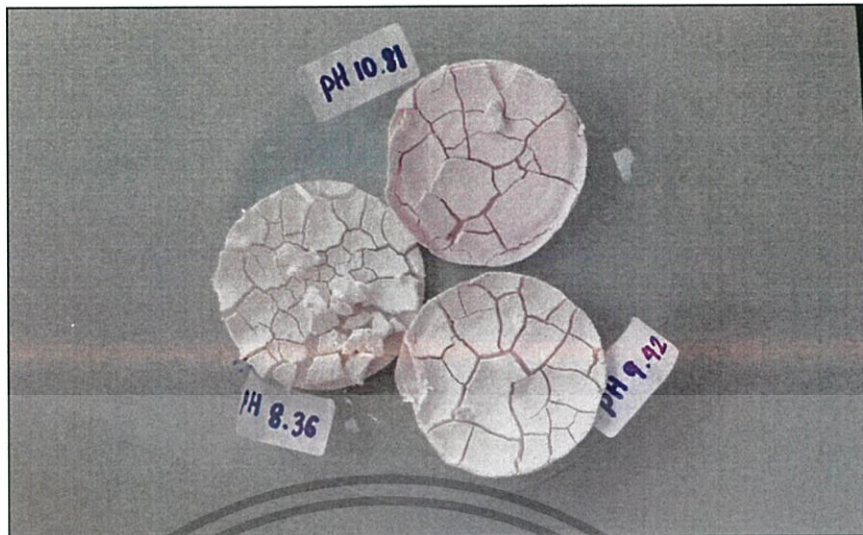


รูปที่ ง-1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Degussa P25)



รูปที่ ง-2 สารประกอบเชิงซ้อนเพนตะแอมมีนคลอโรโคบอลต์(III)คลอไรด์ ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

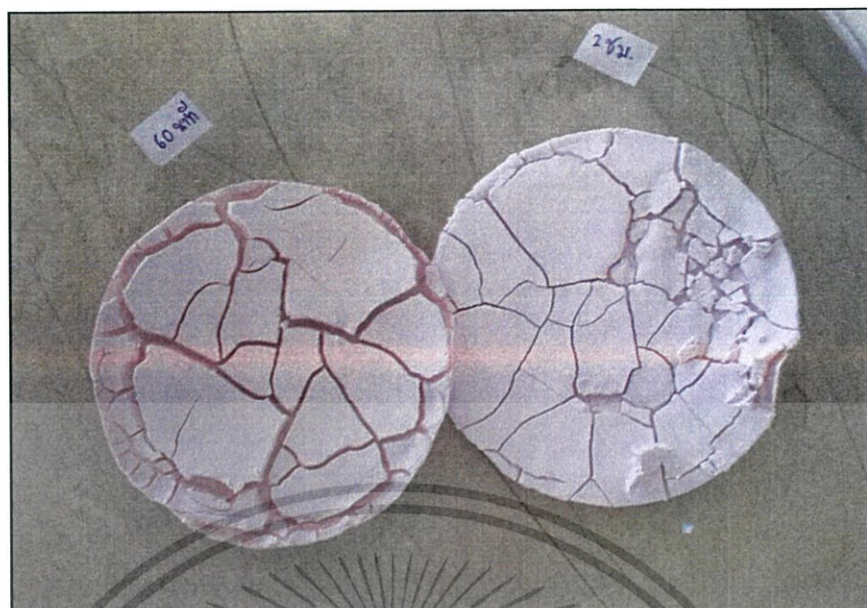


รูปที่ ง-3 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - pH 8 9 และ 11 บนแผ่นกระดาษกรอง

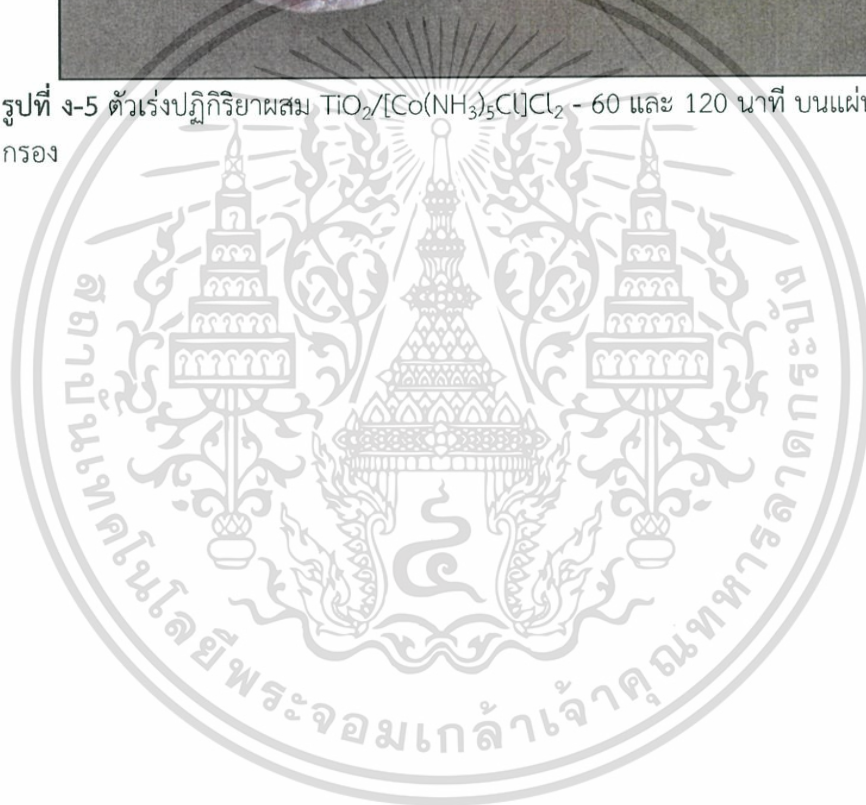


รูปที่ ง-4 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 15 นาที บนแผ่นกระดาษกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-5 ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม $\text{TiO}_2/[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}]\text{Cl}_2$ - 60 และ 120 นาที บนแผ่นกระจกกรอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้