

การตรึงอนุภาคนาโนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหลัก
บนเม็ดแก้วเพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบซีพีซี

IMMOBILIZATION OF TITANIUM DIOXIDE-BASED NANOPARTICLES
ON TO GLASS BEADS USED IN CPC PHOTOCATALYTIC REACTOR



ซารอฟี สุไลมาน
SAROFEE SULAIMAN

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMMOBILIZATION OF TITANIUM DIOXIDE–BASED NANOPARTICLES
ON TO GLASS BEADS USED IN CPC PHOTOCATALYTIC REACTOR



SAROFEE SULAIMAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF BACHELOR OF
ENGINEERING IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปี 2017 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การตรึงอนุภาคนาโนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหลักบนเม็ดแก้วเพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบซีพีซี

Special Project Title Immobilization of titanium dioxide-based nanoparticles on to glass beads used in CPC photocatalytic reactor

นักศึกษา นาย ชารอพี สุโสมาน

รหัสประจำตัว 57110012

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต




ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	
ดร.กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน	
ผศ.ดร.วณิชชา เมฆประสาท	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ภาควิชาฯ และนาโนเทคโนโลยี การค้า
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและวันที่... เดือน... พ.ศ. 2561

โครงการพิเศษเรื่อง

การตรึงอนุภาคนาโนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหลักบนเม็ดแก้วเพื่อใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบซีพีซี

นักศึกษา

ชารอฟี สุโลมาน

รหัสประจำตัว

57110012

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิชฌุ เพชรภา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการเตรียมวัสดุอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกรด พี-25 และลิวคูซีนซึ่งมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ผ่านการสกัดแล้ว แล้วนำไปผสมกับสารละลายไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับช่วยในการตรึงอนุภาคนาโนลงบนเม็ดแก้วด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ เม็ดแก้วที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนนี้ ได้นำไปศึกษาวิเคราะห์ลักษณะเชิงพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบหลักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) ศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) และศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค Diffuse reflectance spectroscopy หลังจากนั้นนำเม็ดแก้วที่เตรียมได้ดังกล่าวไปทดสอบการเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้แสงอาทิตย์ ซึ่งในการทดสอบนี้ได้นำไปบรรจุร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบซีพีซี (CPC photocatalytic reactor) ในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B) พบว่าอนุภาคนาโนสามารถตรึงลงบนพื้นผิวของเม็ดแก้วและเกาะติดได้ดีเมื่อใช้สารละลายไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์เป็นสารเชื่อมประสานและผลการตรวจวิเคราะห์พบว่าอนุภาคนาโนที่เคลือบบนเม็ดแก้วมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้และสามารถนำไปใช้ร่วมกับ เครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบซีพีซีได้

Special Project Title	Immobilization of titanium dioxide–based nanoparticles on to glass beads used in CPC photocatalytic reactor
Student	sarofee sulaiman
Student ID.	57110012
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

Abstract

In this work, P-25 Titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles and treated leucosene with main composition of TiO₂ was prepared and mixed with titanium tetraisopropoxide (TTIP) solution used as binding precursor to immobilize the prepared particles onto the glass beads via dip coating process. The surface morphology and major element composition of immobilized nanoparticles were characterized using scanning electron microscope and technique. Relevant optical properties of the coated particles were studied by diffuse reflectance spectroscopy. The photocatalytic activities of the coated beads were tested under solar radiation and feasibility with CPC photocatalytic reactor was proposed to decolorize the Rhodamine B dye solution. The results indicated that the nanoparticles could be well immobilized and adhered on the glass bead surface when the TTIP was used as binding agent. Characterized results revealed the existence of the immobilized TiO₂-based nanoparticles onto the glass bead surfaces. These coated glass beads exhibits the feasibility to be utilized as photocatalyst materials in CPC reactor.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เนื่องจากได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา ที่คอยให้คำปรึกษา คำชี้แนะ ตลอดจนให้ความรู้ ความช่วยเหลือ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างตรงจุดและเกิดความง่ายดาย รวมไปถึง ดร. กนกทิพย์ บุญรัตน์ และ ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาท ประธานกรรมการสอบและกรรมการสอบ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ คำติชม และแนวคิดต่าง ๆ เป็นที่ประโยชน์ในการทำการทดลองและจัดทำเล่มโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ นายอัมมาร์ อิบบรอฮิม นักศึกษาปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ แนะนำ ทั้งในด้านการทำการทดลองและด้านทฤษฎี ตลอดจนสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุนาโนคอมโพสิต ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติการในห้องทดลอง การใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ กำลังใจที่เต็มเปี่ยมไปด้วยความรัก ความห่วงใย จาก คุณพ่อ และ คุณแม่ ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าได้มายืนอยู่ ณ จุด ๆ นี้ได้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่งที่ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ชารอพี สุไลมาน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	4
1.3 ขอบเขตของการจัดโครงการพิเศษ.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการโครงการพิเศษ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 วัสดุนาโน.....	7
2.2 โครงสร้างนาโน.....	8
2.3 สารกึ่งตัวนำ.....	10
2.4 ทฤษฎีแถบพลังงาน.....	11
2.5 ระดับเฟอร์มิ.....	12
2.6 รอยต่อพี-เอ็น.....	14
2.7 คู่อิเล็กตรอน-หลุม.....	15
2.8 โทเทเนียมไดออกไซด์.....	16
2.9 การสังเคราะห์วัสดุในระดับนาโน.....	19
2.10 การเคลือบฟิล์ม.....	23
2.11 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	24
2.11 เครื่องปฏิกรณ์ทางแสง.....	25
2.13 การตรวจวิเคราะห์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	36
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินโครงการพิเศษ.....	39
3.3 การตรวจสอบวิเคราะห์.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	45
4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	45
4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลการตรวจสอบธาตุและสารประกอบด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy.....	46
4.3 ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงและค่าแถบพลังงาน.....	57
4.4 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
บรรณานุกรม.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม.....	9
2.2 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอม.....	10
2.3 ช่องว่างพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ โลหะ.....	12
2.4 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	13
2.5 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี.....	13
2.6 ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น.....	14
2.7 บริเวณการพ้อง.....	15
2.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม.....	15
2.9 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์.....	18
2.10 ผังวิธีโซลเจล.....	20
2.11 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่ง ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	25
2.12 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ทางแสงแบบ PTC.....	26
2.13 เครื่องปฏิกรณ์ทางแสงแบบ CPC.....	27
2.14 แผ่นสะท้อนแสงอลูมิเนียม.....	28
2.15 การตกกระทบของแสงแบบต่าง ๆ ลงบนแผ่นสะท้อนแสง.....	28
2.16 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	29
2.17 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-visible spectroscopy.....	33
2.18 จำนวนชั้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบบนแก้วในสารเมทาซิน ออเรน.....	34
2.19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง N, S / TiO ₂	35
3.1 สารไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์.....	36
3.2 ลิวคูซีนที่ผ่านกระบวนการสกัดมาแล้ว.....	37
3.3 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	38
3.4 เครื่องจุ่มเคลือบ.....	38
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการพิเศษ.....	39
3.6 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมได	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ออกไซด์ พี-25.....	41
3.7 ขั้นตอนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน.....	42
3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบวิเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ลิวคูซีน และเม็ดแก้วที่เคลือบแล้ว.....	44
4.1 กราฟผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน.....	46
4.2 เม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ.....	47
4.3 เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	48
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของเม็ดแก้วที่เคลือบ ด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และลิวคูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ.....	49
4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ.....	51
4.6 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy แสดงธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ.....	51
4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25.....	53
4.8 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy แสดงธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25.....	53
4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับ ลิวคูซีน.....	55
4.10 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy แสดงธาตุและ สารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับลิวคูซีน.....	55

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 กราฟแสดง UV-Vis diffuse reflectance spectra ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน.....	57
4.12 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25.....	58
4.13 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานของลิวคูซีน.....	58
4.14 ภาพการทดสอบการย่อยสลายสารละลายสีย้อมในบีกเกอร์ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ.....	60
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ และเม็ดแก้วที่เคลือบอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พี-25 ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	61
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วย ลิวคูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ.....	62
4.17 กราฟผลการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับ อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ.....	63
4.18 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี ด้านหน้า.....	65
4.19 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี ด้านหลัง.....	65
4.20 แผนผังการไหลของเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	6
2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	18
2.2 หมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในการบวกรวมการโซลเจล	21
4.1 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ.....	52
4.2 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25.....	54
4.3 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกับลิวคูซีน.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่สำคัญบนโลกนี้นั้นมีอยู่อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นป่าไม้ แสงแดด น้ำ ลม เป็นต้น ซึ่งทรัพยากรน้ำนั้นพบมากถึง 3 ใน 4 ส่วนของโลก โดยมีความสำคัญต่อพืช สัตว์และเป็นปัจจัยที่จำเป็นอย่างมากต่อความต้องการของมนุษย์ในการดำรงชีวิตมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันรวมไปถึงในอนาคตด้วย หากโลกเราปราศจากน้ำสิ่งมีชีวิตบนโลกก็จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

มนุษย์ใช้น้ำเพื่ออุปโภค บริโภค ประกอบอาหาร ชำระล้างร่างกาย เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและเพาะเลี้ยงสัตว์ ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในการเป็นเส้นทางคมนาคมขนส่ง แต่เมื่อวันเวลาผ่านไปมีการเปลี่ยนแปลงยุคสมัย เข้าสู่ยุคอุตสาหกรรมทำให้โลกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มนุษย์มีความต้องการมากขึ้นในการใช้ทรัพยากรน้ำในเกือบทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการเกษตร การเพาะปลูก ด้านพลังงานใช้น้ำเพื่อนำมาผลิตไฟฟ้าและด้านอุตสาหกรรม ซึ่งในอุตสาหกรรมทุกประเภทนั้นใช้น้ำเป็นจำนวนมาก เพื่อเป็นวัตถุดิบ สารตั้งต้น และตัวกลาง ในกระบวนการการผลิตต่าง ๆ รวมถึงเป็นตัวระบายความร้อนให้กับเครื่องจักรด้วย เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมใช้น้ำไปแล้วสิ่งที่ตามมาคือน้ำส่วนที่ไม่ต้องการถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม โดยไม่คำนึงถึงสิ่งที่ปนเปื้อนที่มากับน้ำ ซึ่งน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ ผ่านทั้งสารเคมี สิ่งปนเปื้อนมากมายเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อระบบนิเวศ แม้ว่าจะมีการบำบัดน้ำแล้วก็ตาม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทยเป็นอย่างมาก ยิ่งมีบทบาทในการนำเข้าเงินตราต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง อุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำ สารเคมี และสีย้อมในปริมาณมาก ทำให้มีการปล่อยน้ำทิ้งออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมากเช่นกัน ซึ่งน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมานั้นมีอยู่ในปริมาณมาก รวมถึงมีสิ่งปนเปื้อน โดยประกอบไปด้วย สารแขวนลอย สารอินทรีย์จากกระบวนการย้อมในปริมาณมาก ได้แก่ สีย้อม เส้นใยด้าย และแป้ง ยังมีสารอนินทรีย์ที่เป็นธาตุโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี เป็นต้น รวมถึงกรด-ด่าง และอื่น ๆ สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ส่งผลทำให้เกิดน้ำเสียทั้งสิ้น ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีกลิ่นที่เหม็น มีสีที่ไม่ประสงค์ ซึ่งไปคดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำแล้วทำให้พืชใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนลดลง มีผลต่อสัตว์น้ำ อาจทำให้สัตว์น้ำ พืช ปลา แพลงก์ตอน กุ้ง หอย ตายได้ อีกทั้งยังทำลายความสวยงามของธรรมชาติ และยังทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย

ปัจจุบันน้ำเสียเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในเมืองใหญ่และบริเวณรอบโรงงานอุตสาหกรรม ที่มาของน้ำเสียเกิดมาจากทั้งแหล่งชุมชน มีมากถึง 75 เปอร์เซ็นต์ และอีก 25 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนี้แม้จะมีเปอร์เซ็นต์ไม่มากนัก แต่สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียนี้มีความเข้มข้นที่สูง เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงมีความจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่กำหนดก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

การบำบัดน้ำเสีย สามารถทำได้หลายกระบวนการ ดังนี้

1.1.1 การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

เป็นการกำจัดสารแขวนลอยที่สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีทางฟิสิกส์ เช่น การตกตะกอนกรวดทราย โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง การแยกเศษขยะออกจากน้ำเสียด้วยตะแกรง เพื่อเป็นการลดภาระการทำงานและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของหน่วยบำบัดขั้นต่อไป ระบบบำบัดขั้นต้นที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

1.1.1.1 ตะแกรงดักขยะ (Screening)

น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมพอกย้อมสีสิ่งทอ มักมีของแข็งขนาดใหญ่ เช่น เส้นด้าย เศษผ้า เศษใยผ้า ซึ่งเป็นสาเหตุการอุดตันและทำความเสียหายแก่อุปกรณ์ เครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว และอุปกรณ์เครื่องวัดต่าง ๆ ดังนั้น ตะแกรงดักขยะเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นที่ใช้คัดแยกของแข็งขนาดใหญ่ มี 2 ประเภท คือ ตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด

1.1.1.2 ถังปรับสภาพ (Equalization)

น้ำเสียของอุตสาหกรรมพอกย้อมสีสิ่งทอ มักมีความแปรปรวนด้านความเข้มข้นตามลักษณะการพอกย้อม โดยลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการพอกย้อมสีขึ้นกับรอบการทำงาน บ่อปรับสภาพทำหน้าที่ควบคุมความเข้มข้นของน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอ และน้ำเสียประเภทนี้มักมีอุณหภูมิสูง ถังปรับสภาพจะช่วยลดอุณหภูมิของน้ำเสียก่อนเข้าระบบขั้นต่อไป เป็นการส่งเสริมให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.1.2 การบำบัดทางเคมีกายภาพ (Physicochemical treatment)

ระบบบำบัดทางฟิสิกส์-เคมีที่ใช้บำบัดสีในอุตสาหกรรมพอกย้อมมีหลายเทคโนโลยี ซึ่งระบบที่มีการใช้งานในประเทศไทย ได้แก่

1.1.2.1 การตกตะกอนทางเคมี

การบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีนิยมใช้งานสำหรับการแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีในการการตกตะกอน สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมพอกย้อมสีสิ่งทอ นิยมใช้ระบบตกตะกอนทางเคมีในการกำจัด สี และสารอินทรีย์ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง และเป็นการบำบัดสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบบำบัดชีวภาพ

1.1.2.2 การดูดซับ (Adsorption)

ระบบบำบัดน้ำเสียกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมีหรือระบบบำบัดทางชีวภาพ มักจะใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง ออกจากโรงงาน

1.1.2.3 การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้โอโซน (Ozone oxidation)

โอโซน (O_3) เป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสีและสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอ

1.1.2.4 การกรอง (Filtration)

ปกตินิยมใช้เป็นถังกรองทรายที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีสิ่งทอมักใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง ทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยหรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้า

1.1.3 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)

วิธีนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การกำจัดบีโอดีที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์มาย่อยสลายเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็น CO_2 (ถ้าใช้ระบบเติมอากาศ) หรือไปเป็น CH_4 และ H_2S (ถ้าใช้ระบบไม่เติมอากาศ) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment process) ได้แก่ ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated sludge) และบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon)

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment process) ได้แก่ ระบบบ่อไร้ออกซิเจน (Anaerobic ponds)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกทางธรรมชาติ ได้แก่ ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization ponds)

ทั้งนี้ยังมีเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพอื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้กำจัดสีจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption) การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition) และการย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงคือ ลักษณะของน้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีความหลากหลาย และแปรผันสูง การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสีย ส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีปัจจัยอื่นสำหรับพิจารณาในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัด เช่น ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ค่าใช้จ่าย เป็นต้น

วิธีการบำบัดน้ำเสียข้างต้นเหล่านี้จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีข้อจำกัดหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นด้านประสิทธิภาพที่บำบัดได้ได้น้อย ด้านค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่สูง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องสำหรับการบำบัดน้ำเสีย กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic processes) เป็นหนึ่งในวิธีการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเน่าเสียที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้แสงอาทิตย์หรือแสงจากแหล่งกำเนิดที่ทำขึ้นมา

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา พัฒนา และปรับปรุงกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel method) ซึ่งถูกตรึงลงบนเม็ดแก้ว เพื่อให้มีการยึดติดกับเม็ดแก้วได้มากขึ้น จึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการเคลือบให้ได้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกันเครื่องปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบ Compound Parabolic Collecting reactor (CPC)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนา การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน

1.2.2 ศึกษาและปรับปรุง กระบวนการปัจจัยและวิธีการในการตรึงเม็ดแก้วด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีนที่ถูกตรึงลงบนเม็ดแก้ว

1.2.4 เพื่อนำเม็ดแก้วที่ถูกตรึงด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาทำการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ CPC

1.3 ขอบเขตของการจัดโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและปรับปรุงเกี่ยวกับการตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนเม็ดแก้ว

1.3.3 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงกับเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการโครงการวิจัย

- ขั้นตอนที่ 1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล
- ขั้นตอนที่ 2 วางแผนและออกแบบการดำเนินการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการทดลองการตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ลงบนเม็ดแก้ว
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดลองเพื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายสารอินทรีย์สีข้อมโรดามีน บี
- ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลเบื้องต้น
- ขั้นตอนที่ 7 ทำการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน
- ขั้นตอนที่ 8 ทำการทดลองการตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีนลงบนเม็ดแก้ว
- ขั้นตอนที่ 9 ทำการทดลองเพื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายสารอินทรีย์สีข้อมโรดามีน บี
- ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบวิเคราะห์ผลของเม็ดแก้วและอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
- ขั้นตอนที่ 11 จัดทำเล่มโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เดือน / ปี การดำเนินงาน	2560				2561				
	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
1.ค้นคว้าข้อมูล	/								
2.วางแผนงาน	/	/							
3.เตรียม TiO ₂ + พี-25		/	/						
4.ตรึงลงบนเม็ด แก้ว		/	/	/					
5.ทดสอบการ เร่งปฏิกิริยา ด้วยแสง		/	/	/					
6.สรุปผล เบื้องต้น				/					
7.เตรียม TiO ₂ + ลิวคูซีน					/	/	/	/	/
8.ตรึงลงบนเม็ด แก้ว						/	/	/	/
9.ทดสอบการ เร่งปฏิกิริยา ด้วยแสง							/	/	/
10.ตรวจสอบ วิเคราะห์							/	/	/
11.จัดทำเล่ม โครงการ									/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการพิเศษนี้ผู้จัดทำโครงการได้ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนำเสนอความรู้ตามหัวข้อต่อไปนี้ สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีแถบพลังงาน ระดับเฟอร์มิ โทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการในการสังเคราะห์โทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการในการเคลือบฟิล์มบางโทเทเนียมไดออกไซด์ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และเครื่องปฏิกรณ์ทางแสง

2.1 วัสดุนาโน

วัสดุนาโน (nanomaterials) เป็นวัสดุที่กำลังอยู่ในความสนใจของนักวิทยาศาสตร์อย่างแพร่หลาย ศักยภาพของวัสดุนาโน สามารถปฏิวัติงานทางด้านวัสดุศาสตร์ให้เกิดประโยชน์อย่างมหาศาล คุณสมบัติของวัสดุนาโนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากคุณสมบัติเดิมของวัสดุนั้น ๆ คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าว ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ แพทยศาสตร์ วัสดุศาสตร์ วิทยาศาสตร์พื้นฐาน และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ อย่างไรก็ตามวัสดุนาโนอาจทำให้เกิดผลกระทบในหลายด้าน ซึ่งเราสามารถป้องกันไว้ก่อนได้ โลกในอนาคตจะให้ความสำคัญต่อศาสตร์แห่งนาโนยิ่งขึ้น

วัสดุนาโนเป็นวัสดุที่กำลังดึงดูดความสนใจของนักวิทยาศาสตร์ในทั่วโลกในช่วงหลายปีนี้อย่างมากมาย และเป็นไปด้วยความรวดเร็วอย่างที่วัสดุอื่น ๆ ไม่เคยได้รับมาก่อนสาเหตุสำคัญอาจจะเนื่องมาจากศักยภาพของวัสดุนาโนที่สามารถทำการปฏิวัติงานทางด้านวัสดุศาสตร์ให้เกิดขึ้นและนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมหาศาล โดยผ่านโครงสร้างในระดับอะตอมซึ่งเป็นตัวควบคุมสมบัติทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี เช่น สภาพแม่เหล็ก (magnetic) ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (catalysis) หรือพฤติกรรมทางแสง (optical) เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการพัฒนา เทคโนโลยีด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก ตัวเก็บข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic data storage) รวมทั้งพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุอ่อนรูปพลาสติกยิ่งยวด (superplastic) ตลอดจนวิทยาศาสตร์และวิทยาการด้านอื่น ๆ มากมาย การพัฒนาโครงสร้างนาโนของวัสดุก่อให้เกิดคำถามที่เพิ่มขึ้นอย่างมากว่าทำไมคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจึงเปลี่ยนแปลงไปเมื่อลดระดับโครงสร้างจากระดับไมโคร (10^{-6} เมตร) ลงสู่ระดับนาโน (10^{-9} เมตร) เช่น มีค่าความเครียดเชิงกลสูงขึ้น (mechanical strength) การกระจายแสงเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจำเพาะสูงขึ้น และสภาพความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเดิมของตัวเอง





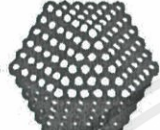
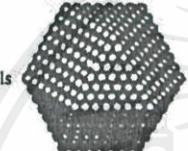
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุนาโนสามารถจะจัดแบ่งได้เป็นผลึกนาโน (nanocrystalline) และอนุภาคนาโน (nanoparticle) โดยที่ก้อนหรือปริมาตรของผลึกนาโนซึ่งประกอบด้วยเม็ดผลึก (grain sizes) ที่มีขนาดช่วงระดับการวัดอยู่ในระดับนาโน ถึงประมาณ 100 นาโนเมตร แต่ขณะที่อนุภาคนาโน มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ดังนั้นก้อนหรือปริมาตรของวัสดุที่เป็นผลึกนาโนจึงประกอบขึ้นหรือเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคนาโน การศึกษาค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุนาโนต้องใช้ความพยายามสูง มีความเกี่ยวข้องกันในหลาย ๆ สาขาวิชา รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ของนักวิจัยในสาขาต่าง ๆ เช่น ฟิสิกส์ เคมี วิศวกรรมศาสตร์ และวัสดุศาสตร์ หรือแม้กระทั่งชีววิทยา และการแพทยงานวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานของวัสดุนาโนเป็นสิ่งสำคัญที่นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจเช่นกัน มีความคิดเห็นหลายประเด็นที่จะกล่าวถึง ศักยภาพของวัสดุนาโนที่มีประโยชน์อย่างมากมาย เช่นในทางอุตสาหกรรม การสังเคราะห์วัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูง การเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐกิจและสภาพแวดล้อม คุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างใหม่และคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโน การเตรียมผลิตภัณฑ์จากอนุภาคนาโนที่มีความหนาแน่นสูงและมีสิ่งเจือปนต่ำ และการเก็บรักษาสภาพรายละเอียดของเม็ดผลึกเพื่อดำรงไว้ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่มีความสัมพันธ์กับขนาดในระดับนาโน เทคโนโลยีสำหรับเตรียมอนุภาคนาโนมีหลากหลายแนวทาง

2.2 โครงสร้างนาโน (Nanostructure)

คุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนก็คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ การเตรียมอนุภาคนาโนจากสถานะไอระเหยและของเหลวมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอน คือ การก่อตัว (nucleation) การเกาะกลุ่ม (coalescence) และการเติบโต (growth) อนุภาคนาโนจะเริ่มเกิดจากการการก่อตัวจากแก่นกลางจากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่ม และรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนหลายๆ

อนุภาคจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกล่องลูกบาศก์ หรือโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่าง ๆ ซึ่งโครงสร้างหนึ่งๆ อาจเกิดจากการก่อตัวรอบ ๆ อะตอมแก่นกลางอะตอมหนึ่ง โดยในชั้นแรกมี 12 อะตอม ชั้นที่สองมี 42 อะตอม และชั้นที่ 3 มี 92 อะตอม เป็นต้น จำนวนอะตอมในแต่ละชั้นจะถูกกำหนดโดยตัวเลข $10n^2+2$

Full shell clusters	Total number of atoms	Surface atoms (%)
One shell 	13	92
Two shells 	55	76
Three shells 	147	63
Four shells 	309	52
Five shells 	561	45
Seven shells 	1415	35

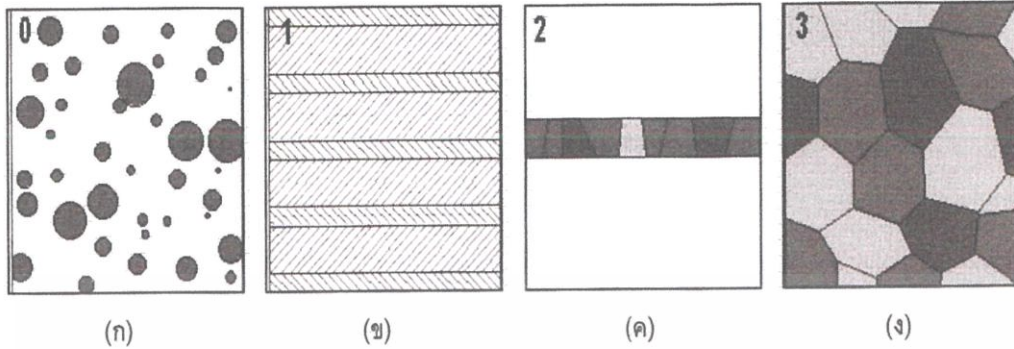
ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม [1]

วัสดุผลึกนาโน สามารถจัดแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับทิศทาง หรือมิติของผลึก คือ

1. กลุ่มอะตอมมิติศูนย์ (zero-dimensional atom clusters)
2. โครงสร้างเนื้อเยื่อหลายชั้น 1 มิติ (one-dimensional modulated multilayers)
3. โครงสร้างเนื้อเยื่อละเอียดหลายชั้น 2 มิติ (two-dimensional ultrafine-grained overlayers)
4. โครงสร้างผลึกนาโน 3 มิติ (three-dimensional nanocrystalline structure) วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยผลึก กึ่งผลึก (quasi-crystalline) และสถานะอสัณฐาน (amorphous phase) หรือแก้วนาโน (nanoglasses) วัสดุผลึกนาโนอาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (intermetallic) เซรามิกซ์ หรือวัสดุประกอบ (composites) วัสดุผลึกนาโนยังสามารถแบ่งออกเป็น 12 กลุ่ม ตามรูปร่าง (มิติ) และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นโครงสร้าง

วัสดุหรือโครงสร้างที่มีระดับมิติต่ำจะมีภาวะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องจะมีค่าได้อย่างจำเพาะเท่านั้น ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ควอนไทเซชัน (quantization) การเกิดควอนไทเซชันของอิเล็กทรอนิกส์จะนำไปสู่การเกิดสมบัติใหม่ และปรากฏการณ์ใหม่ เช่น อิทธิพลอิเล็กตรอนเดี่ยว (single

electron effect) การกักขังอิเล็กตรอน (excitron confinement) ปรากฏการณ์ขยับเคลื่อนของสเปกตรัม (spectrum shift) ควอนไทเซชันของโฟนอน (phonon quantization) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมใน (ก) ศูนย์มิติ (ข) หนึ่งมิติ (ค) สองมิติ (ง) สามมิติ [2]

การเรียงตัวของอะตอมที่มีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร รูป 2.2 (ก) แสดงอนุภาคระดับขนาดนาโนศูนย์มิติ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ในทิศทางใด ๆ รูป 2.2 (ข) แสดงฟิล์มบางที่เรียงซ้อนกันมีความหนาน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ที่ประกอบด้วยเกรนขนาดนาโน มีลักษณะการเรียงตัวในหนึ่งมิติ รูป 2.2 (ค) แสดงชั้นฟิล์มบางที่น้อยกว่า 100 นาโนเมตร ที่ประกอบด้วยเกรนขนาดนาโน มีลักษณะการเรียงตัวในสองมิติ และรูป 2.2 (ง) แสดงเกรนหลาย ๆ เกรนเชื่อมต่อกันเป็นวัสดุนาโน มีลักษณะการเรียงตัวในสามมิติ

2.3 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ คือวัสดุที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) อยู่ระหว่างสารนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้าในสภาวะปกติแต่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ วัสดุที่มีสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ซิลิคอน (Si) และเจอร์มาเนียม (Ge) ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 สภาพนำภายใน (intrinsic conductivity)

สภาพนำภายในเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างอะตอมของธาตุชนิดเดียวที่สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยตัวเอง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ จะหลุดจากโครงสร้างอะตอม ข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในขณะที่เดียวกันแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดหลุม (hole) ที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไปได้อย่างอิสระเสมือนว่าหลุมเคลื่อนที่ได้ในแถบวาเลนซ์ สารกึ่งตัวนำประเภทนี้มีสภาพการนำไฟฟ้าไม่ดีขึ้นแต่จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นมากขึ้น

2.3.2 สภาพนำภายนอก (extrinsic conductivity)

สภาพนำภายนอกเป็น สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) ที่ปรับปรุงโดยการเจือ (dope) อะตอมของธาตุเจือปนที่มีโครงสร้างอิเล็กตรอนต่างกันลงไปโครงสร้างผลึกบริสุทธิ์แบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่

2.3.2.1 การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้างผลึก โดยอิเล็กตรอนที่เกินนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เช่น การเจืออะตอมของธาตุอาร์เซนิค (As) หรือฟอสฟอรัส (P) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน หรือเจอร์มาเนียม

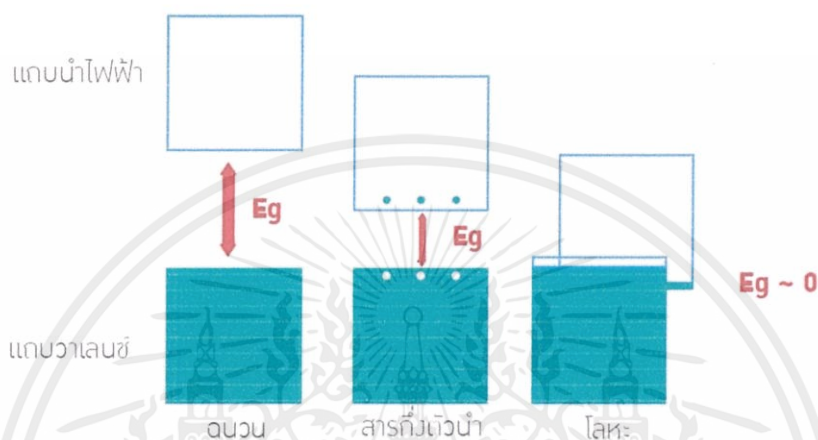
2.3.2.2 การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึกทำให้มีจำนวนหลุม (hole) เกินในโครงสร้างผลึกสามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไปเสมือนว่าหลุมเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) เช่น การเจืออะตอมของธาตุอินเดียม (In) หรือโบรอน (B) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียม เป็นต้น [3]

2.4 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band energy theory)

เมื่ออะตอมสองอะตอมอยู่ใกล้กันเกิดอันตรกิริยาต่อกัน ระดับพลังงานจะเกิดการซ้อนเหลื่อมกันและเกิดการแยกชั้น เมื่อพิจารณาอะตอมในวัสดุซึ่งประกอบด้วยอะตอมมากมาย ระดับพลังงานจะใกล้ชิดกันมากขึ้นเสมือนเป็นแถบต่อเนื่องกัน เรียกว่า แถบพลังงาน โดยแถบพลังงานของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นวงนอกของอะตอมเมื่อพิจารณาระบบหลายอะตอมหรือในวัสดุ จะเรียกแถบพลังงานนี้ว่า แถบพลังงานวาเลนซ์ และเหนือกว่าแถบพลังงานวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ ิสรระได้ เรียกว่า แถบพลังงานการนำ โดยที่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสองจะมีช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap , E_g) เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์

จะมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูงและมีพลังงานจลน์ที่ต่ำ ในขณะที่อิเล็กตรอนในชั้นแถบพลังงานการนำจะมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวที่ต่ำและมีพลังงานจลน์ที่สูง การกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถที่จะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนได้

แถบวาเลนซ์ และแถบนำไฟฟ้า ของโลหะจะอยู่ใกล้กัน มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแคบ หรือซ้อนทับกัน ฉนวนมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้าง สารกึ่งตัวนำจะมีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่างฉนวนและโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 2.3



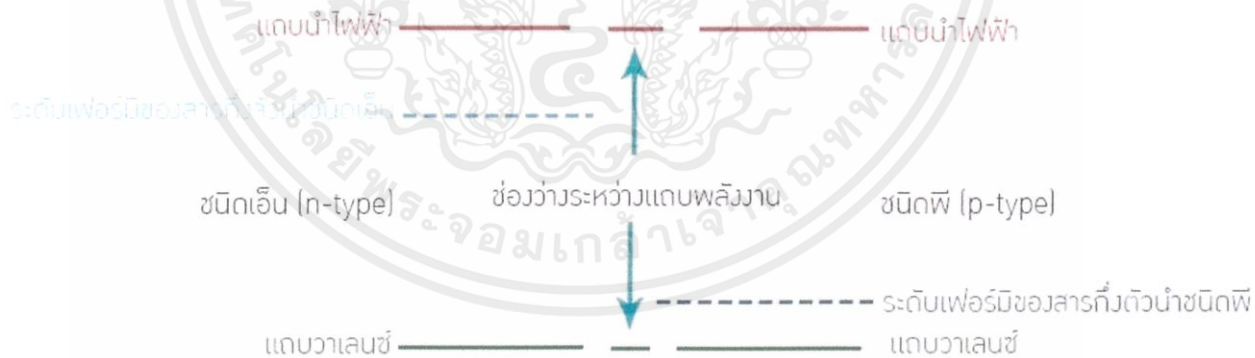
ภาพที่ 2.3 ช่องว่างพลังงานของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และ โลหะ [3]

2.5 ระดับเฟอร์มี (Fermi level)

ระดับเฟอร์มีคือ ระดับพลังงานที่ได้ถูกสมมติเป็นค่าค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะทำให้มีโอกาสพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ที่สภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ณ เวลาใด ๆ ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่าง ๆ เป็นไปตามฟังก์ชันของเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ดังภาพที่ 2.4 ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เติมธาตุเจือปนชนิดพี (P-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มีอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์ (valence band) และชนิดเอ็น (N-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มีใกล้แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ P-N ได้ ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [3]

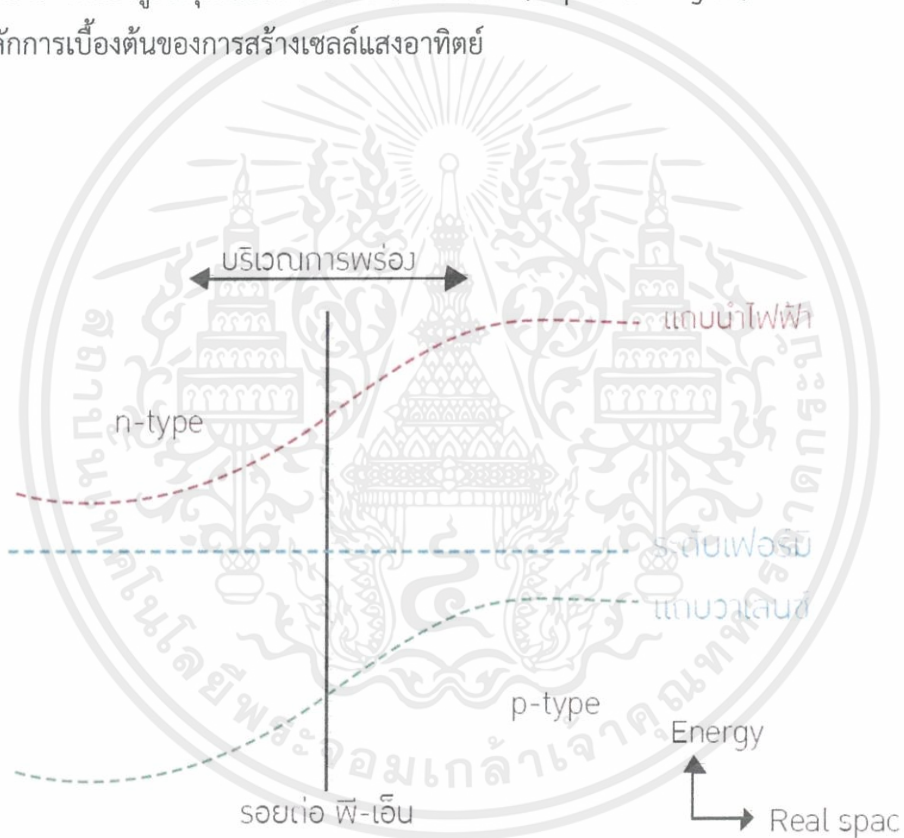


ภาพที่ 2.5 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

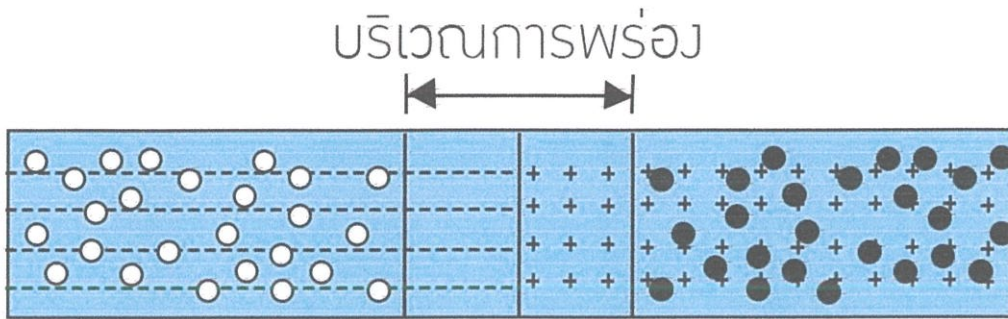
2.6 รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction)

รอยต่อพี-เอ็น คือ รอยต่อที่เกิดขึ้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิต่างกัน มาเชื่อมต่อกัน อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจากฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังภาพที่ 2.6 ในขณะที่หลุม (hole) ที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เสมือนว่าแพร่กระจายในทิศทางตรงกันข้าม ในบริเวณแคบ ๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) นั้น แรงเหนี่ยวนำระหว่างประจุลบและประจุบวกที่สะสมในแต่ละฝั่งทำให้เกิดศักย์ภายใน (built-in potential) ขึ้นต่อต้านการแพร่ของประจุจากทั้งสองฝั่ง การแพร่จะดำเนินไปจนกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองฝั่งอยู่ระดับเดียวกันจึงเข้าสู่สมดุลทางไฟฟ้าโดยจะไม่มีกระแสเกิดขึ้นอีกที่บริเวณแคบ ๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็นที่มีการเคลื่อนที่ของประจุจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลนี้เรียกว่าบริเวณการพร่อง (depletion region) ดังภาพที่ 2.7 รอยต่อพี-เอ็น เป็นหลักการเบื้องต้นของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

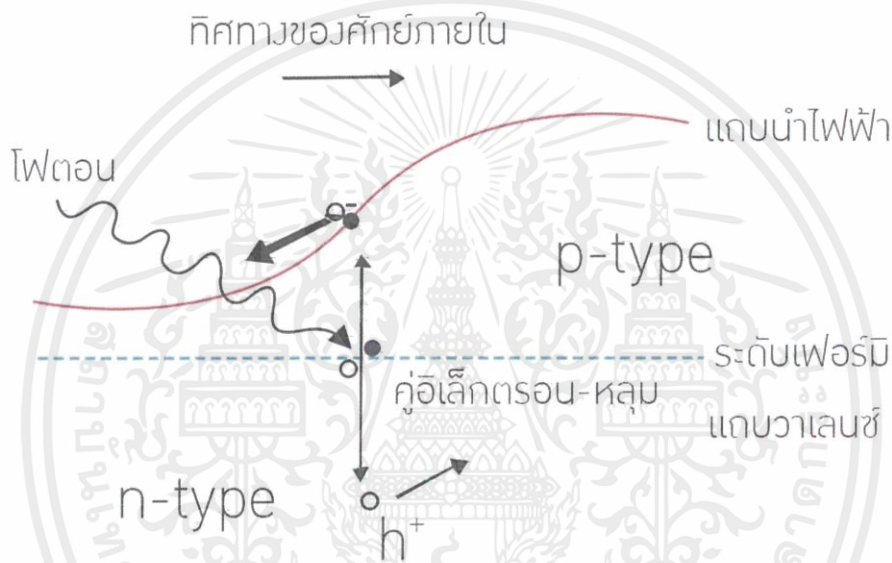


ภาพที่ 2.6 ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.7 บริเวณการพร่อง (Depletion region) [3]



ภาพที่ 2.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair) บริเวณรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) [3]

2.7 คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair)

คู่อิเล็กตรอน-หลุมคือ สภาวะที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ของสารกึ่งตัวนำ ได้รับการกระตุ้นจากแสง ไฟฟ้าหรือความร้อน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน จนมีพลังงานสูงพอที่ อิเล็กตรอนจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าทำให้เกิดหลุม ในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสีย อิเล็กตรอนไปซึ่งจะคงสภาพในช่วงเวลาสั้นๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับ (recombination) ลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิม คู่อิเล็กตรอน-หลุม ที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) ในบริเวณการพร่อง (depletion region) จะถูกเร่งด้วยศักย์ภายใน (built-in potential) ให้ แยกคู่กัน เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่วงจรภายนอกได้ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-หลุม และช่วงเวลาที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับ (recombination lifetime) เป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide , TiO_2)

ไทเทเนียม หรือ ไททาเนีย มีสัญลักษณ์เป็น Ti มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน (electron configuration) คือ $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$ และมีมวลอะตอมเท่ากับ 47.867 รัศมีอะตอมเท่ากับ 147 พิโคเมตร มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 1667 องศาเซลเซียส และจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 3285 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิห้องมีความหนาแน่น 4.50 กรัมต่อเซนติเมตร (gcm^{-3}) ไทเทเนียมเป็นธาตุโลหะในกลุ่มทรานซิชันที่ภาคอุตสาหกรรมต่างให้ความสนใจ เนื่องจากมีอยู่มากในโลก และอยู่ในรูปสารประกอบองแร่ จึงต้องทำการสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ โลหะชนิดนี้มีค่าสัดส่วน ระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง หรือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา ทั้งยังมีความทนทานต่อสารเคมีและการกัดกร่อน

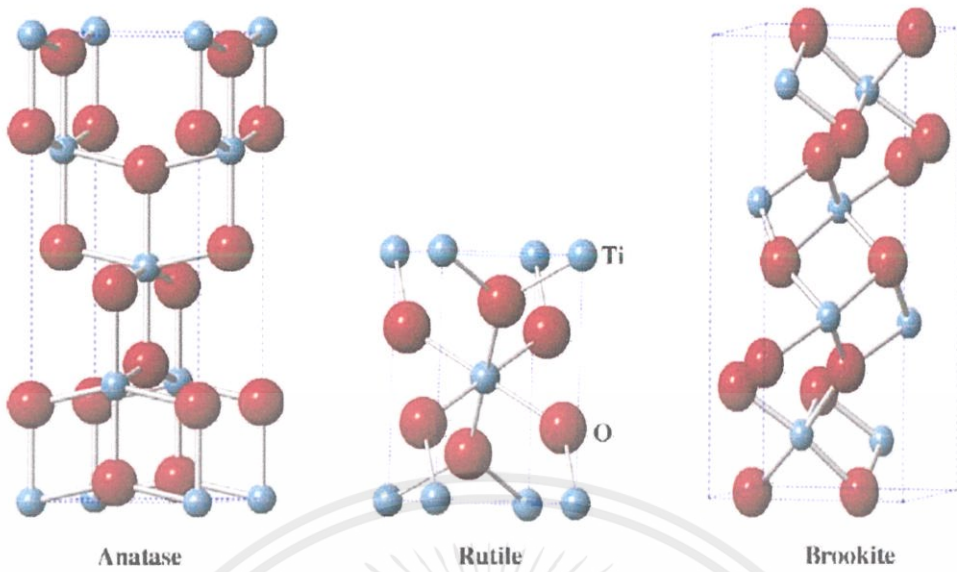
ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสัญลักษณ์เป็น TiO_2 เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่มีความเป็นพิษ และราคาไม่แพง เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เป็นสารดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภท มีความเสถียรทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อนของแสง เมื่อสัมผัสอยู่กับน้ำ มีราคาค่อนข้างถูก และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เป็นข้อดีในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำจะดูดซับบนบริเวณพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ องค์ประกอบเฟสก็เป็นส่วนที่สำคัญ ที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ดี ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีโครงสร้างของผลึกที่สำคัญ 3 โครงสร้าง คือ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคท์ (brookite) ซึ่งเฟสอนาเทส และรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเททรากอนอล ส่วนบรูคไคท์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก โดยทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_2^{6-} octahedral) อะตอมไทเทเนียม (Ti) หนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอม

ออกซิเจน (O) หกอะตอม แต่ละรูปแบบโครงสร้างขึ้นอยู่กับการบิดเบี้ยวของการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้า บริเวณขอบ มุม และหน้า

โดยปกติจะพบไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึก แบบอนาเทสและรูไทล์ โครงสร้างผลึกอนาเทสตามภาพที่ 2.9 สามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษากันโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งโครงสร้างผลึกอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดการเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้สูงกว่า โครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอนาเทส เกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างผลึกอนาเทส สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ที่พื้นผิวมีไฮดรอกไซด์ไอออนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) มากกว่า ซึ่งจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัล (hydroxyl radical, $\text{OH}\cdot$) ได้มาก ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัลเป็นตัวออกซิแดนซ์หลักที่จะทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี สำหรับโครงสร้างอนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดยโครงสร้างผลึกอนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อีกทั้งโครงสร้างอนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดติดผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์

ในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสอย่างเดียว เพราะว่าในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอนาเทส จะเป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนกับโฮล จากการสร้างประจุโดยพลังงานจากแสง เนื่องจากชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสอนาเทสอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าชั้นการนำไฟฟ้าของเฟสรูไทล์ประมาณ 0.20 eV ความสามารถของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงนั้น เป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างและขนาดของผลึก ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน และสมบัติอื่น ๆ ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล การดูดซับบนพื้นผิว และกระบวนการรีดอกซ์ [4]



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคโคท (brookite)

[5]

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์ [6]

TiO ₂	anatase	rutile	brookite
จำนวนอะตอม	2	4	8
โครงสร้างผลึก	tetragonal	tetragonal	orthorhombic
ความหนาแน่น(g/cm ³)	4.2743	3.895	4.123
a (Å)	3.7842	4.5937	9.184
b (Å)	3.7842	4.5937	5.447
c (Å)	9.5146	2.9581	5.145
band gap (eV)	~3.2	~3.0	~3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การสังเคราะห์วัสดุในระดับนาโน

การสังเคราะห์อนุภาคนาโน หรือวัสดุนาโน ให้ได้เกรนหรืออนุภาคที่มีขนาด 10^{-9} - 10^{-7} เมตร ซึ่งใช้หลักการเรียงอะตอมเป็นกลุ่มก้อน สามารถทำได้หลายวิธี เนื่องจากในขั้นต้นแต่ละอะตอมจะอยู่แยกกันในลักษณะที่เกิดจากการแยกตัวหรือกระจายตัวอยู่ในรูปของก๊าซ สารละลาย หรือของแข็ง ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

2.9.1 วิธีการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะก๊าซ (gas condensation synthesis)

การสังเคราะห์วัสดุนาโนด้วยวิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนอะตอมหรือโมเลกุลที่จะนำมารวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นอนุภาคนาโนให้อยู่ในสถานะก๊าซหรือไอก่อนที่จะทำให้เกิดการรวมตัวกัน ควบแน่น และเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนอะตอมที่เรียกว่า “การเกิดใหม่ (nucleation)” กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีการเกาะตัวเพิ่มขึ้นของอะตอมของไอของโลหะ ซึ่งเป็นอนุกรมที่มีรูปทรงกระบอก และถูกหล่อให้เย็นด้วยก๊าซไนโตรเจน

2.9.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยการย่อยอนุภาคขนาดใหญ่

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยการบดย่อยอนุภาคขนาดใหญ่ให้มีขนาดอนุภาคนาโนโดยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ผงหรืออนุภาคนาโนด้วยวิธีทางกล (mechanic alloying)

2.9.3 วิธีการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลว

การสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในสถานะของเหลว เตรียมได้จากการตกตะกอนของสารตั้งต้นในของเหลว จะคล้ายกับการตกตะกอนของผลึกเกลือจากสารละลายเกลือแกง ซึ่งอนุภาคนาโนจะสามารถตกตะกอนได้จากสารละลายของสารตั้งต้น จุดที่สำคัญของการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ การควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไป และการขยายตัวของอนุภาคขึ้นอยู่กับอัตราการทำให้เย็นตัวของอนุภาคนั้น ๆ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนในสถานะของเหลวที่นิยมมี 2 วิธีด้วยกันคือ

2.9.3.1 วิธีการสังเคราะห์แบบรีเวอร์สไมเซลล์ (reverse micelles)

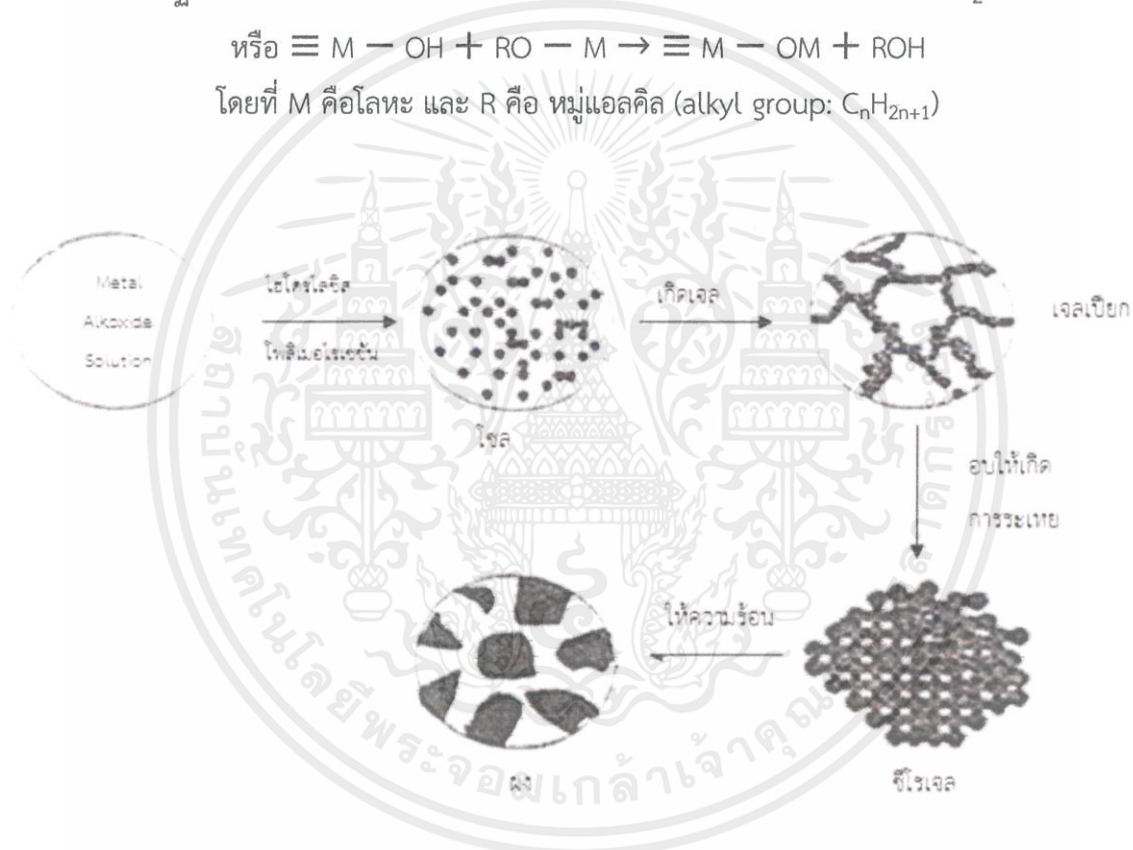
การสังเคราะห์แบบรีเวอร์สไมเซลล์ หมายถึง การที่หยดน้ำขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายอินทรีย์จะเกิดเมื่อผสมน้ำกับน้ำมันและกวนผสมอย่างรวดเร็วจากการที่น้ำกับน้ำมันไม่สามารถละลายเข้ากันได้ เมื่อหยุดกวนจะมีหยดน้ำเล็ก ๆ ของสารชนิดหนึ่งลอยอยู่บนสารอีกชนิดหนึ่งจำนวนมาก ถ้าต้องการให้หยดน้ำมีขนาดเล็กลงให้เติมสารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารประกอบ 2 ชนิดทำปฏิกิริยากันโดยที่สารละลายตัวหนึ่งสามารถละลายน้ำได้และอีกตัวหนึ่งสามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ จากนั้นนำมาผสมกับน้ำในปริมาณน้อยมาก และสารละลายอินทรีย์ จะเกิดเป็นอินเวอร์สอิมัลชัน (inverse emulsion) ขึ้น และสารละลายที่สามารถละลายได้ในสารอินทรีย์จะแพร่ผ่านผิวหน้าของสารลดแรงตึงผิวและทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายได้ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบขึ้นในหยดน้ำ

2.9.3.2 วิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (sol-gel)

กระบวนการเตรียมโซลเจล เป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (wet process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่เรียกว่า “เจล” การเตรียมโลหะออกไซด์เริ่มต้นปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำที่เรียกว่า “โซล” จากนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation reaction) ทำให้อนุภาคเชื่อมโยงต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย “เจล” เมื่อนำเจลไปแคลไซน์จะได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว ดังสมการนี้



โดยที่ M คือโลหะ และ R คือ หมู่แอลคิล (alkyl group: $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$)



ภาพที่ 2.10 ผังวิธีโซลเจล [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3.2.1 ความหมายของคำว่าโซล และเจล

โซล (sol) สารแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลว โดยที่โซลจะมีความหนาแน่นอนุภาคของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในของเหลวจะมีขนาดเล็กมากประมาณ 1-1000 นาโนเมตร ทำให้มีแรงต้านทานแรงโน้มถ่วงที่ทำให้ไม่สามารถเกิดการตกตะกอน และมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปโดยที่คอลลอยด์ บางชนิดจะเปลี่ยนสภาพจากโซลไปเป็นเจล หรือจากเจลไปเป็นโซลได้ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น

เจล (gel) เป็นสารละลายแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น ซึ่งมีความหนืดสูงจนสารละลายมีความยืดหยุ่นอย่างของแข็ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโครงร่างตาข่ายของเฟสที่กระจาย (dispersed phase) หรือคอลลอยด์ (colloid) และสารตัวกลางทำกระจาย (dispersed medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงร่างตาข่ายนั้น ที่โครงสร้างของของแข็งเกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงสามมิติและมีความพรุนที่กระจายปกคลุมทั่วเฟสของเหลว มีขนาดไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับฐานรองรับที่บรรจุถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์

2.9.3.2.2 สารตั้งต้นในกระบวนการโซลเจล

การเคลือบผิวด้วยวิธีโซลเจลนั้นสารประกอบตั้งต้น สำหรับเตรียมคอลลอยด์จะประกอบไปด้วยโลหะ หรือโลหะผสม ซึ่งถูกล้อมรอบไปด้วยลิแกนด์ต่าง ๆ ซึ่งวิธีการโซลเจลนี้สามารถใช้สารประกอบตั้งต้นที่หลากหลายมากดังตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงหมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้มากที่สุด

ตารางที่ 2.2 หมู่ลิแกนด์ที่นิยมใช้เป็นสารตั้งต้นในการบวนการโซลเจล [7]

Alkyl		Alkoxy	
Methyl	• CH_3	Methoxy	• OCH_3
Ethyl	• CH_2CH_3	Ethoxy	• OCH_2CH_3
n-propyl	• $CH_2CH_2CH_3$	n-propoxy	• $OCH_2CH_2CH_3$
iso-propyl	• $H_3C(\cdot C)HCH_3$	iso-propoxy	• $H_3C(\cdot O)HCH_3$
n-butyl	• $CH_2(CH_2)_2CH_3$	n-butoxy	• $OCH_2(CH_2)_2CH_3$
sec-butyl	• $H_3C(\cdot C)HCH_2CH_3$	sec-butoxy	• $H_3C(\cdot O)HCH_2CH_3$
iso-butyl	• $CH_2CH(CH_3)_2$	iso-butoxy	• $OCH_2CH(CH_3)_2$
tert-butyl	• $C(CH_3)_3$	tert-butoxy	• $OC(CH_3)_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3.2.3 การเกิดโพลิเมอร์ (Polymer)

โพลิเมอร์ คือโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์จำนวนมากที่เกิดการสร้างพันธะอย่างน้อย 2 พันธะซึ่งจำนวนพันธะที่โมโนเมอร์สามารถรวมตัวได้ เรียกว่า ฟังก์ชันนัลลิตี (functionality) ถ้า $f=2$ หรือ bifunctional monomer จะสร้างพันธะกับ 2 หน่วย ข้างเคียงได้ โมเลกุลที่มีโครงสร้าง 2 มิติแต่ถ้าโมโนเมอร์มีพันธะแอกทีฟ 3 พันธะ (trifunctional, $f=3$) จะสร้างโมเลกุลที่มีโครงสร้างเครือข่าย 3 มิติ

การเกิดโพลิเมอร์ สามารถเกิดได้สองแบบคือ โพลิเมอร์ธรรมชาติ เป็นโพลิเมอร์ที่สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติได้ เช่น โปรตีน แป้ง เซลลูโลส ยางธรรมชาติ เป็นต้น โพลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นโพลิเมอร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเคมี โดยใช้สารเริ่มต้นหรือมอนอเมอร์ ส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน จะได้โพลิเมอร์ ที่มีมวลโมเลกุลมาก และมีโครงสร้างที่แข็งแรง

2.9.3.2.4 การเกิดเจล

เจล เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยโครงสร้างต่อเนื่องของของแข็งปกคลุมทั่วสเปซของเหลว ทำให้เจลมีความยืดหยุ่น ซึ่งเจลสามารถเกิดจากสารละลายได้เมื่อเกิดแรงกระทำแพร่กระจายเชื่อมโยงไปยังโมเลกุลอื่นในทิศทางที่ทำให้เกิดเป็นโครงร่างแห โดยทั่วไปเจลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวกันระหว่างโครงสร้างของแข็ง และตัวกลางของเหลว ถ้าของเหลวประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า เอควาเจล (aquagel) หรือ ไฮโดรเจล (hydrogel) แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า อัลคอกเจล (alcogel) การเกิดเจล (gelatin) อาจเกิดได้จากการระเหยอย่างรวดเร็วของตัวทำละลายซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเตรียมฟิล์มหรือไฟเบอร์ โครงร่างแหของเจลจะเคลื่อนย้ายต่อไปยังตำแหน่งต่าง ๆ จนเกิดการควบแน่นต่อไปเรื่อย ๆ คือ มีทั้งโซล โครงร่างแหของเจลและโพลิเมอร์เล็ก ๆ ที่อนุภาคยังสามารถเชื่อมต่อและทำให้เกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงการหดตัวของเจล (shrinkage) อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการสังเคราะห์หรือการระเหยของของเหลว ในระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงร่างแห และการไล่น้ำออกจากรูพรุน การอบแห้ง (drying) ทำโดยการระเหยภายใต้สภาวะปกติ จะทำให้เกิดการหดตัวของโครงร่างแหของเจลทำให้ปริมาตรลดลง 5 ถึง 10 เท่าจากเดิมซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแห้งที่สภาวะปกติเรียกว่า ซีโรเจล (xerogel) แต่ถ้านำเจลไปอบแห้งในเครื่องอบไอน้ำความดันสูง (autoclave) ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ซึ่งไม่มีชั้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอน้ำ ดังนั้น จึงไม่มีแรงดันคาпилลารี (capillary pressure) ทำให้เกิดการหดตัวเพียงเล็กน้อยของเจล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแบบนี้เรียกว่า แอโรเจล (aerogel) ซึ่งได้จากของแข็งที่มีขนาดเล็กประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

2.9.3.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโซล-เจล

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในกระบวนการโซล-เจล แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทั้งสองสภาวะนี้จะส่งผลต่อการเกิดเจลที่ต่างกัน

สภาวะที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเร็วกว่าปฏิกิริยาการควบแน่น โดยในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นจะนำไปสู่การขยายตัวของโพลิเมอร์สายโซ่ตรงและโพลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่ง ซึ่งการเกิดเจลจะเกิดขึ้นเมื่อโพลิเมอร์ที่กำลังขยายตัวมีการพันกัน และเกิดพันธะข้ามระหว่างสายโซ่และกรดจะเป็นตัวช่วยทำให้อนุภาคของโลหะอัลคอกไซด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกรดที่เลือกมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก เป็นต้น

สภาวะที่ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในสภาวะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาการควบแน่น จะทำให้เกิดกลุ่มของโพลิเมอร์ที่เป็นสายโซ่กิ่ง (branched polymer cluster) และเจลจะเกิดขึ้นเมื่อมีการต่อเชื่อมกันระหว่างกลุ่มโพลิเมอร์ ทั้งนี้กรดและด่างยังส่งผลต่อการเกิดเจล และการเชื่อมต่อกันของกลุ่มโพลิเมอร์ที่แตกต่างกัน

2.10 การเคลือบฟิล์ม (Coating)

ฟิล์มบางของตัวเร่งปฏิกิริยาไวแสงมีคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการหลายอย่าง เช่น การทำความสะอาดผิวด้วยตัวเองและการฆ่าเชื้อด้วยตัวเองการเลือกวิธีเคลือบที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับ การนำไปประยุกต์ใช้ การเคลือบฟิล์มมี 2 วิธี คือการเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นโดยสร้างฟิล์มภายใต้ความดันอากาศปกติ เช่น การเคลือบแบบจุ่ม , การเคลือบแบบปั่น และในแบบที่สองคือการเคลือบฟิล์มในสุญญากาศ เช่น การเคลือบแบบสปัตเตอริง (sputtering) วิธีการเคลือบแบบปั่น ต้องอาศัยความเร็วรอบที่แตกต่างกันในการหมุนเพื่อให้ได้น้ำหนักของฟิล์มที่สมดุลกัน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบ วิธีการสปัตเตอริง เป็นวิธีที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน วิธีการเคลือบแบบจุ่ม เป็นวิธีที่สะดวก สามารถทำได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

2.10.1 การเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating)

การเคลือบแบบจุ่ม เป็นวิธีการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้า ๆ การจุ่มจะนำสารละลายมาเคลือบบนพื้นผิวอย่างช้า ๆ ซึ่งมีการต้องควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่ เพื่อให้ผิวของวัสดุมีความเรียบสม่ำเสมอและความหนาของฟิล์มน้อย หากต้องการฟิล์มที่มีความหนาน้อยให้ใช้ความเร็วในการเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่ถ้าต้องการเคลือบแบบหนามาก

ให้ใช้ความเร็วที่ช้า หรือจะทำการจุ่มให้มีจำนวนครั้งเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความหนาให้กับฟิล์มได้เช่นกัน และทำให้เนื้อสารที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุมากตามไปด้วย จึงทำให้ฟิล์มหนาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับตัวแปรต่าง ๆ ในการเคลือบแบบจุ่ม แสดงดังสมการที่ 2.1

$$h_0 = \frac{0.94(\eta U)^{\frac{2}{3}}}{\gamma \frac{6}{Lv}(\rho g)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.1)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของสารละลาย

U คือ ความเร็วในการดึง (dipping speed)

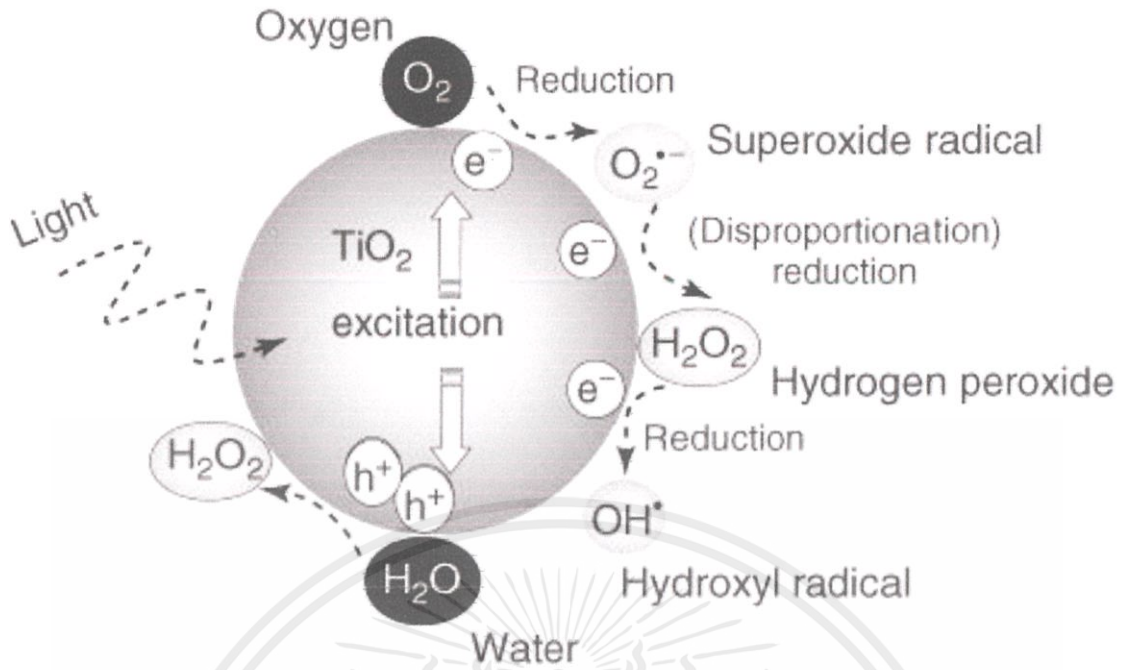
γ_{Lv} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ (liquid-vapor surface tension)

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2.11 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic processes)

สารกึ่งตัวนำจะแบ่งชั้นพลังงานเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นแถบวาเลนซ์ (Valance band, VB) และชั้นแถบการนำ (Conduction band, CB) และเรียกกระยะห่างของ 2 ชั้นว่า band gap energy (E_g) โดยสารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับพลังงานแสงกระตุ้นในช่วงความยาวคลื่นที่มีพลังงานมากพอจากภายนอก เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากแสงหลอดไฟ เป็นต้น ที่ VB จะมีอิเล็กตรอน (electron, e^-) อยู่เป็นจำนวนมากเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงอิเล็กตรอนที่ VB จะเคลื่อนที่ไปยังชั้น CB ทำให้เกิดช่องว่าง (hole, h^+) หรือประจุบวกขึ้นที่ VB ทำให้มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ (organic compound) ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ



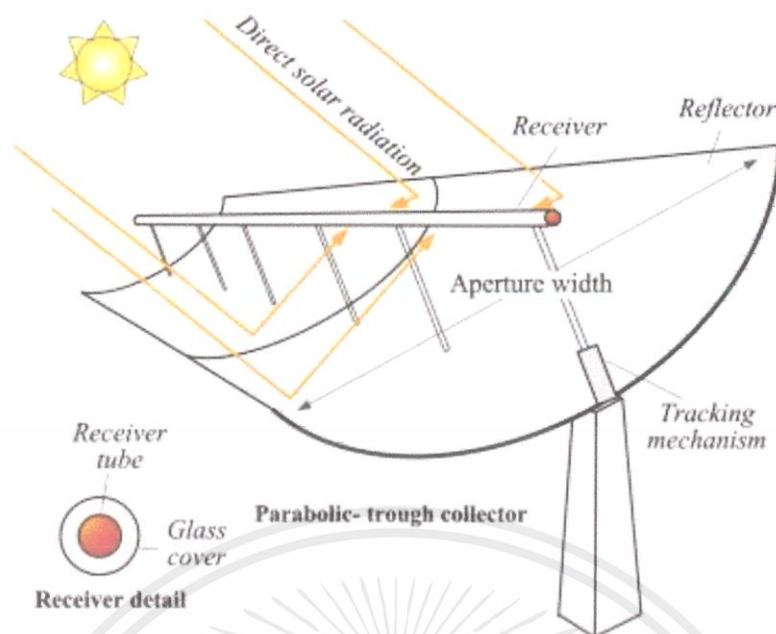
ภาพที่ 2.11 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ [8]

2.12 เครื่องปฏิกรณ์ทางแสง (Photoreactor)

เครื่องปฏิกรณ์ทางแสง เป็นเครื่องที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้แสงจากดวงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา สามารถแบ่งตามการออกแบบระบบเครื่องได้เป็น 2 แบบ คือ

2.12.1 ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ concentrating solar reactors

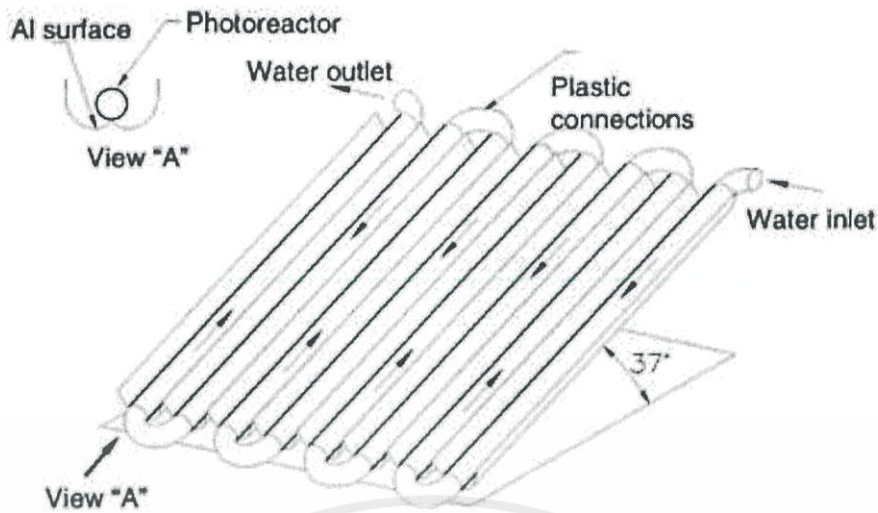
ระบบแบบ concentrating solar reactors เป็นระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แสงอาทิตย์ในการกระตุ้นให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา โดยชิ้นส่วนมีการเคลื่อนไหวเนื่องจากมีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์ (solar tracking mechanism) ลักษณะการออกแบบระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ concentrating solar reactors มีประสิทธิภาพสูงและนิยมใช้ในด้านการบำบัดน้ำเสีย เรียกว่าคือ parabolic-trough collectors (PTC) ตามแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์เพื่อให้แสงอาทิตย์ตกกระทบบในแนวตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวสะท้อน (reflector surface) ตลอดเวลาให้รวมแสงได้มากที่สุดเพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.12 ระบบเครื่องปฏิกรณ์ทางแสงแบบ PTC [9]

2.12.2 ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ non-concentrating solar reactors

ระบบแบบ non-concentrating solar reactors เป็นระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แสงอาทิตย์ในการกระตุ้นให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าว ชิ้นส่วนจะไม่มีเคลื่อนไหวเนื่องจากไม่มีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์ (non-solar tracking mechanism) ระบบแบบ non-concentrating solar reactors มีหลายชนิด เช่น compound parabolic collectors , flat plate solar ponds , optical fiber collectors และ double skin sheet reactors เป็นต้น ซึ่งระบบแบบ compound parabolic collectors (CPC) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานด้านการบำบัดน้ำเสีย การออกแบบดังแสดงในภาพที่ 2.13 การออกแบบระบบเครื่องปฏิกรณ์ทางแสงแบบ non-concentrating solar reactors ถือเป็นระบบที่สามารถใช้งานภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงกว่าสำหรับการใช้ด้านการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ concentrating ในขณะที่ระบบแบบ concentrating จะมีประสิทธิภาพด้านการผลิตพลังงาน (energy generation) เป็นหลัก



ภาพที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์ทางแสงแบบ CPC [10]

ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ compound parabolic collectors เป็นระบบที่ไม่มีการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนประกอบเนื่องจากไม่มีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์ ซึ่งระบบระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ compound parabolic collectors ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ คือ หลอดแก้วเก็บแสงแดดและแผ่นสะท้อนแสง

หลอดเก็บแสงแดด (tube solar collectors) หรือส่วนที่ทำปฏิกิริยา (reactor) เป็นหลอดท่อที่มีลักษณะเป็นหลอดกลวงใส เพื่อให้แสงลอดผ่านไปได้ โดยมีคุณสมบัติในการป้องกันการสูญเสียความร้อนให้น้อยที่สุด ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานความร้อน

แผ่นสะท้อนแสง หรือ (reflector) ส่วนใหญ่จะเป็นแผ่นที่ทำจากวัสดุที่มีความคงทน ป้องกันต่อการกัดกร่อน สามารถยืดหยุ่นได้ และที่สำคัญสามารถสะท้อนแสงได้ดี เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น โดยออกแบบให้มีความโค้งงอ มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมสองอันติดกัน ซึ่งเป็นลักษณะของพาราโบลาสองอันทำมุมกันและกัน ดังภาพที่ 2.14

การตกกระทบของแสงแดดไปยังแผ่นสะท้อนแสง ซึ่งอยู่ข้างใต้หลอดแก้วนั้น ดังภาพที่ 2.15 แสงที่ตกกระทบเป็นแบบกระจายตัวนั้นก็จะสะท้อนเข้าไปที่หลอดแก้วอย่างพอดี ไม่ว่าจะแสงแดดจะตกกระทบมาทิศทางใดก็ตาม จะสามารถสะท้อนเข้าสู่หลอดแก้วได้ทั้งหมด



ภาพที่ 2.14 แผ่นสะท้อนแสงอลูมิเนียม [11]



ภาพที่ 2.15 การตกกระทบของแสงแบบต่าง ๆ ลงบนแผ่นสะท้อนแสง [12]

การนำระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ compound parabolic collectors ไปใช้งาน เนื่องจากระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ compound parabolic collectors นี้ให้ประสิทธิภาพที่สูงจึงสามารถนำไปใช้ในด้าน การบำบัดน้ำเสีย จะเป็นในส่วนของภาคอุตสาหกรรม เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่มีการใช้สี ย้อมมาทำการย้อมผ้า ทำให้ต้องใช้น้ำในการชำระล้างสีย้อมเป็นจำนวนมาก แล้วปล่อยสีย้อมออกมา มากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

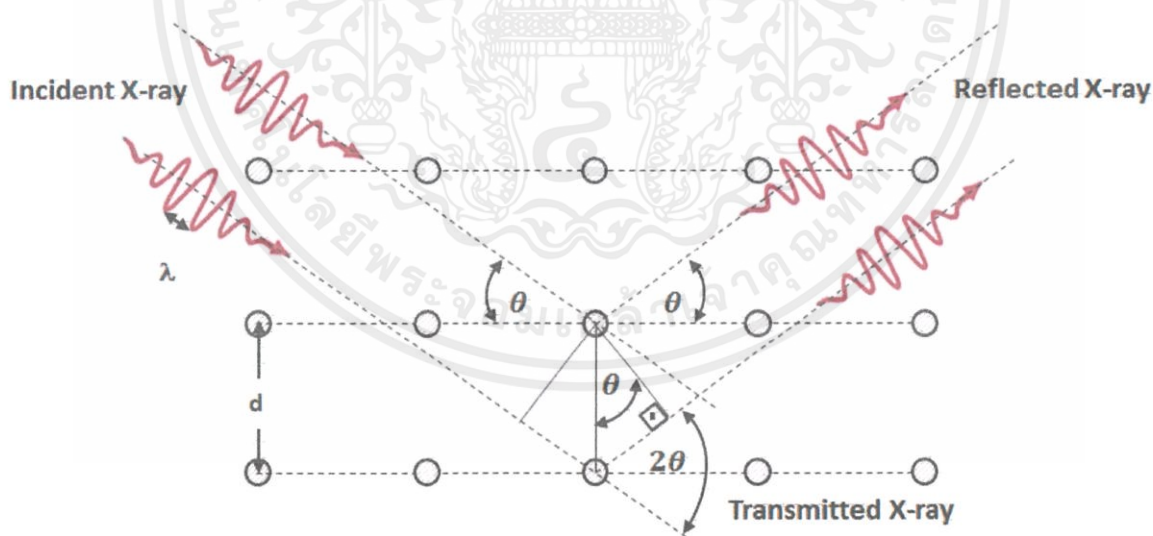
2.13 การตรวจวิเคราะห์ (Characterization)

2.13.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทางด้านวัสดุศาสตร์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ (X-ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative)

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่ชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กันโดยมีหัววัดสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์การในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน ก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะทดสอบเปลี่ยนแปลง

โดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกของวัสดุ ใช้หลักการตามสมการกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ 2.2



ภาพที่ 2.16 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดยเมื่อค่า d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม

θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

n คือ เลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

การคำนวณหาขนาดของผลึก (crystalline size) โดยจะใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 2.3

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.3)$$

โดยเมื่อค่า D คือ ขนาดของผลึก

K คือ ค่าคงที่เชอร์เรอร์ (สำหรับ $\text{CuK}\alpha = 0.94$)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่หักเห (สำหรับ $\text{Cu K}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$)

β คือ ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง

θ คือ ตำแหน่งมุมหักเหของพีค

2.13.2 เครื่องวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงและค่าการสะท้อนแสง (UV-Visible diffuse reflectance spectroscopy, UV-Vis DRS)

เครื่องวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงและค่าการสะท้อนแสง เป็นเครื่องที่ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงและค่าการสะท้อนของแสงของตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง สามารถตรวจวัดได้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ (Visible) อีกทั้งยังสามารถหาค่าแถบพลังงาน (E_g) ได้จากสมการการสะท้อนแสง (kubelka-munk function) ดังสมการที่ 2.4

$$F(R') = \frac{(1-R')^2}{2R'} \quad (2.4)$$

$$F(R')hv = \gamma\sqrt{hv - E_g} \quad (2.5)$$

เมื่อ R' คือ ค่าการสะท้อนแสง ซึ่งได้ค่ามาจากการตรวจวัด แทนค่าการสะท้อนแสงในฟังก์ชัน R' แล้วนำไปหาค่าตามสมการที่ 2.5 แล้วจึงหาค่า hv จากสมการแพลงค์ ดังในสมการที่ 2.6 จะได้ฟังก์ชัน R' คูณกับ hv นำค่าไปยกกำลังสอง จะได้เป็นค่ากราฟแนวแกน Y ส่วนแนวแกน X เป็นค่า hv แล้วนำไปพลอตกราฟหาค่าแถบพลังงาน

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad (2.6)$$

2.13.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดใช้ศึกษาพื้นผิวของเซลล์หรือพื้นผิวของตัวอย่างวัตถุที่นำมาศึกษา โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนพื้นผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่าน condenser lens เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสโดย objective lens ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและกราดในระนาบ xy หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ จะถูกบันทึก และแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และชักนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป

เมื่อลำอิเล็กตรอนเข้าชนชิ้นงานจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมในสารตัวอย่างซึ่งหากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ชนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน หากอิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถแทรกผ่านชิ้นงานได้ลึก โอกาสเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็น้อยลง ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน

หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนจะเลือกเฉพาะสัญญาณที่ต้องการเนื่องจากบริเวณผิวจะมีสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของชิ้นงานและอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนหลายชนิด หากสัญญาณที่ต้องการนำไปสร้างภาพคือ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าจากหัววัดสัญญาณ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะมีพลังงานต่ำจึงเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงานเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่หัววัดสัญญาณจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชน scintillator ทำให้เกิดโฟตอน ซึ่งถูกส่งไปตาม Light Guide เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปขยายสัญญาณต่อไป

2.13.4 เครื่องวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสง (UV-visible spectroscopy)

UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และแสงที่มองเห็นได้ ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่าง ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวที่ ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ซึ่งเรียกว่า spectrum

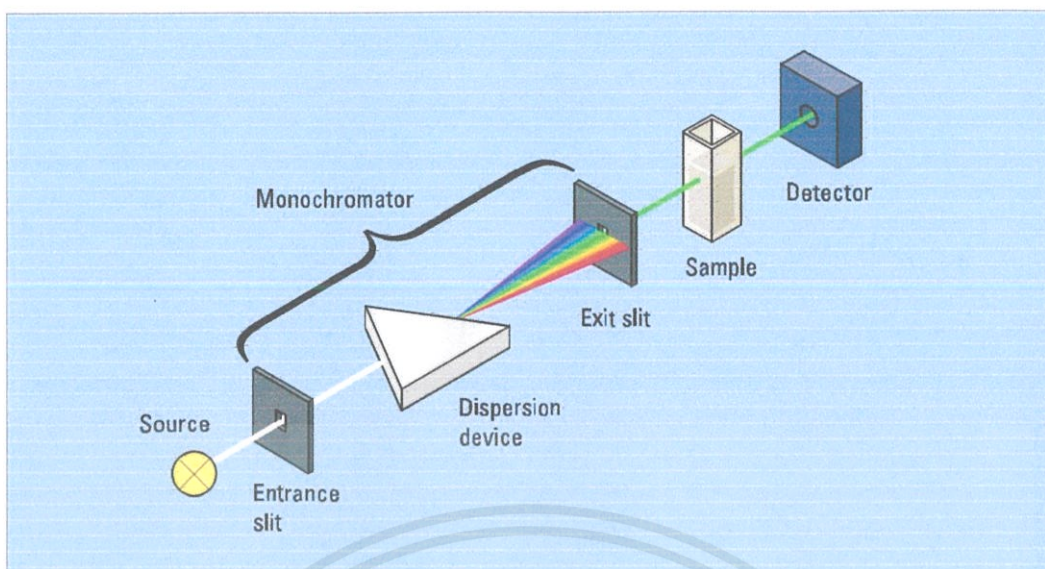
ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ประกอบไปด้วยดังนี้ ดังภาพที่ 2.17

1. light source แหล่งกำเนิดแสง หรือ รังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง Visible ใช้หลอดให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น

2. monochromator เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือ เกรตติง

3. cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า cuvettes ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



ภาพที่ 2.17 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV visible spectroscopy [14]

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. single-beam spectrophotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สัญญาณ เนื่องจาก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

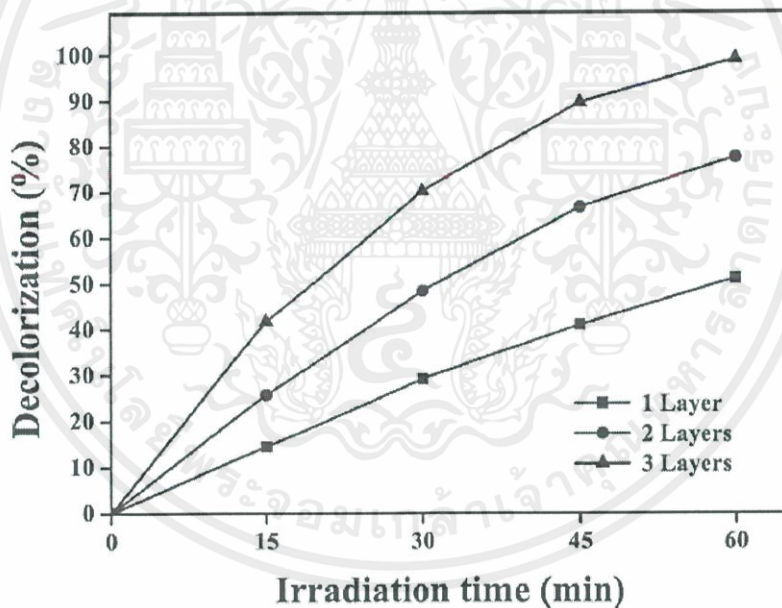
2. double-beam spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ A. Bouarioua และ M. Zerdaoui [16] ได้ทำการวิจัยทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกทำให้ตรึงบนพื้นผิวแก้วโดยวิธีการจุ่มเคลือบสามชั้น ซึ่งในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ เตรียมโดยจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาตร 60 มิลลิลิตร ผสมรวมกับเมทานอลต่อน้ำ 30/70% (w/w) แล้วนำไปสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก 15 นาที ให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นใส่กรดไนตริกให้ได้ pH 3 เพื่อให้มีการติดแน่นระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับฐานรองรับ

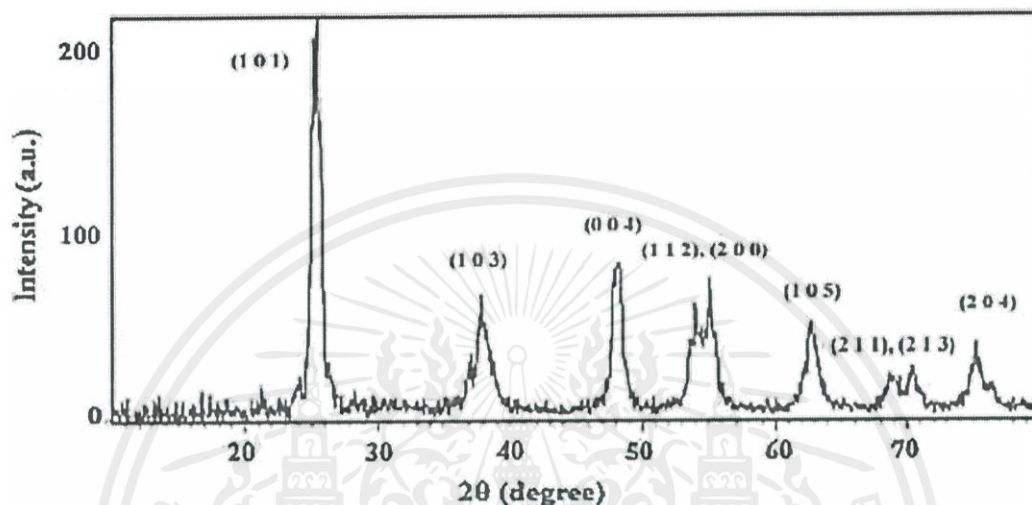
ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งถูกเคลือบ 3 ชั้น ได้จากเทคนิคการเคลือบจุ่ม มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีตามต้งแสดงในภาพที่ 2.18 และตรวจวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า มีเฟสของอนาเทสที่เสถียรกับโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้นกับจำนวนชั้น ระหว่างขั้นตอนการเคลือบฐานรองรับแก้วถูกปกคลุมไปด้วยอนุภาคฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 2.18 จำนวนชั้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบบนแก้วในสารเมทาซิน ออเรน [16]

งานวิจัยของ F. Zahedi และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ โดยมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืชภายใต้แสงอาทิตย์ ฟิล์มบางไทเทเนียม

ไดออกไซด์ได้ถูกเคลือบลงบนเม็ดแก้วและเตรียมโดยวิธีโซล-เจล ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายและถูก ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังภาพที่ 2.19 พบว่าพีคเด่นเป็นพีคของเฟสอนาเทส ไม่พบเฟสของรูไทล์ ซึ่งเฟสอนาเทสจะเป็นเฟสที่เกิดการเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ดีกว่าเฟสรูไทล์ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบลงบนเม็ดแก้วยังคงเสถียรและสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้งอีกด้วย



ภาพที่ 2.19 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง N, S / TiO₂ [17]

งานวิจัยของ M. Rocío Espino-Estévez [18] และคณะ ได้ทำการศึกษาการเตรียมการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเสถียรและมีการกระตุ้นทางแสงที่สูง ด้วยวิธีการที่ง่ายและไม่แพง โดยใช้เมทานอลในการเป็นสารกระจายของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้มีขนาดของการรวมตัวเฉลี่ยใหญ่กว่าการใช้เอทานอล เนื่องจากขนาดของการรวมตัวเฉลี่ยใหญ่ขึ้น พันธะภายในโมเลกุลของเมทานอล เมื่อเทียบกับเอทานอล ซึ่งการใช้เมทานอลทำให้มีการยึดเกาะกับแก้วได้น้อย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

โครงการพิเศษนี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินงานเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองเป็นส่วนวิธีการดำเนินงาน และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของการตรวจวิเคราะห์

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium (IV) Isopropoxide ,TTIP) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ดังแสงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 สารไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์

3.1.1.2 เอทานอล (Ethanol absolute ,EtOH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

3.1.1.4 ลิวคูซีน (treated leucoxene) เป็นแร่ธรรมชาติของไทยที่ได้ผ่านการสกัดมาแล้ว โดยผ่านการบดแบบ (ball-milling) ในน้ำไร้ประจุ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ลิวคูซีนที่ผ่านกระบวนการสกัดมาแล้ว

3.1.1.5 น้ำไร้ประจุ (DI water)

3.1.1.6 กรดไนตริก (nitric acid, HNO_3)

3.1.1.7 สีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B , RhB)

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องปฏิกรณ์ทางแสง (CPC photocatalytic reactor)

3.1.2.2 เม็ดแก้ว (borosilicate glass beads) ขนาด 6 มิลลิเมตร

3.1.2.3 เครื่องกวนสาร (stirrer)

3.1.2.4 เครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonic)

3.1.2.5 เครื่องเตาอบ (oven)

3.1.2.6 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง (furnace)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง

3.1.2.7 เครื่องชั่งสาร

3.1.2.8 เครื่องจุ่มเคลือบ (dip coater)



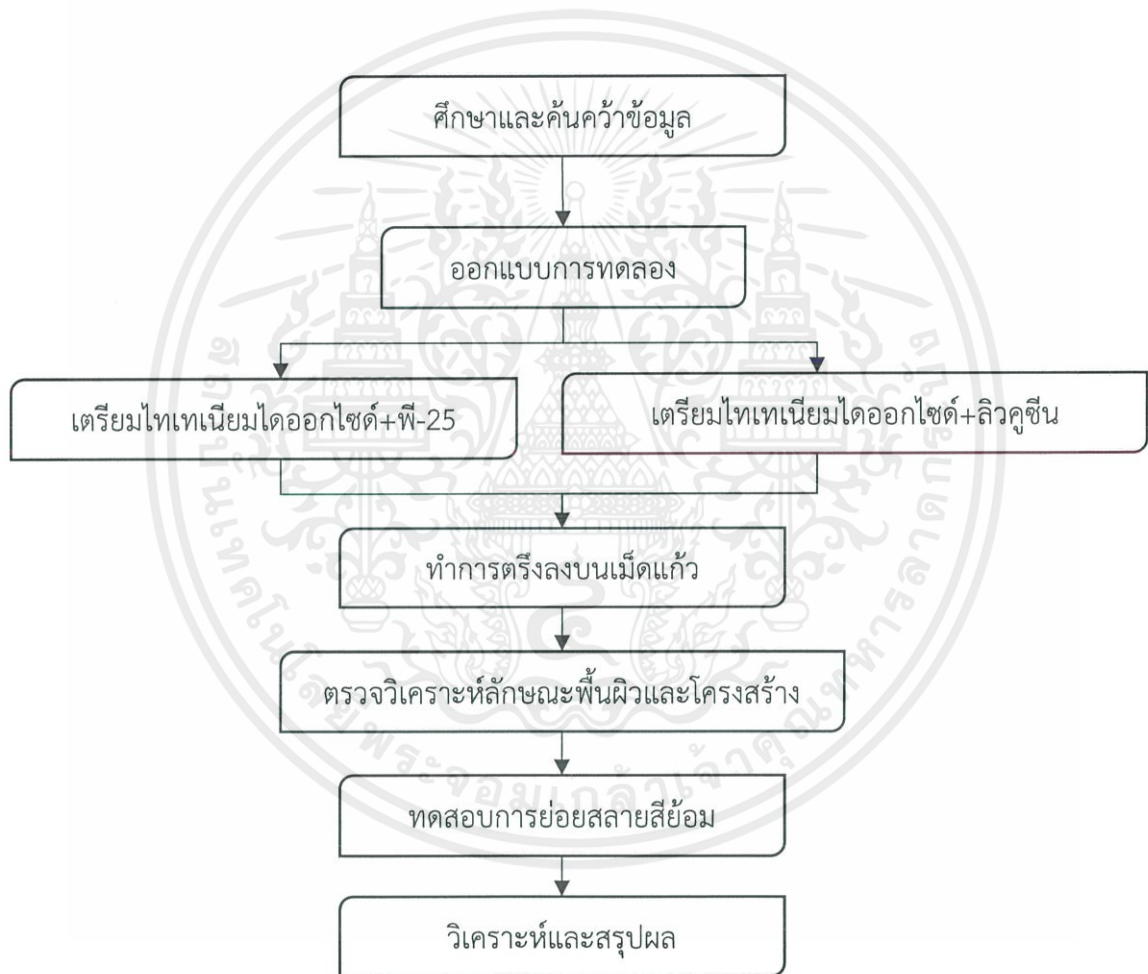
ภาพที่ 3.4 เครื่องจุ่มเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.2.9 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)
- 3.1.2.10 ปีกเกอร์ (beaker)
- 3.1.2.11 กระดาษทดสอบค่ากรด-เบส (pH-indicator)
- 3.1.2.12 อะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ตามแผนผังตามภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการพิเศษ

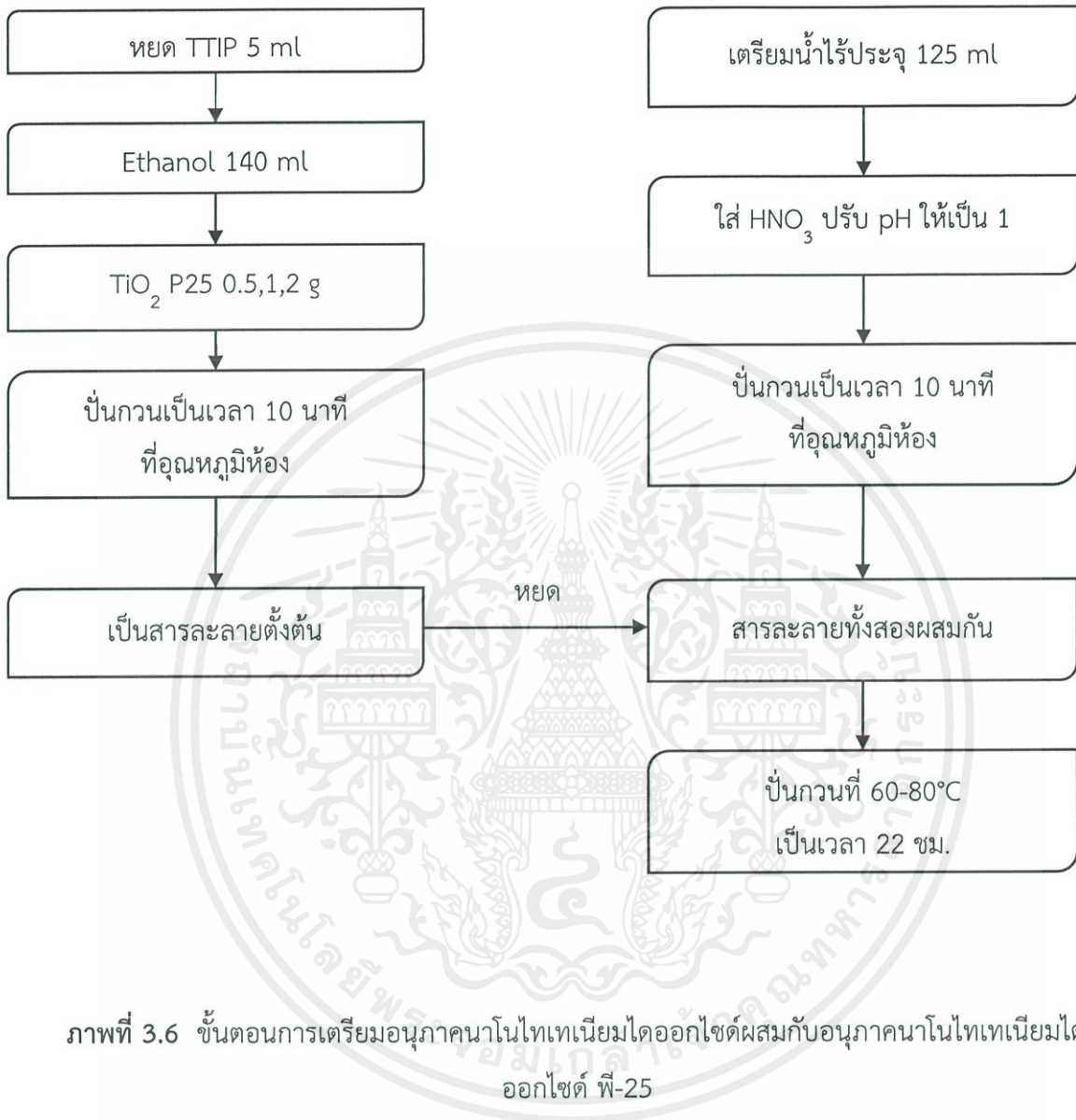
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25

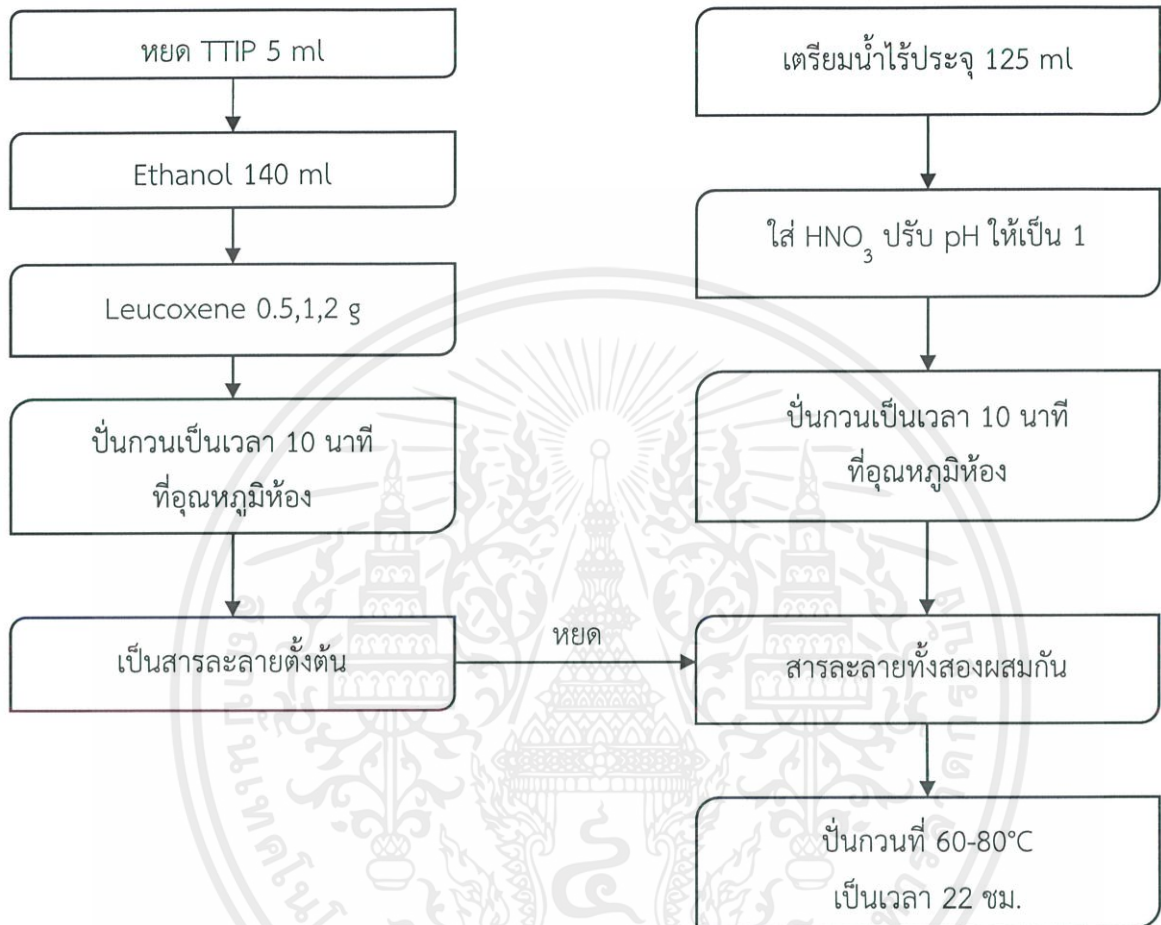
การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-gel method) เริ่มจากใช้ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium(IV) Isopropoxide ,TTIP) เป็นสารตั้งต้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปละลายผสมกับเอทานอล (Ethanol absolute) ปริมาตร 140 มิลลิลิตร โดยการหยดทีละหยด (Dropwise) ใส่ผงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ลงไป มี 3 เงื่อนไข คือ 0.5 , 1 และ 2 กรัม แล้วนำไป sonicate เป็นเวลา 5-10 นาที สารละลายที่ได้นำไปปั่นกวนที่ความเร็ว 200-300 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เตรียมน้ำไร้ประจุ (DI water) ปริมาตร 125 มิลลิลิตร แล้วปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 1 โดยใช้กรดไนตริก (Nitric acid) นำไปปั่นกวนที่ความเร็ว 200-300 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีเช่นกัน จากนั้นนำสารละลายมาผสมกับสารละลายข้างต้นโดยวิธีการหยดทีละหยด (Dropwise) แล้วปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จะได้เป็นสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ตามภาพที่ 3.6

3.2.2 การเตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน

การเตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล เริ่มจากใช้ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ เป็นสารตั้งต้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปละลายผสมกับเอทานอล ปริมาตร 140 มิลลิลิตร โดยการหยดทีละหยด ใส่ผงลิวคูซีนลงไป มี 3 เงื่อนไข คือ 0.5 , 1 และ 2 กรัม แล้วนำไป sonicate เป็นเวลา 5-10 นาที สารละลายที่ได้นำไปปั่นกวนที่ความเร็ว 200-300 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เตรียมน้ำไร้ประจุ ปริมาตร 125 มิลลิลิตร แล้วปรับค่า pH ให้ได้เท่ากับ 1 โดยใช้กรดไนตริก นำไปปั่นกวนที่ความเร็ว 200-300 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีเช่นกัน จากนั้นนำสารละลายมาผสมกับสารละลายข้างต้นโดยวิธีการหยดทีละหยด แล้วปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จะได้เป็นสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน ตามภาพที่ 3.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนเม็ดแก้ว

ก่อนการตรึงเม็ดแก้ว ต้องทำการล้างทำความสะอาดเม็ดแก้วก่อน โดยล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาด ก่อนนำไปล้างอะซิโตน เอทานอล และน้ำไร้ประจุ อย่างละ 5 นาที ตามลำดับ ในเครื่องสั่นความถี่สูง จากนั้นนำไปเข้าในเตาอบ เพื่อให้เม็ดแก้วแห้ง

การตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะใช้วิธีการเคลือบแบบจุ่ม ทำการเคลือบ ครั้งละ 2 นาที ซึ่งอัตราความเร็วอยู่ที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วนำไปเข้าเตาอบ อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที โดยจะทำการเคลือบ 10 ครั้ง หลังจากทำการตรึง ก็จะนำไปเข้าเครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.4 การทดสอบย่อยสลายสีย้อม

3.2.3.1 การทดสอบการย่อยสลายสีย้อมในบีกเกอร์ เป็นการทดสอบเพื่อเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดไป ทดลองย่อยสลายสีย้อมในเครื่องปฏิกรณ์ จะทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ ด้วยสารละลายสีย้อมโรดามีน บี โดยจะเริ่มจากเงื่อนไขแบบมืดก่อน (dark condition) ซึ่งจะเก็บสารละลายไว้ครั้งละ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

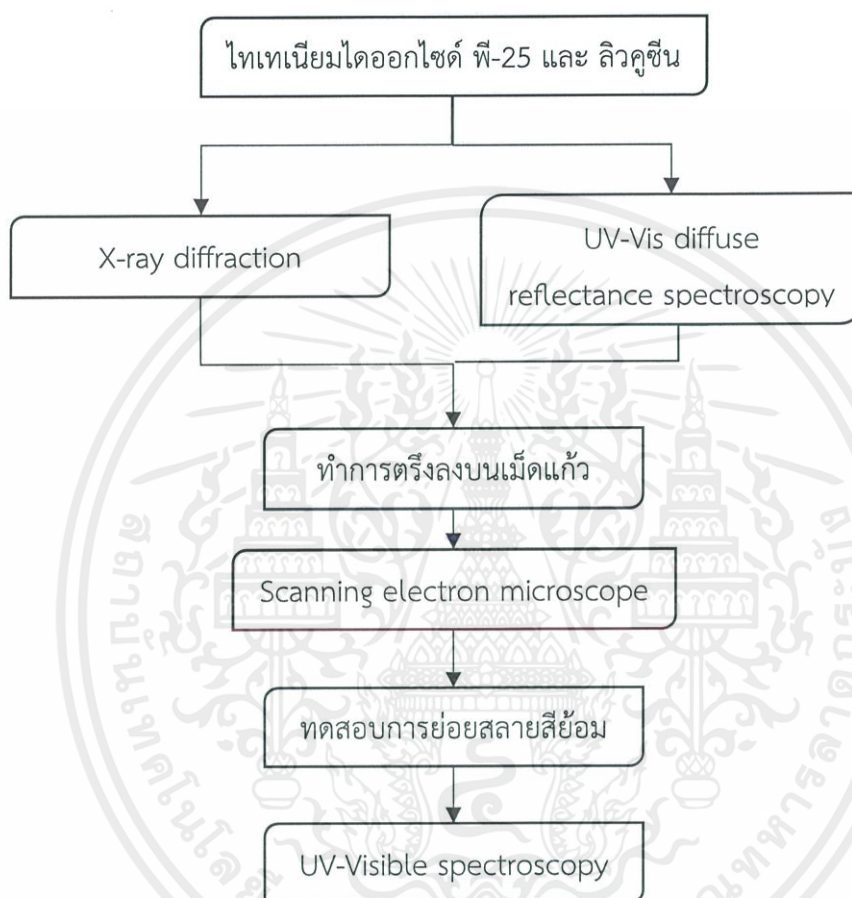
3.2.3.2 การทดสอบการย่อยสลายสีย้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ ทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์ ด้วย สารละลายสีย้อมโรดามีน บี เป็น โดยจะเริ่มจากเงื่อนไขแบบมืดก่อน ซึ่งจะเก็บสารละลายไว้ครั้งละ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เช่นกัน

3.3 การตรวจสอบวิเคราะห์ (Characterization)

ทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซินด้วย เครื่อง X-ray diffraction (XRD) ตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเม็ดแก้วที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาค นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซิน ว่ามีพื้นผิวที่ ประกอบด้วยองค์ประกอบของธาตุใดบ้าง ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope, Energy-dispersive X-ray spectroscopy ทำการตรวจสอบค่าการสะท้อนแสงและค่าแถบพลังงานของอนุภาค นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซิน ด้วยเครื่อง UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS) ตรวจวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงในการทำทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วย

แสงของเม็ดแก้วที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน เพื่อทำการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี

ขั้นตอนการตรวจสอบวิเคราะห์ห้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ลิวคูซีน และเม็ดแก้วที่เคลือบแล้ว แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการตรวจสอบวิเคราะห์ห้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ลิวคูซีน และเม็ดแก้วที่เคลือบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

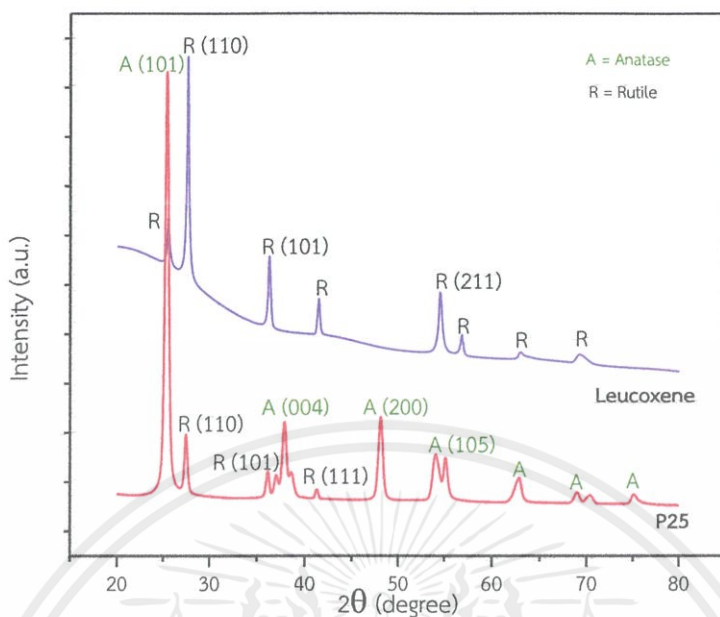
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซีนที่ผ่านการสกัดแล้ว ด้วยการทำการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจดูธาตุและสารประกอบที่อยู่บนพื้นผิวของเม็ดแก้วที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซีน ด้วยเครื่อง energy-dispersive x-ray spectroscopy หาค่าการสะท้อนแสง ค่าแถบพลังงาน ด้วยเครื่อง UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy และนำไปทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalytic activity) โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV-Visible spectroscopy เพื่อทำการตรวจสอบการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี

4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิควูซีน ผลพบพีคอยู่ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ประกอบด้วยพีคที่เด่นชัดอยู่ที่มุมประมาณ 25.5° , 27.73° , 36.1° , 37.8° , 41.2° , 48.2° , 53.9° โดยมีระนาบดังนี้ (101), (110), (101), (004), (111), (200), (105) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตรวจสอบแล้วอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 เป็นโครงสร้างผลึกที่รวมกันระหว่างโครงสร้างเฟสแบบอนาเทส กับโครงสร้างเฟสแบบรูไทล์ โดยที่ระนาบ (110), (101) และ (111) เป็นโครงสร้างเฟสแบบรูไทล์ ซึ่งมีสัดส่วนเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ และมีโครงสร้างเฟสแบบอนาเทสอยู่ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ [19]

ผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของลิควูซีน พบว่าลิควูซีน พบว่ามีพีคอยู่ที่มุมประมาณ 27.6° , 36.1° และ 54.5° โดยมีระนาบ (110), (101) และ (211) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตรวจสอบแล้วพบว่า มีโครงสร้างเป็นเฟสแบบรูไทล์ทั้งหมด [20]



ภาพที่ 4.1 กราฟผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน

4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลการตรวจสอบธาตุและสารประกอบด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

4.2.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM)

ก่อนการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะแสดงภาพของเม็ดแก้วที่เม็ดแก้วที่ไม่ได้ทำการเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา สังเกตได้ว่ามีความใส สะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน ดังภาพที่ 4.2 และเม็ดแก้วที่ได้ทำการตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน ที่ปริมาณต่าง ๆ หลังจากที่ได้ทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

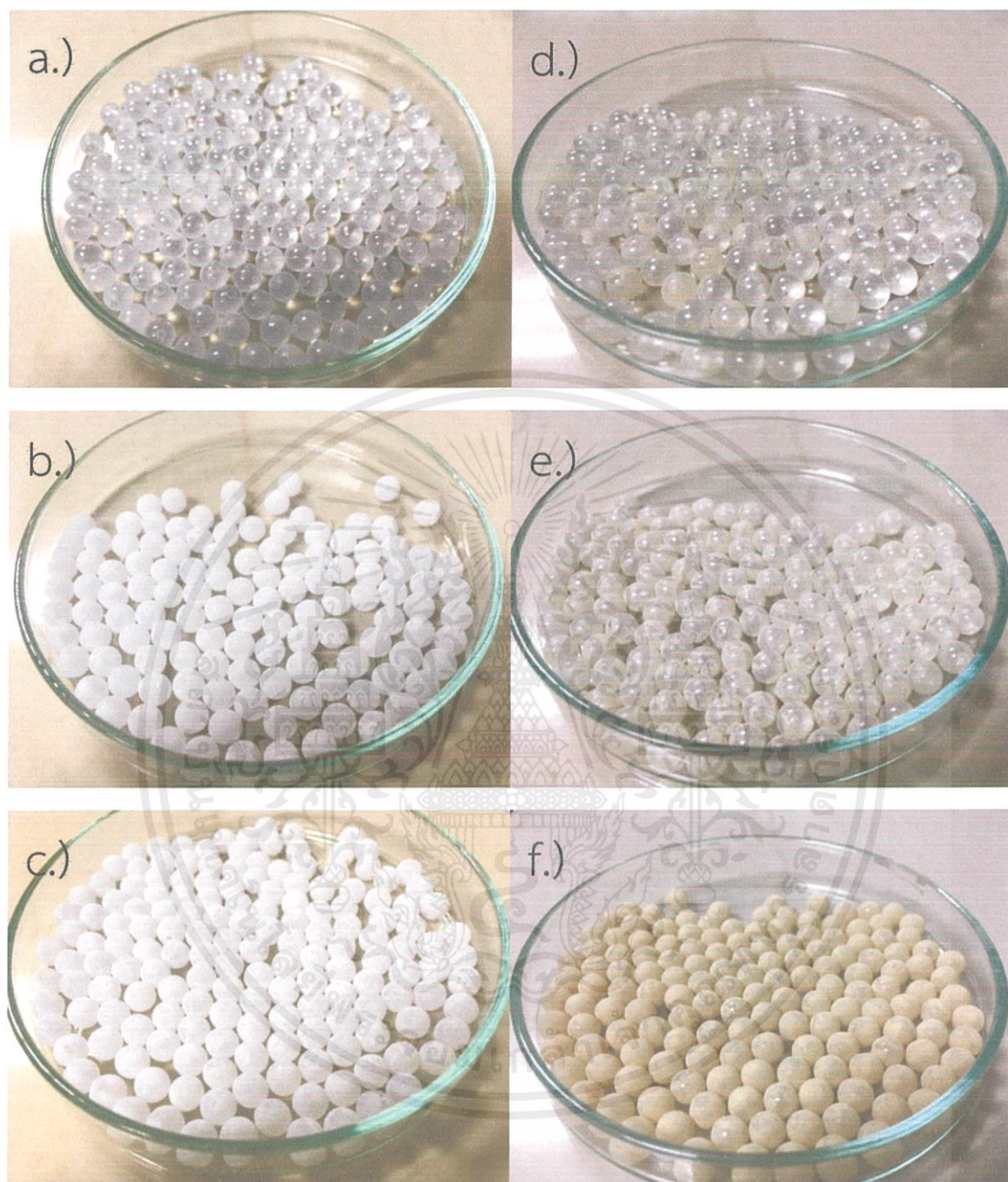
จากการตรวจสอบวิเคราะห์พื้นผิวของเม็ดแก้วที่ได้ทำการเคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิควูซัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าที่พื้นผิวของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ที่ปริมาณ 0.5 กรัม มีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเกาะอยู่ไม่มากนัก ดังในภาพที่ 4.4 a.) แต่เมื่อได้ทำการเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 เป็น 1 และ 2 กรัม ทำให้เห็นชัดเลยว่ามีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มาเกาะที่พื้นผิวของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นตามปริมาณ และมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังในภาพ 4.4 b.) และ c.) ลิควูซันที่ได้ทำการเคลือบลงไปบนเม็ดแก้วนั้นมีการกระจายตัวที่ดีในทุกตัวอย่างแต่จะสังเกตเห็นได้ว่าการแตกเป็นร่องรอย ดังภาพที่ 4.4 d.) และ e.) ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดความเค้นเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา แต่ที่ภาพ 4.4 f.) สังเกตได้ว่ามีพื้นผิวที่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวได้ดี อย่างเป็นระเบียบ

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ในขั้นตอนการทำการทดลองพบว่า สารตั้งต้น สารไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ เป็นตัวที่ทำให้อนุภาครวมตัวกันเป็นโครงร่างตาข่าย เป็นตัวที่ทำให้มีอนุภาคมามากที่พื้นผิวมันได้ และเป็นตัวเชื่อมกันระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิควูซันกับพื้นผิวเม็ดแก้ว ในกระบวนการโซลเจล เมื่อเราทำให้อยู่ในสถานะที่เป็นกรด ส่วนเอทานอลนั้นเป็นตัวที่ทำให้สารไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์กลายเป็นโซลเจล



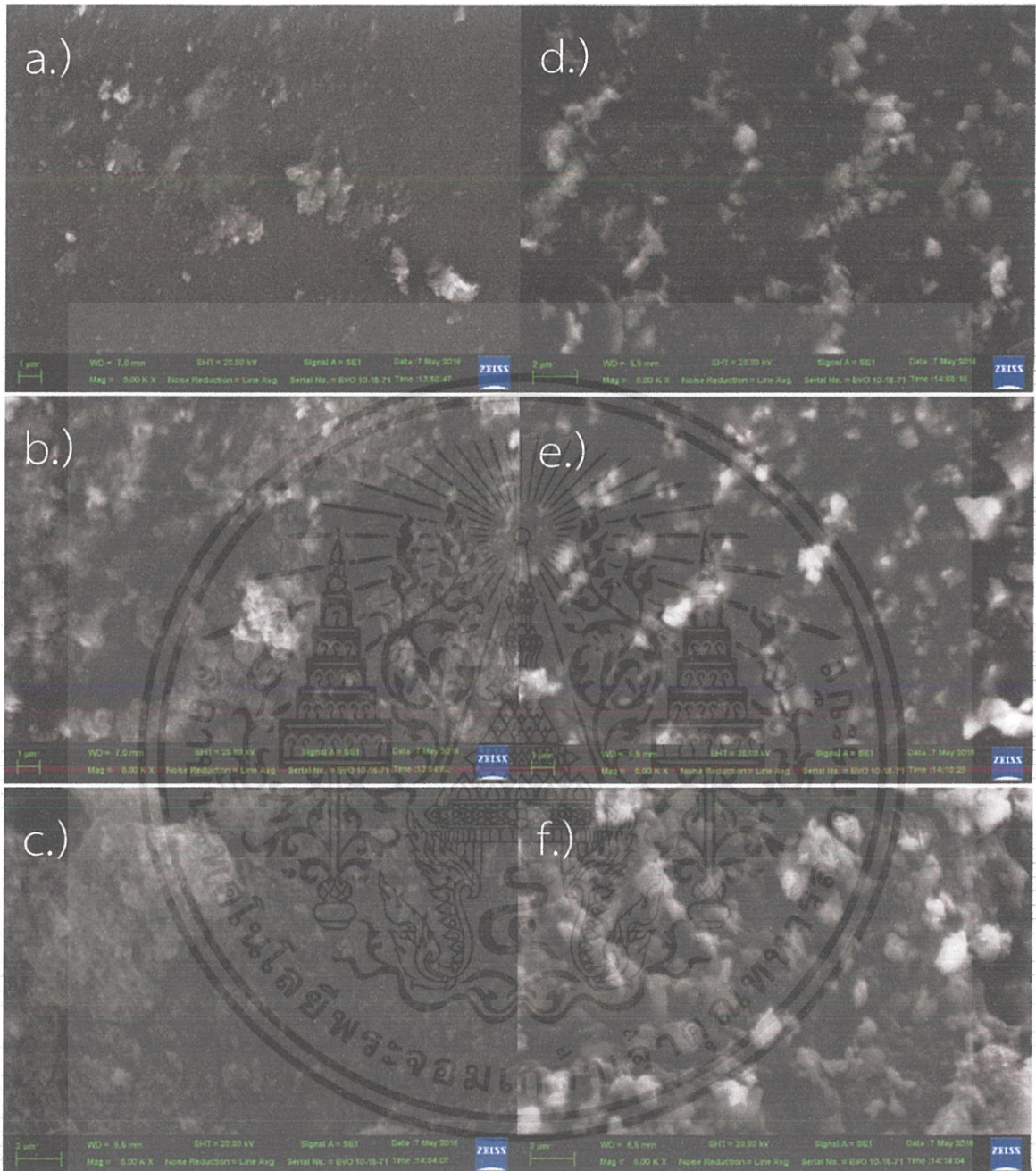
ภาพที่ 4.2 เม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนโพลีเพนิมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ (a.) พี-25 0.5 กรัม (b.) พี-25 1 กรัม (c.) พี-25 2 กรัม (d.) ลิวคูซีน 0.5 กรัม (e.) ลิวคูซีน 1 กรัม (f.) ลิวคูซีน 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และลิควูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ (a.) พี-25 0.5 กรัม (b.) พี-25 1 กรัม (c.) พี-25 2 กรัม (d.) ลิควูซีน 0.5 กรัม (e.) ลิควูซีน 1 กรัม (f.) ลิควูซีน 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการตรวจสอบธาตุและสารประกอบด้วยเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy

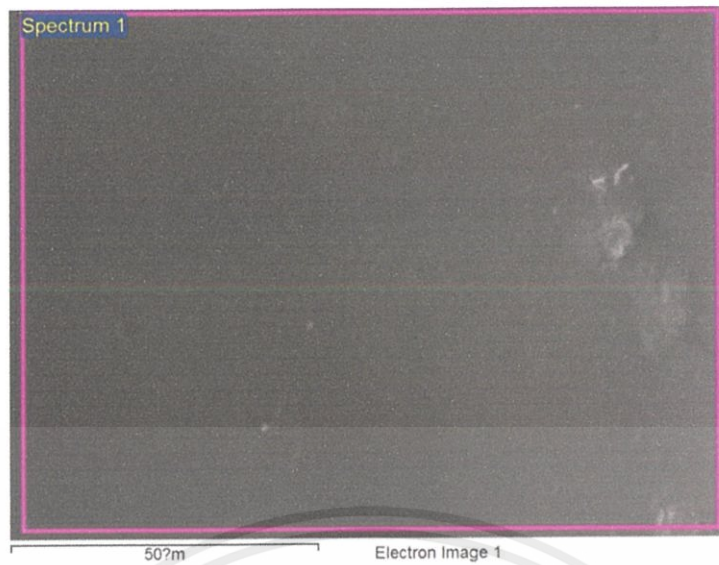
ตรวจสอบธาตุและสารประกอบด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy ซึ่งไม่ได้เลือกมาตรวจสอบในทุกเงื่อนไข แต่จะเลือกมาตรวจบางเงื่อนไขเท่านั้น เพราะว่าบางเงื่อนไขเกิดจากการเคลือบด้วยธาตุและสารประกอบเดียวกัน จึงทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องตรวจสอบทุกเงื่อนไข โดยเงื่อนไขที่นำมาตรวจสอบ มีสามเงื่อนไข ดังนี้ เม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ปริมาณ 2 กรัม และเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน ปริมาณ 2 กรัม

4.2.2.1 เม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ

การตรวจสอบธาตุและสารประกอบด้วยเครื่อง energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) บนเม็ดแก้วที่ไม่ได้ทำการเคลือบ ซึ่งเม็ดแก้วที่ไม่ได้ทำการเคลือบนี้ได้ทำการชำระล้างทำความสะอาดด้วย Acetone , Ethanol และ DI water อย่างละ 5 นาที แล้วทำการอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้เม็ดแก้วแห้ง ก่อนนำไปตรวจสอบหาธาตุและสารประกอบ

จากผลการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของเม็ดแก้วตามภาพที่ 4.5 พบว่า เจอธาตุออกซิเจน (oxygen) ธาตุซิลิกอน (silicon) ธาตุโซเดียม (sodium) ธาตุแมกนีเซียม (magnesium) ธาตุแคลเซียม (calcium) และธาตุอะลูมิเนียม (aluminium) ดังแสดงในภาพที่ 4.6

จากตารางที่ 4.1 พบธาตุออกซิเจนอยู่มากที่สุด มีมากถึง 58.36 เปอร์เซ็นต์ ธาตุซิลิกอน 20.34 เปอร์เซ็นต์ ธาตุโซเดียม 12.00 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแมกนีเซียม 4.01 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแคลเซียม 3.42 เปอร์เซ็นต์ และธาตุอะลูมิเนียม 1.87 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการตรวจสอบทำให้เห็นว่า มีธาตุและสารประกอบที่ประกอบอยู่ในเม็ดแก้วตรงกับเม็ดแก้วชนิด borosilicate glass beads คือ ประกอบไปด้วยซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (Silica/SiO₂) มีโซเดียมออกไซด์ (sodium oxide) มีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และแคลเซียม ซึ่งตรงตามที่ตรวจพบ [21-23]



ภาพที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ



ภาพที่ 4.6 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy แสดงธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบจากเครื่อง energy-dispersive x-ray spectroscopy

ธาตุ	น้ำหนัก %	อะตอม %
ออกซิเจน	58.36	69.97
ซิลิกอน	20.34	13.89
โซเดียม	12.00	10.01
แมกนีเซียม	4.01	3.16
แคลเซียม	3.42	1.64
อะลูมิเนียม	1.87	1.33

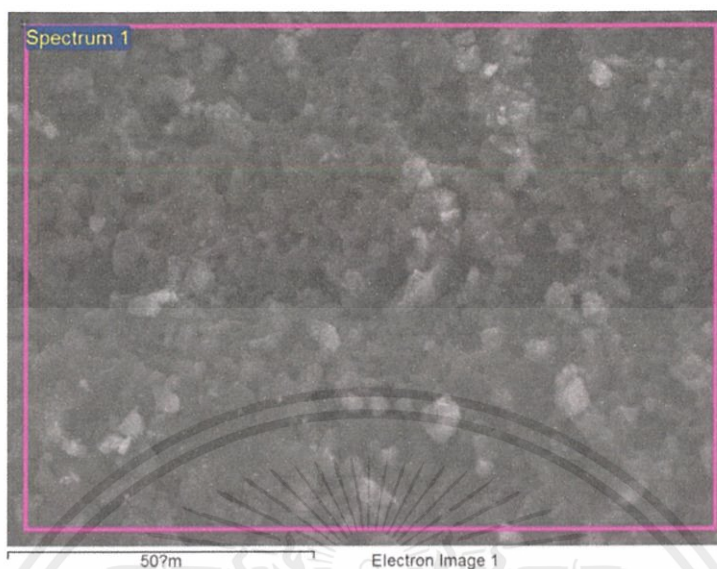
4.2.2.2 เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25

การตรวจสอบธาตุและสารประกอบบนเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ที่ปริมาณ 2 กรัม ซึ่งเม็ดแก้วที่ได้ทำการเคลือบนี้ได้ทำการชำระล้างทำความสะอาด ตามหัวข้อที่ 4.2.2.1 ก่อนนำไปตรวจสอบหาธาตุและสารประกอบ

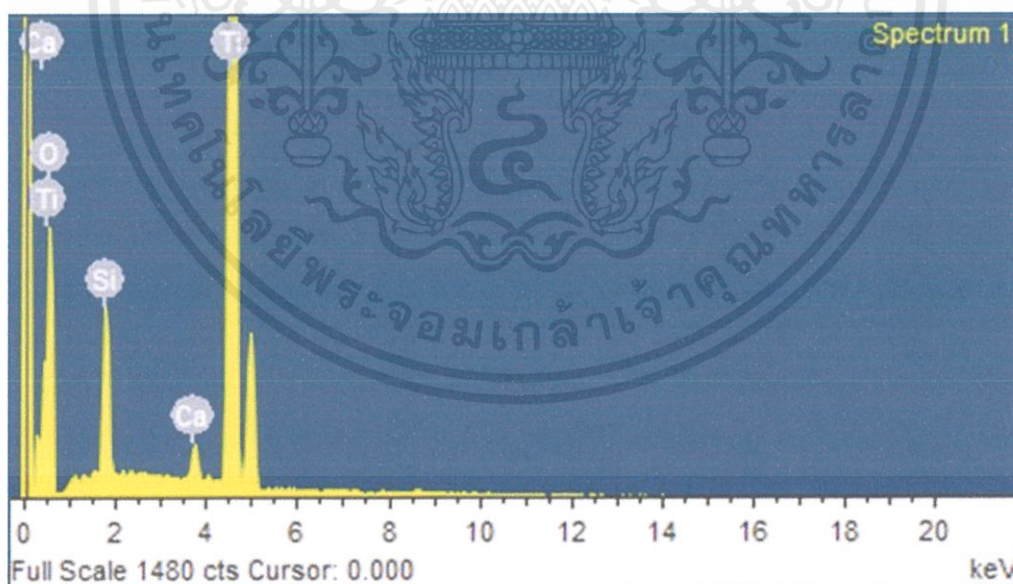
จากผลการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของเม็ดแก้วตามภาพที่ 4.7 พบว่า เจอธาตุออกซิเจน ธาตุซิลิกอน ธาตุแคลเซียม และธาตุไทเทเนียม ดังแสดงในภาพที่ 4.8

พบธาตุออกซิเจนอยู่ 44.03 เปอร์เซ็นต์ ธาตุซิลิกอน 3.07 เปอร์เซ็นต์ ธาตุ ธาตุแคลเซียม 0.86 เปอร์เซ็นต์ และธาตุไทเทเนียม 52.04 เปอร์เซ็นต์ เป็นธาตุที่พบมากที่สุด โดยจะสังเกตได้ว่าพบธาตุไทเทเนียมเพิ่มเข้ามาแทนที่การมีอยู่ของธาตุซิลิกอน ทำให้บอกได้ว่ามีอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ได้มีการเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของเม็ดแก้วอย่างชัดเจน และที่สัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมประมาณ 1 ส่วน ต่อ

ออกซิเจนประมาณ 2 ส่วน (TiO_2) และมีซิลิกอนกับแคลเซียมซึ่งเป็นธาตุที่พบในเม็ดแก้ว ตามแสดงดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25



ภาพที่ 4.8 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy แสดงธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

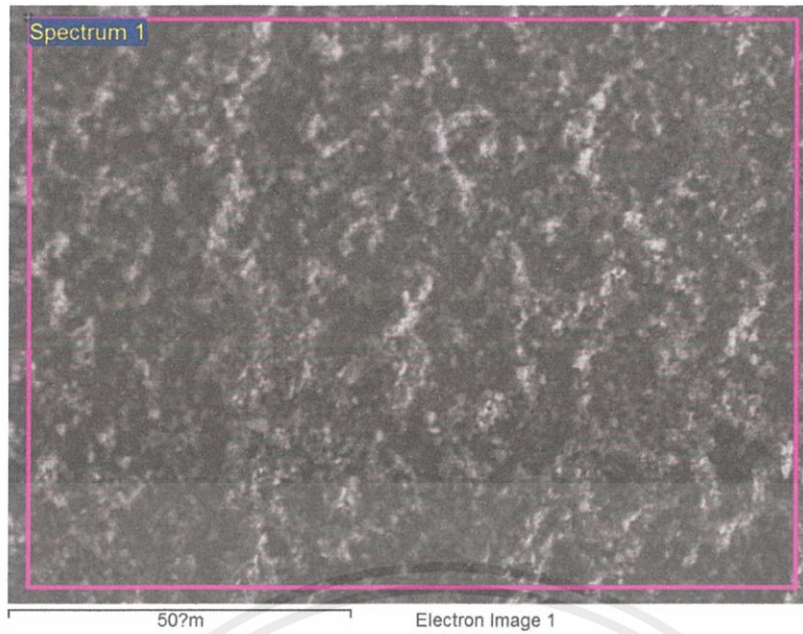
ตารางที่ 4.2 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 จากเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy

ธาตุ	น้ำหนัก %	อะตอม %
ออกซิเจน	44.03	69.33
ไทเทเนียม	52.04	27.37
ซิลิกอน	3.07	2.75
แคลเซียม	0.86	0.54

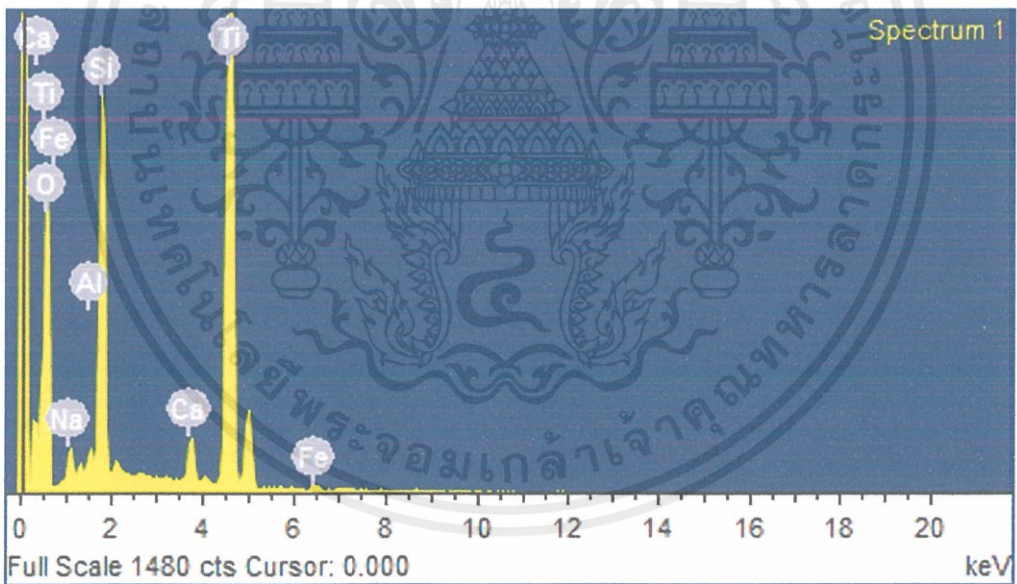
4.2.2.3 เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน

การตรวจสอบธาตุและสารประกอบบนเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน ที่ปริมาณ 2 กรัม ซึ่งเม็ดแก้วที่ได้ทำการเคลือบนี้ได้ทำการชำระล้างทำความสะอาด ตามหัวข้อที่ 4.2.2.1 ก่อนนำไปตรวจสอบหาธาตุและสารประกอบ

จากผลการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของเม็ดแก้วตามภาพที่ 4.9 พบว่า เจอธาตุออกซิเจน ธาตุไทเทเนียม ธาตุซิลิกอน ธาตุเหล็ก ธาตุอะลูมิเนียม และธาตุแคลเซียม ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยธาตุออกซิเจน ธาตุไทเทเนียม ธาตุซิลิกอน ธาตุเหล็ก และธาตุอะลูมิเนียม มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก ดังนี้ 52.06, 33.73, 9.83, 0.45, 0.71 และ 1.67 ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อเทียบกับเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 พบว่าธาตุไทเทเนียมน้อยกว่า แต่มีธาตุเหล็กเพิ่มเข้ามา ซึ่งเป็นส่วนประกอบของลิวคูซีน คือลิวคูซีนหากมีการสกัดที่ดี จะมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับไทเทเนียมไดออกไซด์เจอกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน แคลเซียม อะลูมิเนียม เป็นธาตุและสารประกอบที่พบในเม็ดแก้วทั้งสิ้น



ภาพที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงส่วนที่ตรวจสอบธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน



ภาพที่ 4.10 กราฟจากเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy แสดงธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ธาตุและสารประกอบของเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับ ลิวคูซีนจากเครื่อง Energy-dispersive x-ray spectroscopy

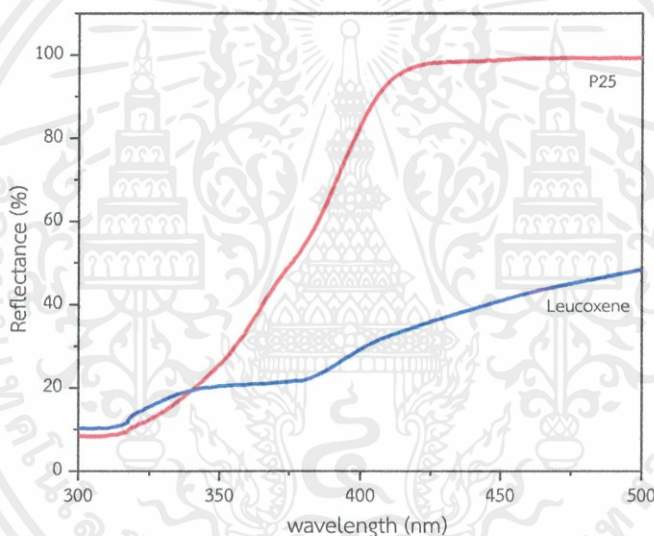
ธาตุ	น้ำหนัก %	อะตอม %
ออกซิเจน	52.06	73.09
ไทเทเนียม	33.73	15.82
ซิลิกอน	9.83	7.86
แคลเซียม	1.67	0.94
อะลูมิเนียม	0.71	0.59
เหล็ก	0.45	0.18

จากการตรวจสอบหาธาตุและสารประกอบด้วย เทคนิค Energy-dispersive X-ray ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM) พบว่าเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบจะมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบหลัก ส่วนเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหลัก ส่วนซิลิกอนและออกซิเจนก็ได้มีสัดส่วนลดลงไป เพราะไทเทเนียมได้เข้าไปแทนที่ แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเกาะอยู่บนเม็ดแก้ว และเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับลิวคูซีนประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์แต่น้อยกว่าในเม็ดแก้วที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 แต่มีสารประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่า

4.3 ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงและค่าแถบพลังงาน (UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy , UV-Vis DRS)

4.3.1 การตรวจสอบวิเคราะห์ค่าการสะท้อน

จากการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบค่าการสะท้อนแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน ตามแสดงในภาพที่ 4.11 ก่อนนำไปทำการเตรียมผสมกับสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ และก่อนทำการเคลือบลงบนเม็ดแก้ว พบว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตรขึ้นไป ซึ่งอยู่ในย่านที่ตาสามารถมองเห็นได้ ส่วนลิวคูซีนมีค่าการดูดกลืนที่น้อยกว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25



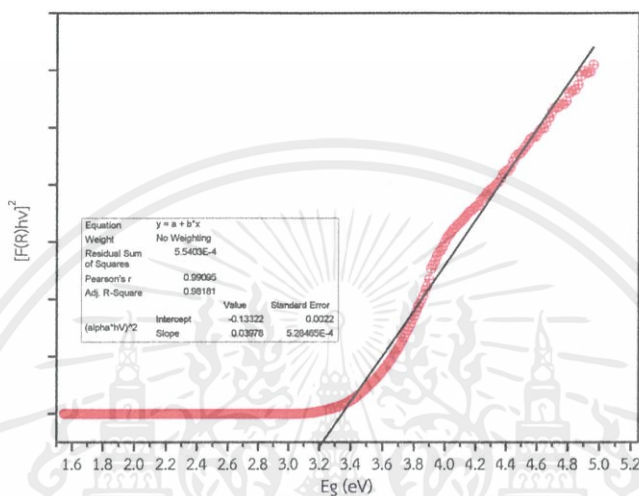
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดง UV-Vis diffuse reflectance spectra ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน

4.3.2 การตรวจสอบวิเคราะห์ค่าแถบพลังงาน

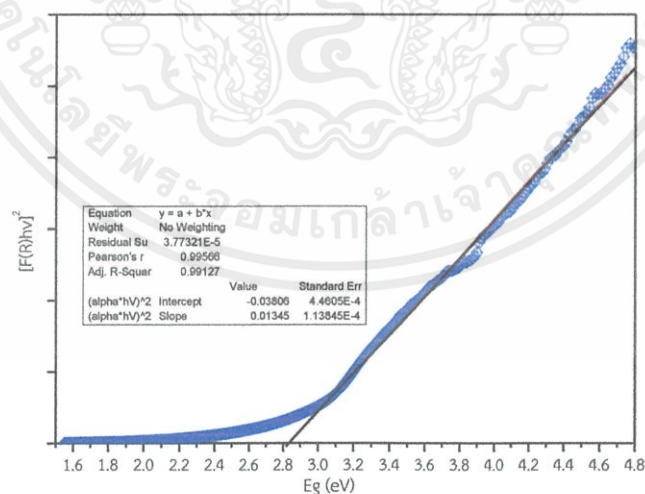
การตรวจสอบวิเคราะห์หาค่าแถบพลังงาน โดยใช้สมการที่ (2.4) แล้วนำมาพลอตกราฟ หาค่าแถบพลังงานนั้น ซึ่งค่าแถบพลังงานของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 เท่ากับ 3.21 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และค่าแถบพลังงานของลิวคูซีน มีค่าเท่ากับ 2.83 อิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.13 โดยการที่อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 มีค่าแถบพลังงานที่มาก นั้น คือมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.21 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผลให้อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 มีการดูดกลืนของแสงในช่วง 386.3 นาโนเมตร ซึ่งจะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงของแสง อัลตราไวโอเล็ต ส่วนลิควูซีนที่มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 2.83 อิเล็กตรอนโวลต์นั้น ส่งผลให้ลิควูซีนมีการดูดกลืนของแสงในช่วง 438.2 นาโนเมตร ซึ่งจะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงค่าแถบพลังงานของลิควูซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic activity)

ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ผลการทดสอบ คือ ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในปิกเกอร์และผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี

4.4.1 การทดสอบเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในปิกเกอร์

การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ทำการทดสอบในวันที่ 9 เดือนพฤษภาคม พุทธศักราช 2561 เวลาเริ่มต้นทำการทดลอง 10.00 นาฬิกา สถานที่ที่ได้ทำการทดลอง คือ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พิกัด ละติจูด 13 องศา 43 ลิปดา 44 ฟลิปดา เหนือ ลองจิจูด 100 องศา 46 ลิปดา 40 ฟลิปดา ตะวันออก โดยจะแสดงภาพการทดสอบการย่อยสลายสารละลายสีย้อมในปิกเกอร์ ดังภาพที่ 4.4.1 ซึ่งจะมีปิกเกอร์เรียงกันเจ็ดปิกเกอร์ โดยเรียงลำดับโดยใส่เม็ดแก้วที่เคลือบด้วยเงินไอตามนี้ ปิกเกอร์ที่ไม่ใส่เม็ดแก้ว (photocatalyst) , พี-25 0.5 กรัม , พี-25 1 กรัม , พี-25 2 กรัม , ลิวคูชิน 0.5 กรัม , ลิวคูชิน 1 กรัม และ ลิวคูชิน 2 กรัม ภายในปิกเกอร์จะใส่สารละลายสีย้อมโรดามีน บี ลงไปเพื่อทำการทดสอบการย่อยสลาย

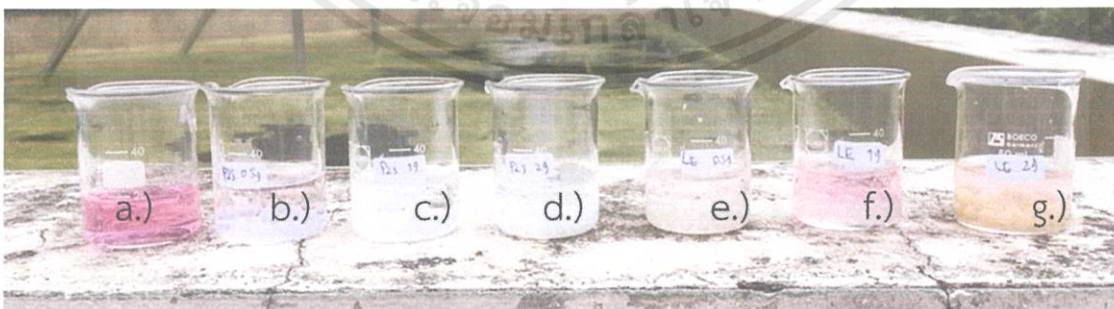
การทดลองการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูชิน แล้วนำไปเคลือบลงบนพื้นผิวของเม็ดแก้ว จากนั้นได้นำไปทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ได้ถูกนำมาเป็นตัวในแทนของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเจือจางกับน้ำไร้ประจุ สัดส่วน 1 : 10 ในสารละลายสีย้อม 50 มิลลิตร การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูชิน โดยเริ่มจากทดสอบภายใต้เงื่อนไขแบบมืดก่อน (Dark condition) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปทดสอบภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลา 240 นาที (4 ชั่วโมง) เก็บตัวอย่างผลของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ทุก ๆ 20 นาที เมื่อได้ทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายสีย้อมครบทุกเวลาแล้ว จึงได้นำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-visible spectroscopy ซึ่งสารละลายสีย้อมโรดามีน บี จะมีการดูดกลืนด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร ตามผลการทดลองดังภาพที่ 4.15 และ ภาพที่ 4.16

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.15 ภาพ a.) เป็นผลของค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น ของตัว photolysis ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ได้ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและใส่เพียงสารละลายสีย้อมเท่านั้นที่เวลาต่าง ๆ สังเกตได้ว่าค่าการดูดกลืนจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันหมด เพราะว่าเป็นตัวที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ภาพที่ 4.15 b.) ,

c.) และ d.) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นที่เวลาต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 2 กรัม ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนของพี-25 ทั้งสามเงื่อนไขนั้นมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะตัวพี-25 ที่ปริมาณ 2 กรัม มีค่าการดูดกลืนลดลงอย่างรวดเร็ว

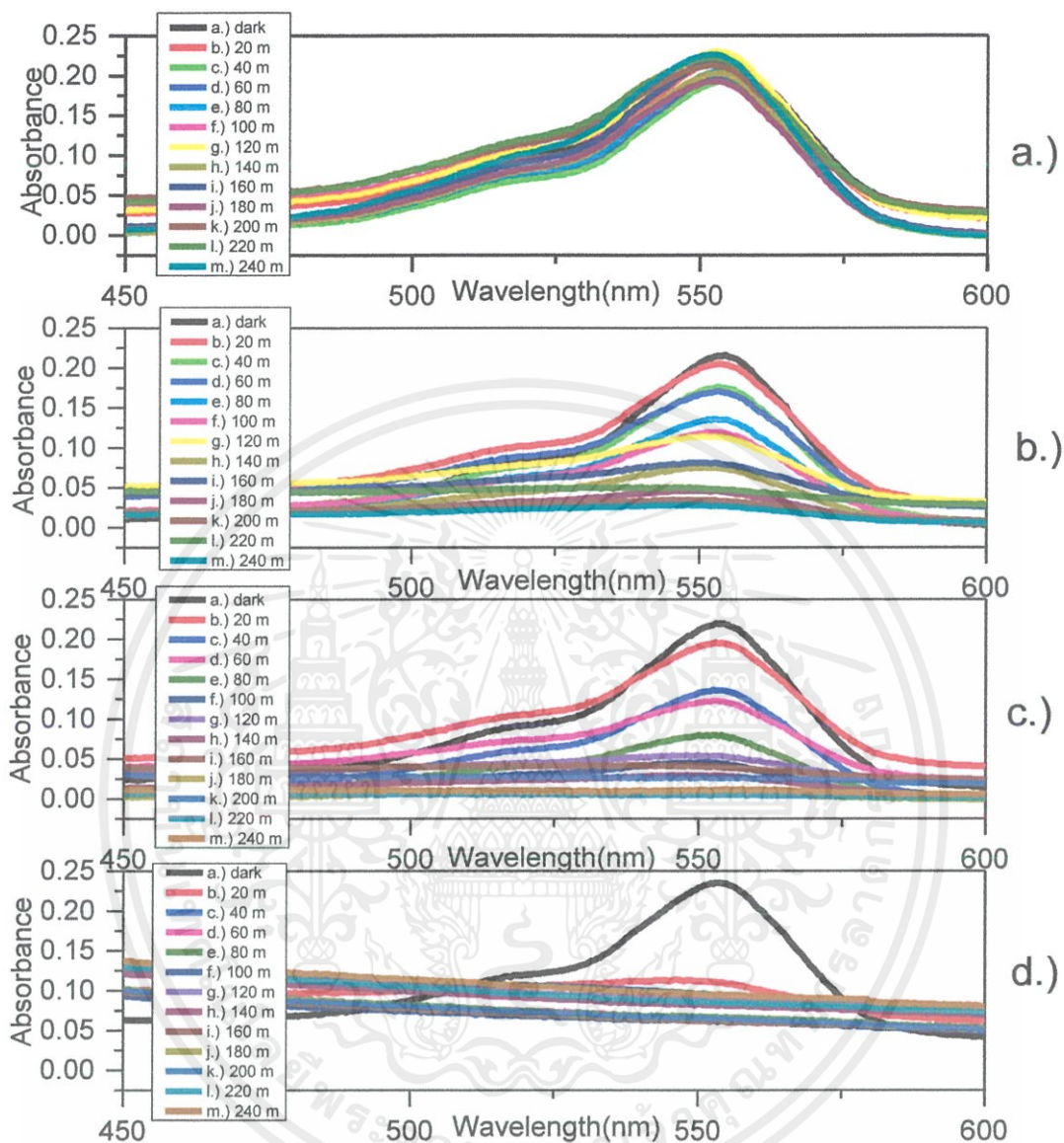
จากผลการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีนปริมาณ 0.5, 1 และ 2 กรัม ตามภาพที่ 4.16 e.) , f.) และ g.) ตามลำดับ พบว่าลิวคูซีนทั้งสามเงื่อนไขมีการดูดกลืนที่ลดลงอย่างไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงแล้ว นำไปทำการเขียนกราฟความเข้มข้น ณ เวลานั้น กับความเข้มข้นเริ่มต้นหารด้วยเวลา ซึ่งพบว่า ลิวคูซีนทั้งสามเงื่อนไข ที่เวลา 20 นาที มีค่าความเข้มข้นต่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทั้งนี้อาจเกิดจากปัจจัยภายนอก หรืออาจจะเกิดจากตัวผู้ทำการทดลองเอง แต่โดยรวมแล้วก็มีการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี อย่างต่อเนื่อง ส่วนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ทั้งสามเงื่อนไขนั้นมีการแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ปริมาณ 0.5 กรัม มีการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ไม่เร็วมากนัก แต่มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ปริมาณ 1 กรัม จะสังเกตเห็นว่ามีการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ดีที่สุดแต่ใช้เวลามากกว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ปริมาณ 2 กรัม เพราะมีการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ค่อนข้างรวดเร็วและมีปริมาณ พี-25 ที่มากกว่า ทั้งนี้ ณ วันเวลาที่ทำการทดสอบนั้นมีความเข้มข้นของแสงอาทิตย์ที่ไม่มากพอและค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ผลการทดลองที่ไม่ดีมากนัก แต่ก็ยังเป็นผลการทดลองที่เห็นผลอย่างมีนัยสำคัญ



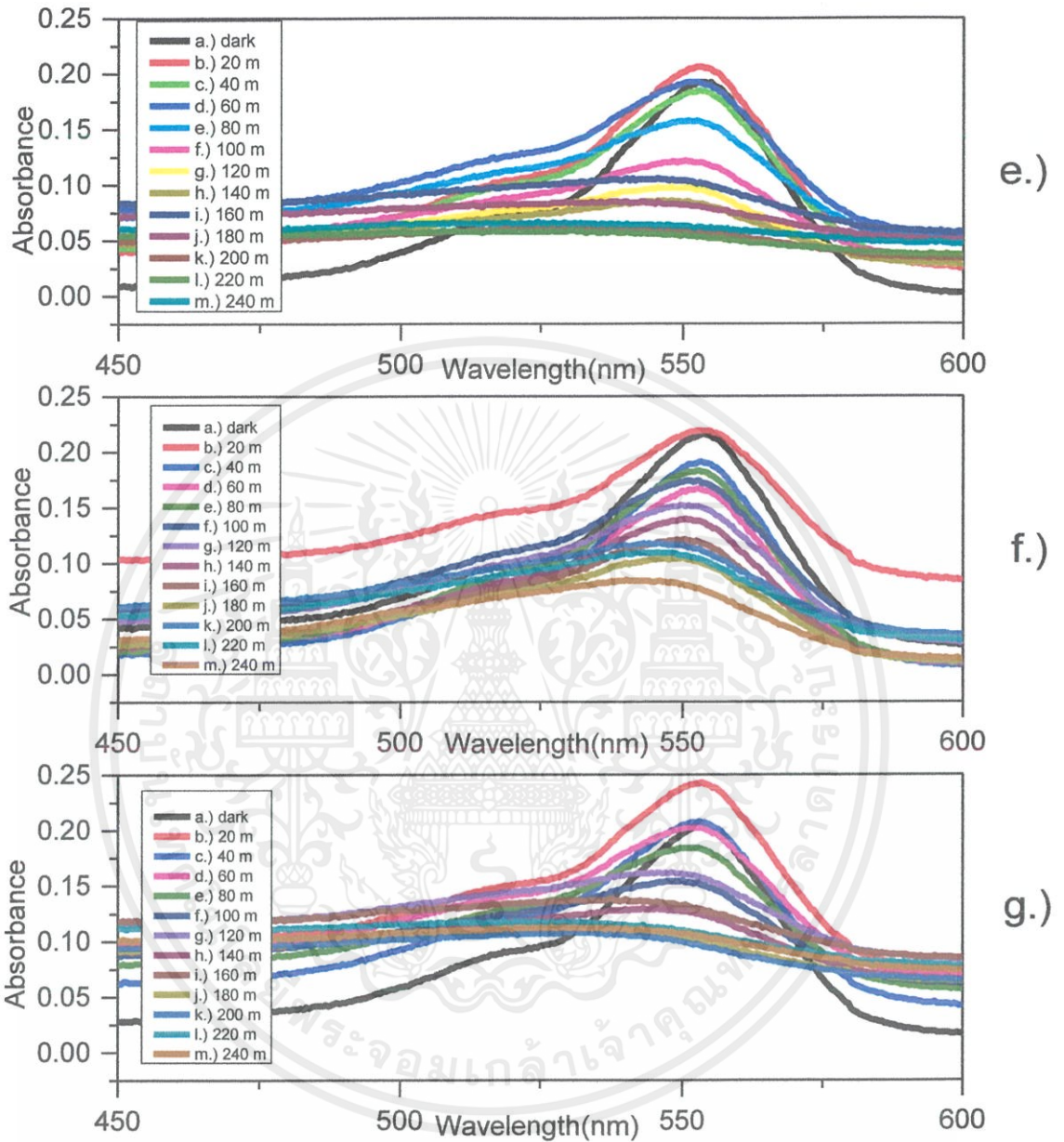
ภาพที่ 4.14 ภาพการทดสอบการย่อยสลายสารละลายสีย้อมในบีกเกอร์ ที่เงื่อนไขต่าง ๆ (a.) photolysis (b, c, d.) พี-25 0.5, 1, 2 กรัม ตามลำดับ (e, f, g.) ลิวคูซีน 0.5, 1, 2 กรัม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



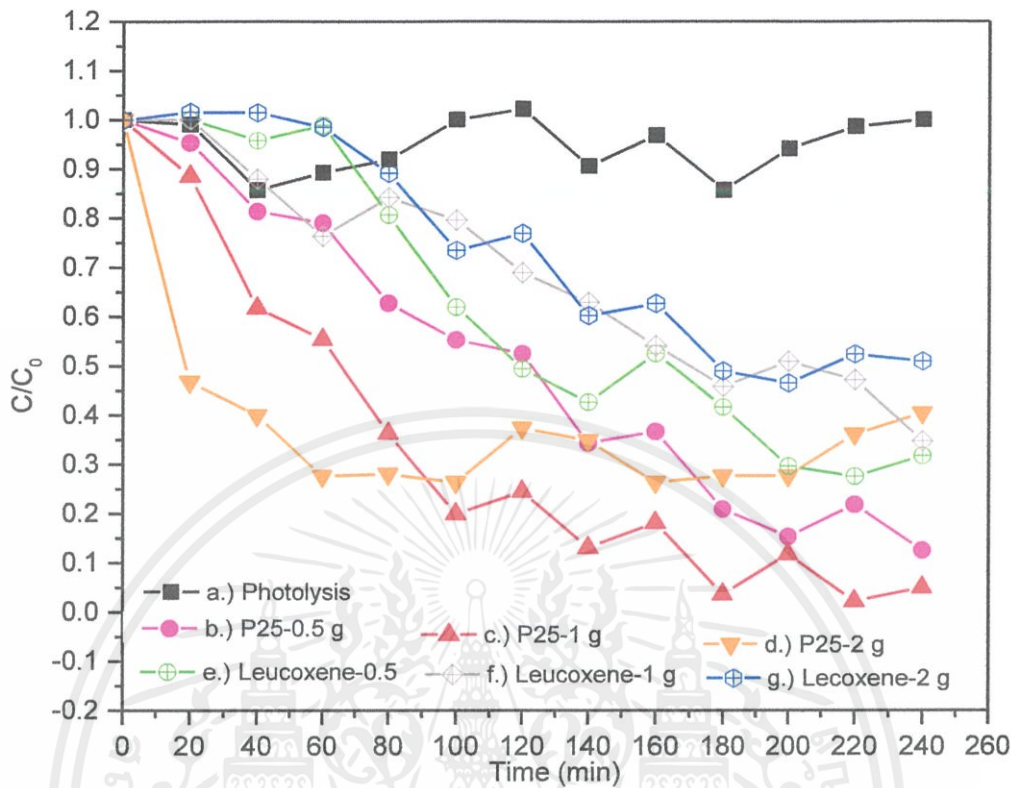
ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของเม็ดแก้วที่ไม่ได้เคลือบ และเม็ดแก้วที่เคลือบอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 ที่ปริมาณต่าง ๆ
 (a.) photolysis (b.) พี-25 0.5 กรัม (c.) พี-25 1 กรัม (d.) พี-25 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของเม็ดแกล้วที่เคลือบด้วย
 ลิวคูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ (e.) ลิวคูซีน 0.5 กรัม (f.) ลิวคูซีน 1 กรัม (g.) ลิวคูซีน 2 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

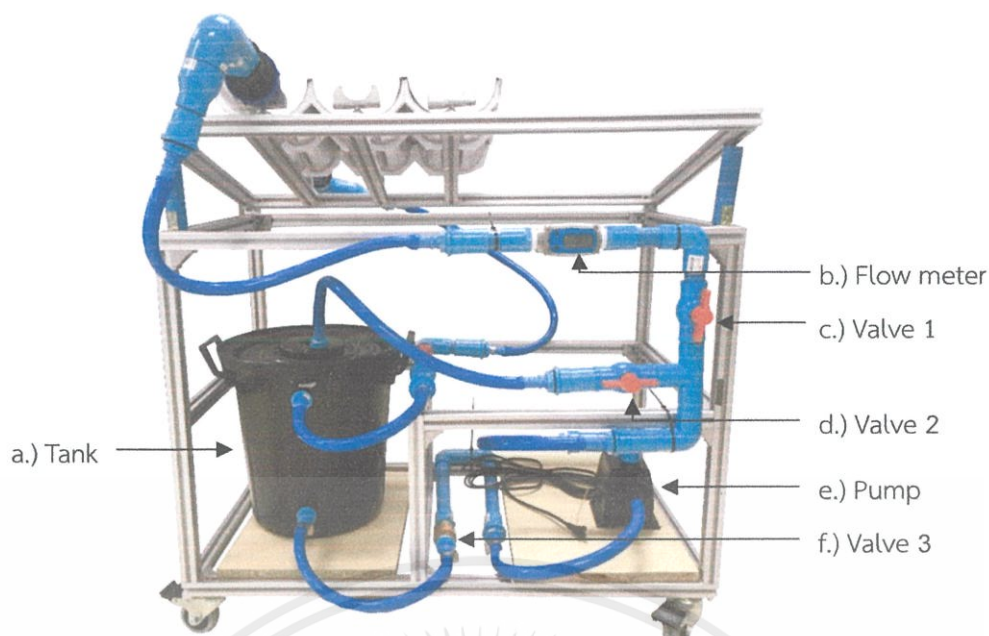


ภาพที่ 4.17 กราฟผลการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวกูซีนที่ปริมาณต่าง ๆ (a.) photolysis (b.) พี-25 0.5 กรัม (c.) พี-25 1 กรัม (d.) พี-25 2 กรัม (e.) ลิวกูซีน 0.5 กรัม (f.) ลิวกูซีน 1 กรัม (g.) ลิวกูซีน 2 กรัม

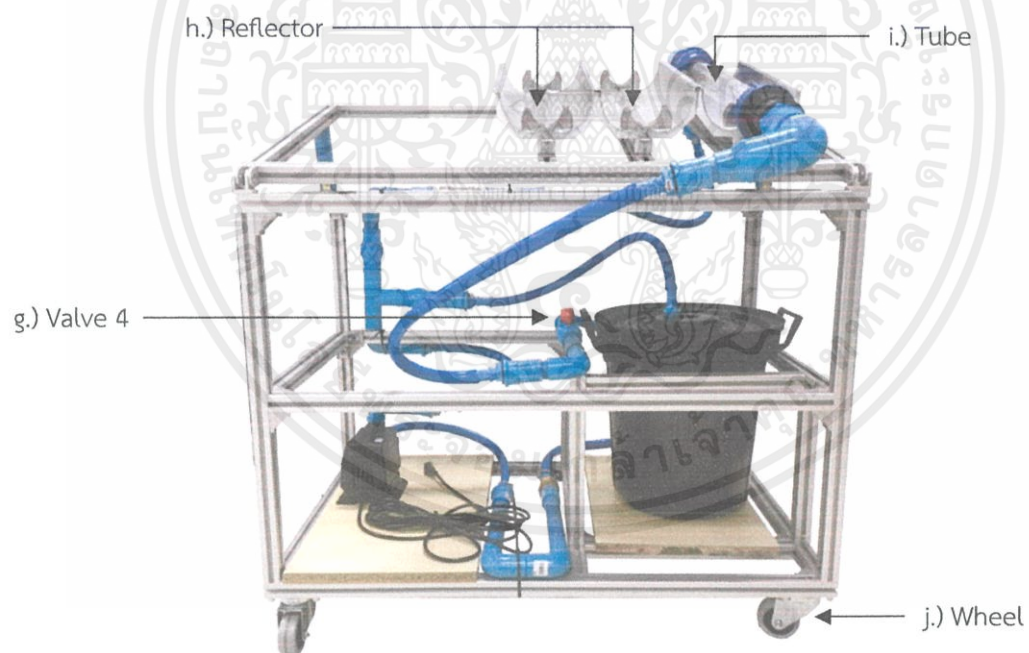
4.4.2 การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี

การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี เพื่อทำการย่อยสลายสารละลายสีย้อมโรดามีน บี จะทดสอบด้วยหลอดไฟ (LED) แทนการใช้แสงแดด เนื่องจากช่วงที่ทำการทดสอบนั้นเป็นช่วงฤดูฝน จึงทำให้มีแสงแดดที่ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาทางแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความเข้มข้นของโรดามีน บี นั้นอยู่ที่ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรทั้งหมด 10 ลิตร โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองที่ไม่ค่อยดี จึงรายงานเพียงแค่ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องและระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซีเท่านั้น

โดยมีส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซีที่สำคัญมีดังนี้ ภาพที่ 4.18 a.) คือ ถัง สำหรับใส่และกักเก็บสารละลายสีย้อมโรดามีน บี หรือใส่น้ำเพื่อทำการชำระล้างความสะอาดภายในท่อ ภาพที่ 4.18 b.) คือ flow meter เป็นเครื่องวัดอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมหรือน้ำที่ไหลผ่าน ภาพที่ 4.18 c.) คือ วาล์วที่ 1 ใช้เปิด-ปิด เพื่อให้สารละลายสีย้อมหรือน้ำไหลผ่านไปยังส่วนของหลอดใส ภาพที่ 4.18 d.) คือ วาล์วที่ 2 ใช้เปิดให้น้ำไหลผ่านไปเก็บลงในถัง สามารถปรับได้ตามอัตราการไหลที่เราต้องการ โดยหากต้องการอัตราการไหลที่สูงก็ต้องปิดวาล์วที่ 2 แต่หากต้องการอัตราการไหลที่ต่ำ ก็ต้องปรับวาล์วที่ 2 ให้ถูกเปิดตามอัตราการไหลที่เราต้องการ ภาพที่ 4.18 e.) คือ ป้อนน้ำ ขนาด 90 วัตต์ เป็นส่วนประกอบที่ให้แรงดันน้ำในการไหลไปตามท่อ ภาพที่ 4.18 f.) คือ วาล์วที่ 3 เป็นวาล์วกันกลับ (non-return valve, check valve) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำไหลย้อนกลับ ควบคุมให้น้ำไหลผ่านไปทิศทางเดียว เพื่อป้องกันปัญหาต่าง ๆ ภาพที่ 4.19 g.) คือ วาล์วที่ 4 เป็นวาล์วที่ควบคุมการไหลของน้ำจากหลอดใสลงสู่ถัง ภาพที่ 4.19 h.) คือ reflector หรือตัวแผ่นสะท้อนแสง ซึ่งทำมาจากอะลูมิเนียม ทำหน้าที่ในการสะท้อนแสง โดยมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาสองอันทำมุมกันและกัน เพื่อให้แสงตกกระทบบริเวณหลอดใสที่บริเวณเดียว ภาพที่ 4.19 i.) คือ หลอดใส เป็นหลอดที่ทำมาจากอะคริลิก ซึ่งมีความแข็งแรงทนทาน ต่อความร้อนและแรงกระแทก โดยภายในหลอดใสจะใส่เม็ดแก้วที่ได้ทำการตรึงตัวเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ ภาพที่ 4.19 j.) คือ ล้อหมุน ใช้เพื่ออำนวยความสะดวก



ภาพที่ 4.18 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี ด้านหน้า

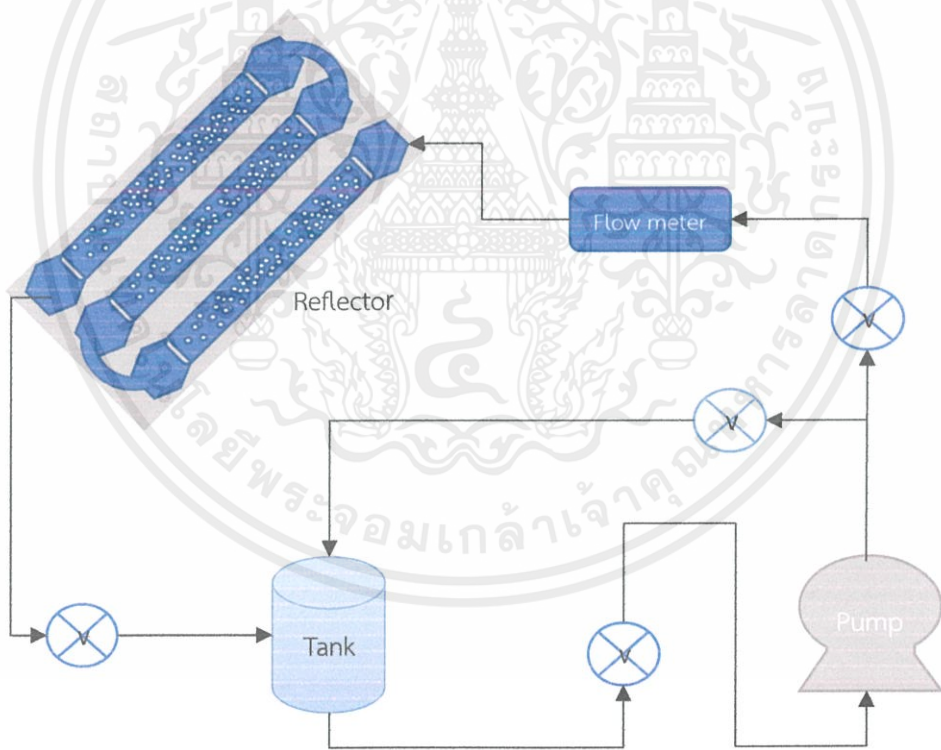


ภาพที่ 4.19 ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี ด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี ทำงานโดยใช้แรงดันน้ำจากเครื่องปั้มน้ำ โดยจะดูดน้ำจากถังน้ำขาเข้าผ่านวาล์วกันกลับให้ไหลไปในทิศทางเดียว เพื่อไม่ให้ น้ำหรือสารละลายสีย้อมไหลย้อนกลับเข้าไปในถังอีก แล้วผ่านปั้มน้ำไปยังขาออก ซึ่งมีท่อแยกไปสองทิศทาง คือ ทางแรกจะให้น้ำไหลผ่านกลับไปถังเพื่อทำให้สามารถปรับอัตราการไหลได้ ทางที่สองน้ำจะไหลไปทางหลอดใส ซึ่งมีเครื่องวัดอัตราการไหลติดตั้งอยู่ แล้วจึงไหลผ่านกลับไปยังถัง ภายในหลอดใสจะบรรจุเม็ดแก้วที่ถูกตรึงด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน แล้วทำปฏิกิริยาด้วยแสงกับแสงแดดหรือเครื่องกำเนิดแสง ทำให้สารละลายสีย้อมมีการเปลี่ยนสี โดยการเก็บตัวอย่างของสารละลายสีย้อมจะเก็บจากท่อที่ไหลลงสู่ถังน้ำ

ซึ่งข้อดีของการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี มีอยู่ด้วยกันหลายประการ เช่น มีการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ค่อนข้างสูง อุปกรณ์และส่วนประกอบมีราคาที่ไม่แพงเกินไป การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก สามารถถอดชิ้นส่วนประกอบออกมาทำความสะอาดได้อย่างง่ายดาย และสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย จึงสะดวกต่อการใช้งาน



ภาพที่ 4.20 แผนผังการไหลของเครื่องปฏิกรณ์แบบซีพีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและปรับปรุงการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน ลงบนเม็ดแก้ว และทำการเปรียบเทียบการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อสลายสารละลายสี้อมโรดามีน บี ระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน

จากผลการทดลองการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน แล้วนำไปทำการตรึงลงบนเม็ดแก้ว พบว่าภาพที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณพื้นผิวของเม็ดแก้วมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และลิวคูซีนติดอยู่ มีการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอทั่วบริเวณ

การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของเม็ดแก้วที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 สามารถย่อยสลายสารละลายสี้อมโรดามีน บี ได้ดีกว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีน เนื่องจากเมื่อพิจารณาในส่วนของการดูดกลืนแสงอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 มีการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งทำให้มีพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่มากกว่าลิวคูซีนที่มีช่วงการดูดกลืนในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้ และเมื่อพิจารณาถึงกราฟผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 และลิวคูซีน ทำให้เห็นว่า อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พี-25 มีโครงสร้างเฟสแบบ อนาเทส ซึ่งโครงสร้างเฟสแบบอนาเทสนี้ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สูงกว่าโครงสร้างเฟสแบบรูไทล์ ในอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับลิวคูซีนซึ่งมีเพียงโครงสร้างเฟสแบบรูไทล์เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างเฟสแบบรูไทล์หรือโครงสร้างเฟสแบบผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างเฟสแบบอนาเทส โดยทั้งนี้ทั้งนั้นมีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นผิว, การ

กระจายตัวของรูพรุน, ขนาดของอนุภาคผลึก, และที่สำคัญมากคือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททานเนียมไดออกไซด์ [24]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] [Online]. Available: http://nanotecheducation.blogspot.com/2012/04/blog-post_05.html
- [2] [Online]. Available: [https://www.google.co.th/search?q=\(Brinker+%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0+Scherer,+1990\)&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=A9JopiYcwBqMcM%253A%252Cpm9NijYVi-dXFM%252C_&usg=__l4UicCATk0faMdQMSeHLL9FzsME%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjN2-7O0ubbAhVZbn0KHQkOAbsQ9QEIMjAB#imgsrc=qmTeCrKynNVbCM](https://www.google.co.th/search?q=(Brinker+%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0+Scherer,+1990)&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=A9JopiYcwBqMcM%253A%252Cpm9NijYVi-dXFM%252C_&usg=__l4UicCATk0faMdQMSeHLL9FzsME%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjN2-7O0ubbAhVZbn0KHQkOAbsQ9QEIMjAB#imgsrc=qmTeCrKynNVbCM)
- [3] [Online]. Available: <https://ienergyguru.com/2015/06/สารกึ่งตัวนำ>
- [4] [Online]. Available: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownload5/tn221A_p53-55.pdf
- [5] Vinodkumar Etacheri, Cristiana Di Valentin, Jenny Schneider, Detlef Bahnemann, Suresh C. Pillai, 2015. "Visible-light activation of TiO₂ photocatalysts: Advances in theory and experiments". Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 25. 1-29.
- [6] [Online]. Available: https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjN_LCxlZfbAhUBYo8KHUHoDJIQFghEMAM&url=http%3A%2F%2Fdoi.nrct.go.th%2FListDoi%2FDownload%2F300020%2F49e11016f388cc7d09469cef16140b31%3FResolve_Doi%3D10.14457%2FKKU.res.2013.48&usg=AOvVaw09I22PA5uA048jmtz0g22T
- [7] [Online]. Available: [https://www.google.co.th/search?q=\(Brinker+%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0+Scherer,+1990\)&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=A9JopiYcwBqMcM%253A%252Cpm9NijYVi-dXFM%252C_&usg=__l4UicCATk0faMdQMSeHLL9FzsME%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjN2-7O0ubbAhVZbn0KHQkOAbsQ9QEIMjAB#imgsrc=qmTeCrKynNVbCM](https://www.google.co.th/search?q=(Brinker+%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0+Scherer,+1990)&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=A9JopiYcwBqMcM%253A%252Cpm9NijYVi-dXFM%252C_&usg=__l4UicCATk0faMdQMSeHLL9FzsME%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjN2-7O0ubbAhVZbn0KHQkOAbsQ9QEIMjAB#imgsrc=qmTeCrKynNVbCM)
- [8] [Online]. Available: <https://download.e-bookshelf.de/download/0003/7378/11/L-X-0003737811-0002059926.XHTML/index.xhtml>

- [9] F.J.Cabrera, A.Fernández-García, R.M.P.Silva, M.Pérez-García. 2013. “Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 20. 103-118.
- [10] Muhammad Tanveer and GokceTezcanli Guyer, 2013. “Solar assisted photo degradation of wastewater by compound parabolic collectors: Review of design and operational parameters”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24. 534-543.
- [11] [Online]. Available: <http://www.solarreflectorscompany.com/solar-products.php>
- [12] [Online]. Available: <http://sky-flot.ru/cpc-solar/>
- [13][Online].Available:<https://www.slri.or.th/bdd/th/bdd/th/22%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B9%8C/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>
- [14] [Online]. Available: http://faculty.sdmiramar.edu/fgarces/LabMatters/Instruments/UV_Vis/Cary50.htm
- [15] [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/spectroscopy-chem-analysis-instrument/item/140-uv-visible-spectrophotometer.html>
- [16] Azeddine Bouarioua and Mostefa Zerdaoui, 2017. “Photocatalytic activities of TiO₂ layers immobilized on glass substrates by dip-coating technique toward the decolorization of methyl orange as a model organic pollutant”. Journal of Environmental Chemical Engineering 5:1. 1565-1574
- [17] F. Zahedi, M. Behpour, S.M. Ghoreishi, H.Khalilian. 2015. “Photocatalytic degradation of paraquat herbicide in the presence TiO₂ nanostructure thin films under visible and sun light irradiation using continuous flow photoreactor”. Solar Energy 120 : 287-295.
- [18] M. RocíoEspino-Estévez, CristinaFernández-Rodríguez, Oscar M.González-Díaz, José A.Navío, Daniel Fernández-Hevia, José M.Doña-Rodríguez. 2015 “Enhancement of

stability and photoactivity of TiO₂ coatings on annular glass reactors to remove emerging pollutants from waters”. Chemical Engineering Journal 279:488-497.

[19] B. Krishnakumar and M. Swaminathan, 2014. “Product Selectivity in Solar Photocatalytic Dehydratonation of Aromatic Hydrazones by TiO₂-Based Catalysts”.

Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry 44:1. 96-100.

[20] Weerachon Phooinkong, Sorapong Pavasupree, Wanichaya Mekprasart, Wisanu Pecharapa, 2017. “Synthesis of low-cost titanium dioxide-based heterojunction nanocomposite from natural ilmenite and leucosene for electrochemical energy storage application”. Current Applied Physics.1-11

[21] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Borosilicate_glass

[22] [Online]. Available: <https://za.dedietrich.com/products-solutions/borosilicate-glass-properties>

[23][Online].Available:<http://www.siamchemi.com/%e0%b8%8b%e0%b8%b4%e0%b8%a5%e0%b8%b4%e0%b8%81%e0%b8%b2/>

[24] [Online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชารอพี สุไลมาน
วัน-เดือน-ปีเกิด	16 กุมภาพันธ์ 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 11/2 หมู่ 10 ถนนมิตรไมตรี แขวงหนองจอก เขตหนองจอก กรุงเทพ 10530
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 แผนการเรียนวิทย์-คณิต โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุภา วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้