

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนาโนลูโคซีนสำหรับ
ย่อยสลายสีย้อมโดยการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

ENHANCING EFFICIENCY OF NANO- LEUCOXENE
PHOTOCATALYST FOR DYE DEGRADATION USING ULTRAFINE
BUBBLES IN WATER

ฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนาโนลูโคซีนสำหรับย่อย
สลายสีย้อมโดยการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

Enhancing Efficiency of Nano- Leucoxene Photocatalyst for Dye
Degradation Using Ultrafine Bubbles in Water

ชื่อ - นามสกุล

นายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.

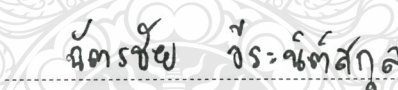
ปีการศึกษา

2567

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี, ปร.ด.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิตีสกุล, Ph.D.)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

วันที่ 30 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2567

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner.
I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.



ฉัตร

(นายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนาโนลูโคซีนสำหรับย่อยสลายสีย้อมโดยการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ
ชื่อ - นามสกุล	นายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมที่มีการใช้สีย้อมมีการเติบโตอย่างมากจากความต้องการทางด้านสิ่งทอ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้เกิดความสวยงาม อุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่มีการเจือปนของสีย้อมก่อนปล่อยออกสู่ระบบนิเวศ งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเคราะห์นาโนลูโคซีนสำหรับการบำบัดสีย้อมด้วยแสงและเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการรวมเข้ากับฟองอากาศขนาดเล็ก

วัสดุนาโนถูกเตรียมจากแร่ลูโคซีนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเผาตัวอย่างที่ได้ที่อุณหภูมิ 200–800 องศาเซลเซียส จากนั้นตรวจสอบชนิดและปริมาณสารประกอบ ลักษณะสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึก และพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างที่ได้ ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์และเผาถูกประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ด้วยการบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตรวมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็ก

ผลการวิเคราะห์พบว่านาโนลูโคซีนที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่มีการรวมตัวกันของท่อนาโนและแผ่นนาโน ซึ่งมีองค์ประกอบโครงสร้างผลึกส่วนหนึ่งเป็นไททานเตต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงพบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาเปลี่ยนจากท่อและแผ่นนาโนเป็น แท่งนาโน และกลายเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดมากกว่า 1 ไมครอน ผลการประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่านาโนลูโคซีนที่ไม่ผ่านการเผามีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นเนื่องจากการเผาส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคทำให้มีพื้นที่ผิวลดลง นอกจากนี้ฟองอากาศขนาดเล็กยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของนาโนลูโคซีนได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : การกำจัดสีย้อม แร่ลูโคซีน กระบวนการโฟโตแคตะไลติก ไททานเตต ฟองอากาศขนาดเล็ก

Thesis Title	Enhancing Efficiency of Nano- Leucoxene Photocatalyst for Dye Degradation Using Ultrafine Bubbles in Water
Name - Surname	Mr. Chatnarin Chatchiangkan
Program	Material Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Sorapong Pavasupree, Ph.D.
Academic Year	2024

ABSTRACT

The textile industry and other sectors that use dyes are growing rapidly, leading to an increased need for effective wastewater treatment to address dye contamination before discharge into the environment. This study aims to synthesize nano-leucoxene for photocatalytic dye treatment and enhance its efficiency by incorporating ultrafine bubbles.

Nanomaterials were prepared from leucoxene minerals using a hydrothermal method at 105 °C for 24 h, followed by calcination at temperatures ranging from 200 to 800 °C. The samples were analyzed for their composition, morphological characteristics, crystal structure, weight changes due to thermal properties, and specific surface area. Their efficiency in removing methylene blue dye was evaluated through a photocatalytic process under ultraviolet irradiation combined with ultrafine bubbles.

The analysis results revealed that the synthesized nano-leucoxene exhibited an aggregated structure consisting of clusters of nanotubes and nanosheets. High-temperature calcination resulted in a shift in morphological characteristics was observed from nanotubes and nanoplates to nanorods and larger spherical particles exceeding 1 micron in size. Evaluation of methylene blue dye removal efficiency indicated that uncalcined nano-leucoxene demonstrated the highest efficiency. However, the efficiency of dye removal decreased with increasing calcination temperature due to changes in particle shape, which resulted in a reduced surface area. Furthermore, the utilization of ultrafine bubbles significantly enhanced the efficiency of nano-leucoxene.

Keywords: dye removal, leucoxene, photocatalytic process, titanate, ultrafine bubbles

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาจัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์แบบได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของรองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเสียเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการศึกษาวิจัยขอกราบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ ประธานกรรมการสอบ ท่านรองศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิตสกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และท่านรองศาสตราจารย์อภิรัตน์ เล่าห์-บุตรี กรรมการสอบผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัยตลอดคำแนะนำ รวมทั้งเสียเวลาในการเป็นคณะกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณและมอบความหวังดีทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัวและพี่น้อง เพื่อนที่แสนดีและคณะครูอาจารย์ ที่ให้การสนับสนุนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหาวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชิงกาญจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	13
1.4 กรอบแนวคิดของการวิจัย.....	14
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ฟองอากาศขนาดเล็ก (Ultrafine Bubbles, UFB).....	15
2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide).....	16
2.3 แร่ลูโคซีน (Leucosene).....	18
2.4 วิธีการไฮโดรเทอร์มอล.....	19
2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process).....	21
2.6 เมทิลีนบลู (Methylene Blue).....	29
2.7 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์วัสดุ.....	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	47
3.2 วิธีการทดลอง.....	49
3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	50

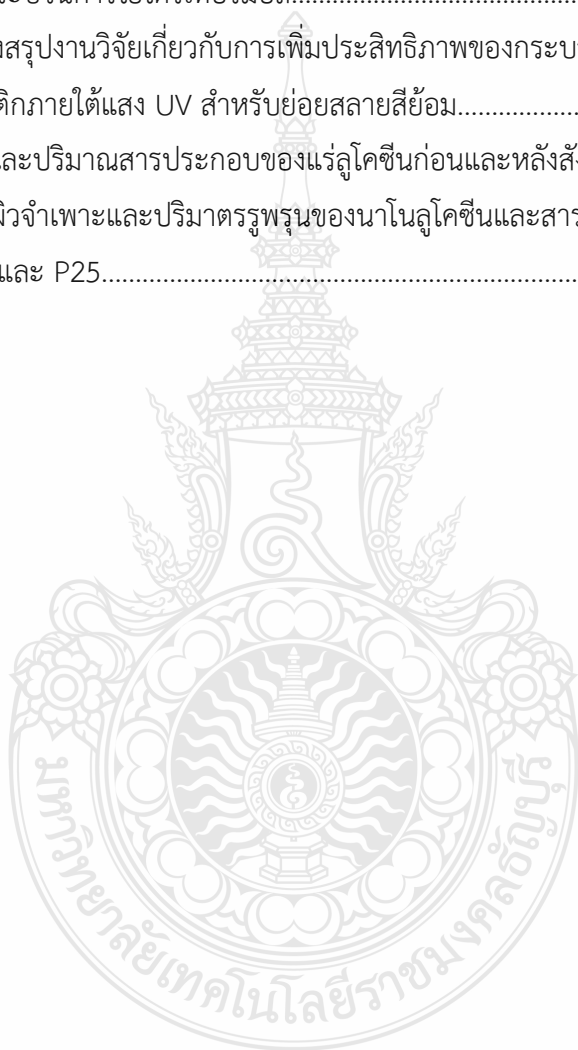
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	51
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน.....	51
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำที่เติมฟองอากาศขนาดเล็ก.....	58
4.3 ผลการวิเคราะห์การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ณ สภาวะต่าง ๆ.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก การเผยแพร่ผลงาน.....	80
ภาคผนวก ข การนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	100



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ศักย์รีดอกซ์ของตัวออกซิไดซ์หลักที่ใช้ในเทคโนโลยีบำบัดน้ำ.....	22
ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	45
ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแค ตะไลติกภายใต้แสง UV สำหรับย่อยสลายสีย้อม.....	45
ตารางที่ 4.1 ชนิดและปริมาณสารประกอบของแร่ลูโคซีนก่อนและหลังสังเคราะห์.....	55
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของนาโนลูโคซีนและสารเปรียบเทียบกับ TiO ₂ และ P25.....	58



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ.....	15
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของ TiO_2	17
รูปที่ 2.3 แผนภูมิต้นไม้แสดงถึงก้านความสัมพันธ์ของวิธีการไฮโดรเทอร์มอล.....	20
รูปที่ 2.4 แผนผังของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่เริ่มต้นจากโฟตอนที่กระทำต่อสารกึ่งตัวนำ.....	22
รูปที่ 2.5 ความถี่ของบทความประจำปีตามที่ระบุโดยฐานข้อมูล Scopus (ค้นหาด้วยคำสำคัญ “methylene blue dye degradation”).....	23
รูปที่ 2.6 แบบจำลองและโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลู.....	24
รูปที่ 2.7 การแสดงแผนผังของสมการแบร์ริก.....	26
รูปที่ 2.8 หลักการของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	27
รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	28
รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	29
รูปที่ 2.11 แผนผังการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	30
รูปที่ 2.12 การแสดงแผนผังของเครื่องบรูว์นัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์.....	31
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	32
รูปที่ 2.14 ภาพ SEM ของแผ่นนาโนคล้ายดอกไม้ TiO_2	33
รูปที่ 2.15 ภาพ TEM ของ (a-c) แผ่นนาโนคล้ายดอกไม้ TiO_2	33
รูปที่ 2.16 รูปแบบ XRD ของแผ่นนาโน TiO_2 และ แผ่นนาโน TiO_2 ที่ถูกเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส.....	34
รูปที่ 2.17 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของแผ่นนาโน และแท่งนาโน/อนุภาคนาโน TiO_2	34
รูปที่ 2.18 เส้นใยนาโนจากแร่อัลเมไนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	35
รูปที่ 2.19 กิจกรรมโฟโตแคตะไลติกของเส้นใยนาโนจากแร่อัลเมไนต์ที่สังเคราะห์ขึ้น เส้นใยนาโนที่ผ่านการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่าง ๆ อนุภาคนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์ และเส้นใยนาโนจากแร่ลูโคซีน.....	36
รูปที่ 2.20 ภาพ TEM ของท่อนาโนไททาเนต (a, b) และท่อนาโน TiO_2 แอนาเทส (c, d).....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 กิจกรรมโฟโตแคตะไลติก (ความเข้มข้นของ I_3^-) ของท่อนาโนไททาเนต, ท่อนาโน TiO_2 อนาเทส, TiO_2 รูไทล์ และอนุภาคนาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ (JRC-01).....	37
รูปที่ 2.22 ลักษณะของแผ่นนาโนจากแร่แม็กเนติกลูโคซีน.....	38
รูปที่ 2.23 โครงสร้างผลึกของแผ่นนาโนจากแร่แม็กเนติกลูโคซีนก่อนและหลังสังเคราะห์.....	39
รูปที่ 2.24 การย่อยสลายสีย้อม RhB ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ.....	40
รูปที่ 2.25 (A) การย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ (B) ปริมาณออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไป.....	41
รูปที่ 2.26 ความเสถียรของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (C_0) : (a) IC, (b) RB5.....	43
รูปที่ 2.28 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่เชื่อมต่อกับฟองนาโนสำหรับการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์.....	44
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ขนาด 200 มิลลิลิตร.....	48
รูปที่ 3.2 เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ.....	48
รูปที่ 4.1 ลักษณะของตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วย OM.....	51
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของแร่ลูโคซีน นาโนลูโคซีน และนาโนลูโคซีนหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ นาโนลูโคซีน.....	53
รูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ นาโนลูโคซีนหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	54
รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของแร่ลูโคซีน นาโนลูโคซีน และนาโนลูโคซีนหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของแร่ลูโคซีน นาโนลูโคซีน และสารเปรียบเทียบ TiO_2 เซิงพาณิชย์.....	57
รูปที่ 4.7 ปริมาณออกซิเจนในน้ำที่มีการเติม UFB.....	59
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในน้ำที่มีการเติม UFB.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 ศักย์ซีตาของสารแขวนลอยนาโน 1 กรัม/ลิตร ในน้ำ DI และสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 25 กรัม/ลิตร.....	61
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของปริมาณนาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู...	64
รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิการเผานาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	65
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของการเติม UFB ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู.....	66
รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างและแยกสารผสมที่สามารถระเหยได้หรือกลายเป็นไอได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีของสารละลายเมทิลีนบลูภายใต้กระบวนการโฟโตแคตะไลติกของนาโนลูโคซีนร่วมกับการเติม UFB.....	67
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของนาโนลูโคซีนร่วมกับการเติม UFB.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสีย้อมมีการเติบโตขึ้นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการสำหรับสิ่งทอ เครื่องหนัง กระจก และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องใช้สีเพื่อให้เกิดความสวยงาม อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของอุตสาหกรรมสีย้อมได้นำมาซึ่งความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะต่อแหล่งน้ำ การปล่อยน้ำเสียที่มีการปะปนของสีย้อมลงในแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ผ่านทางโซ่อาหาร [1, 2] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมก่อนปล่อยออกสู่ระบบนิเวศ การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมสามารถทำได้หลากหลายวิธีเพื่อให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น กระบวนการตกตะกอน [3] กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน [4] กระบวนการดูดซับ [5] การกรองเมมเบรน [6] และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ [7] ซึ่งแต่ละวิธีในการบำบัดสีย้อมก็จะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Technology) คือ การบำบัดทางเคมีโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนอย่างสีย้อมในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, $\text{OH}\cdot$) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพในการออกซิเดชันที่สูงกว่าตัวออกซิไดซ์อื่น ๆ [8] และสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบที่ไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือ กรดไฮโดรคลอริก [9] กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงที่สามารถสร้าง $\text{OH}\cdot$ ได้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) หรือแสงที่มองเห็นได้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้เมื่อมีถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน ซึ่งสามารถอยู่ได้ทั้งรูปออกไซด์และซัลไฟด์ [10]

สารที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมากที่สุดคือไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของอนุภาคนาโน TiO_2 เนื่องจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ รวมถึงโครงสร้างผลึก ทำให้นาโน TiO_2 ที่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กมากและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากถูกจัดว่าเป็นสารชนิดหนึ่งที่เหมาะสมแก่การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารตั้งต้นสำหรับเตรียมการวัสดุนาโนมีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศในบางส่วน ทำให้ในปัจจุบันเริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุนาโนจากแร่ที่มี

TiO₂ เป็นองค์ประกอบ เช่น แร่โอลิเมนไทต์ แร่ลูโคซีน ที่มีอยู่ภายในประเทศไทยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลซึ่งมีขั้นตอนในการผลิตที่เรียบง่าย ใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากในการเตรียม การเกิดปฏิกิริยาทำในระบบปิดและมีต้นทุนของวัตถุดิบตั้งต้นต่ำ

ฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ (Ultrafine Bubbles, UFB) คือฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจาก UFB มีขนาดเล็กมากทำให้มีสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ได้แก่ ความเสถียรสูง เวลาอยู่ในน้ำนาน พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพการถ่ายเทก๊าซสูง และความสามารถในการสร้างอนุมูลอิสระ [11] การประยุกต์ใช้ UFB ในการบำบัดน้ำเสียได้รับความสนใจเนื่องจากมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของ TiO₂ [12, 13] ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไป UFB สามารถช่วยปรับปรุงการถ่ายเทมวลของสารตั้งต้นไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถทำให้มีอัตราการย่อยสลายของเสียเพิ่มขึ้น [14]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาแร่ลูโคซีนที่มีอยู่ในประเทศไทยมาเตรียมเป็นวัสดุนาโนผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล และใช้วัสดุนาโนที่ได้สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของวัสดุนาโนร่วมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 สังเคราะห์วัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีนด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้เครื่องสังเคราะห์ที่ออกแบบ และสร้างขึ้นเองภายในประเทศ

1.3.2 วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน

1.3.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)

1.3.2.2 องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)

1.3.2.3 พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller, BET)

1.3.2.4 โครงสร้างทางผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Spectroscopy, XRD)

1.3.3 วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

1.3.3.1 ขนาดของน้ำฟองอากาศด้วยเครื่องนาโนไซท์ (Nanosight NS300)

1.3.3.2 ปริมาณก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ (DO Meter)

1.3.3.3 ศักย์ซีต้าด้วยเครื่องซีตาไซเซอร์ (Zetasizer)

1.3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน และศึกษาผลกระทบของการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกสำหรับบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของวัสดุนาโน ร่วมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 วางแผนและเตรียมวัสดุสำหรับการทดลอง

1.5.3 สังเคราะห์แร่ลูโคซีนด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

1.5.4 ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโน ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารประกอบ ลักษณะ สัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างทางผลึก และพื้นที่ผิวจำเพาะ

1.5.4 ทดลองผลิตและทดสอบสมบัติฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

1.5.5 ทดสอบสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของวัสดุนาโนในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ร่วมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการ

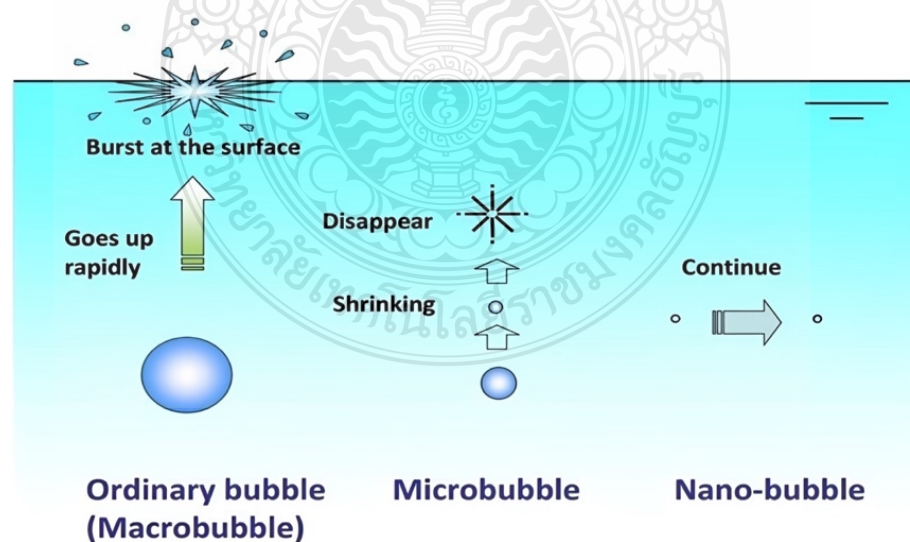
1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟองอากาศขนาดเล็ก (Ultrafine Bubbles, UFB)

โดยทั่วไปแล้วฟองอากาศที่ปรากฏในน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามขนาด คือฟองอากาศธรรมดา ฟองอากาศไมโคร และฟองอากาศนาโน เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศธรรมดามักพบว่ามีขนาดตั้งแต่ 100 ไมโครเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร โดยทั่วไปแล้วฟองอากาศแบบนี้จะลอยขึ้นสู่ผิวของของเหลวอย่างรวดเร็วและหล่นลงเมื่อมีการเคลื่อนที่หรือแรงกระทบ และในที่สุดก็จะยุบตัวลงไปใต้น้ำ ส่วนฟองอากาศไมโครมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศธรรมดาโดยมีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร ถึง 100 ไมโครเมตร ฟองอากาศเหล่านี้จะหดตัวใต้น้ำแล้วละลายลงไปใต้น้ำ ในทางตรงกันข้ามฟองอากาศนาโนเป็นฟองอากาศขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ฟองอากาศนาโนเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพที่เป็นเอกลักษณ์หลายประการที่ทำให้แตกต่างจากฟองอากาศธรรมดาอย่างมาก อย่างไรก็ตามฟองอากาศนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะลอยแบบสุ่มด้วยการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian Motion) มีการลอยตัวต่ำ และสามารถลอยอยู่ในของเหลวได้นาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนลักษณะทั่วไปของน้ำ [15, 16]



รูปที่ 2.1 รูปแบบของฟองอากาศขนาดต่าง ๆ [17]

เนื่องจากขนาดของฟองอากาศนาโนเล็กมาก เป็นเหตุผลที่ทำให้มีพื้นที่ผิวของอากาศที่มากขึ้นและความดันภายในฟองสูงกว่าภายนอก จึงสามารถแทรกตัวในของเหลวได้ นอกจากนี้ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับฟองอากาศนาโนนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น การบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมประมง การใช้ในเกษตรกรรม และด้านวัสดุและเครื่องสำอาง การใช้งานเหล่านี้ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากฟองอากาศนาโนนี้ถูกสร้างขึ้นจากน้ำและอากาศ

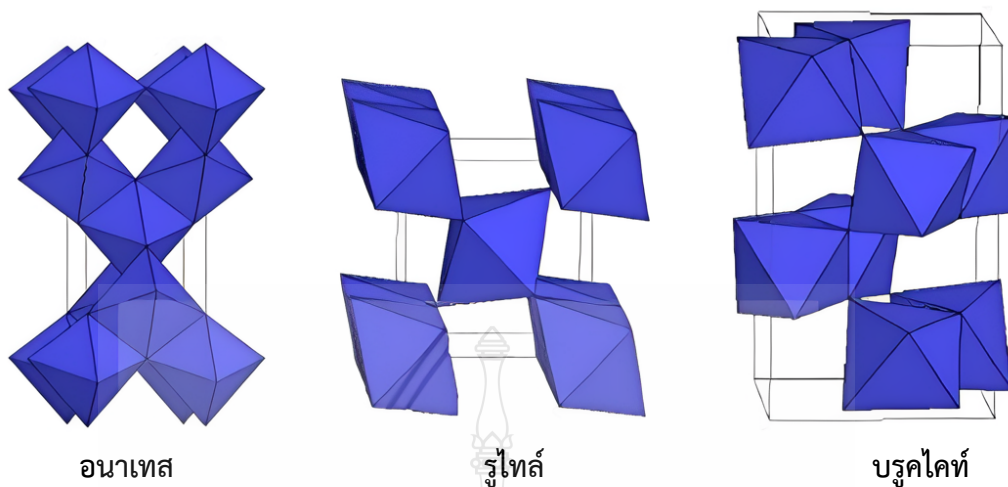
2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

2.2.1 บทอธิบายทั่วไป

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน TiO_2 เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีประวัติอันยาวนาน มีโครงสร้างผลึกที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว และการใช้งานที่หลากหลายในปัจจุบัน ในแง่ของประวัติศาสตร์ TiO_2 ถูกค้นพบครั้งแรกในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 โดยนักเคมีชาวสวีเดน คาร์ล วิลเฮล์ม เซเลอ อย่างไรก็ตาม จนกระทั่งต้นศตวรรษที่ 20 การผลิต TiO_2 เชิงพาณิชย์จึงเริ่มขึ้น การพัฒนากระบวนการซัลเฟตในช่วงทศวรรษปี ค.ศ. 1920 ทำให้สามารถผลิต TiO_2 ได้ในปริมาณมาก ซึ่งนำไปสู่การใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สมบัติของ TiO_2 เป็นสารที่มีสีขาวเสถียรและไม่ไวต่อผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังไม่เป็นพิษ ไม่เหลืองคล้ำ ไม่มีกลิ่น และมีความสามารถในการดูดซับได้ดี ทำให้เป็นสารปลอดภัยที่พบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่สีทาบ้านไปจนถึงเครื่องสำอาง

2.2.2 โครงสร้างผลึก

ลักษณะโครงสร้างผลึกในธรรมชาติของ TiO_2 สามารถพบได้ 3 รูปแบบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ อนาเทส (Anatase) บรูคไคท์ (Brookite) และรูไทล์ (Rutile) ลักษณะที่แตกต่างกันของโครงสร้างผลึกสามารถอธิบายได้ในรูปของออกตะฮีดรอล (Octahedral) ที่บิดเบี้ยวโดยมีความสมมาตรหรือการจัดเรียงที่ต่างกัน อนาเทสและรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) และบรูคไคท์มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) รูไทล์เป็นเฟสที่เสถียรที่สุดในรูปของผลึกขนาดใหญ่ ในขณะที่อนาเทสและบรูคไคท์ในรูปของผลึกขนาดใหญ่ถือเป็นเฟสที่มีความไม่เสถียรเมื่อได้รับความร้อนที่เหมาะสมทั้งแอนาเทสและบรูคไคท์สามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์ได้อย่างถาวร [18] นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของแอนาเทสและบรูคไคท์ไปเป็นเฟสรูไทล์นั้นยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของ TiO_2 เริ่มต้นด้วย [19] ด้วยสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ TiO_2 ที่ถูกพบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างผลึกเป็นอนาเทสและรูไทล์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของ TiO_2 [18]

2.2.3 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [20]

ปัจจุบัน TiO_2 ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปแบบของผลึกแบบ รูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่าง ๆ ได้แก่

2.2.3.1 สารให้สี

TiO_2 เป็นส่วนผสมที่มักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสี เรื่องที่น่าสนใจคือคุณสมบัติของ TiO_2 ที่มีสีขาว ที่สามารถดูดซับและหักเหช่วงแสงที่มองเห็นได้ดี สิ่งนี้ทำให้มันเหมาะสำหรับการใช้ในสีทาบ้าน และมีความยืดหยุ่นสูง สามารถซ่อนรอยแตกร้าวและจุดบกพร่องได้ดี นอกจากนี้ยังทนทานต่อสภาวะกรด-ด่าง แสง และความร้อน และมีความสามารถในการระบายสีในการพิมพ์และงานศิลปะ

2.2.3.2 สารเคลือบผลิตภัณฑ์

TiO_2 มักถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบในหลายอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก แก้วและกระจก การผลิตกระเบื้อง การผลิตสุญญากาศ การผลิตเซรามิก โลหะ สำหรับการเคลือบผิวโลหะ และกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง มีสมบัติที่เหมาะสมในการยึดเกาะและเคลือบติดผิวได้ดี และยังมีความทนทานต่อการกัดกร่อน และ การใช้ TiO_2 เป็นสารเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ยังสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

2.2.3.3 เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ TiO_2 เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

2.2.3.4 ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า TiO_2 มักถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย โดยมีสมบัติที่มีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งหมายถึงว่ามีความสามารถในการเก็บและเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในการเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แบตเตอรี่และคอนเดนเซอร์

2.2.3.5 ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง

TiO_2 มักถูกใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางบางรายการ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่มีประโยชน์ต่อผิว โดยเฉพาะเมื่อใช้ในครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น หรือผลิตภัณฑ์ทาหน้า ทาเนื้อมีไดออกไซด์ที่มีสมบัติที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะผิวที่ดี เช่น มีลักษณะละเอียดสีขาว ทนทานต่อแสงและมีความสามารถในการสะท้อนและหักเหแสงได้ดี และยังสามารถสะท้อนรังสียูวีได้ดี

2.2.3.6 ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

1) ใช้เป็นสารดูดซับ TiO_2 สามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษในอากาศและน้ำ โดยสามารถดูดซับและกักตัวของเสียหรือมลพิษที่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้

2) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เมื่อ TiO_2 ได้รับแสงและความร้อนจากแสงยูวี จะเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงที่สามารถใช้ในการกำจัดมลพิษในอากาศ โดยการแปลงมลพิษเป็นสารที่มีความเสี่ยงต่ำขึ้นหรือการสะท้อนรังสียูวีได้ดี (อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 2.5)

2.3 แร่ลูโคซีน (Leucoxene)

แร่ลูโคซีนเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญในการใช้ในอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่าง ๆ แร่ลูโคซีนมักจะพบปะปนอยู่ในลานแร่ดิบในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ภูเก็ต และตะกั่วป่า นอกจากนี้ยังมีการพบแร่ลูโคซีนในแหล่งต่างประเทศ เช่น ชายฝั่งด้านเหนือของรัฐนิวเซาท์เวลส์ และด้านใต้ของรัฐควีนแลนด์ ออสเตรเลียเป็นแหล่งผลิตที่มีปริมาณการผลิตสูงที่สุดในโลก แร่ลูโคซีนยังพบเป็นจำนวนมากในรัฐเวอร์จิเนียตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐฟลอริดาในประเทศสหรัฐอเมริกา และยังพบในหลายสารอื่น ๆ เช่น หินแกรนิต พกมาไทด์ ไนส์ ไมกาซีสต์ แมกนีไทด์ เซอร์คอน และโมนาไซต์

การสังเคราะห์แร่ลูโคซีนยังสามารถทำได้ผ่านกรรมวิธีเวอร์เนียล (Verneuil Process) ซึ่งเป็นกระบวนการการสร้างแร่เทียมที่มีคุณสมบัติทางกลางเข้ามาใกล้เคียงกับแร่ธรรมชาติ โดยการเลียนแบบเงื่อนไขที่เหมือนกับการเกิดแร่ในธรรมชาติ กระบวนการนี้จะอาศัยการใช้เครื่องมือและเทคนิคการปล่อย

สารลูโคซีนให้เกิดเป็นแร่เทียมบนพื้นผิวแม่เหล็กอบความร้อน และการทำแร่เทียมในลักษณะนี้สามารถพบเจอในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ได้บ่อยครั้ง

แร่ลูโคซีนมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพคล้ายกับแร่ TiO_2 สามารถนำมาใช้แทนกันได้หลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเซรามิกส์ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง และอุตสาหกรรมอาหาร

2.4 วิธีการไฮโดรเทอร์มอล [21]

ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตวัสดุขั้นสูงที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น นาโนวัสดุ การนี้ช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่แคบและมีความเป็นเนื้อเดียวกันในอนุภาคนาโนได้อย่างง่ายดาย และสามารถนำมาใช้ในงานหลากหลายด้าน เช่น ในเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เซรามิกส์ เวชภัณฑ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย

2.4.1 บทอธิบายทั่วไป

วิธีการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุที่ใช้น้ำเป็นสารละลาย ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงกว่าปกติของสภาวะอากาศ ในระบบปิด กระบวนการนี้มักใช้หม้อน้ำอัดความดัน (Autoclave) เพื่อควบคุมสภาวะการสังเคราะห์ ในกระบวนการนี้ น้ำที่ใช้จะถูกทำอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น ทำให้เกิดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุ

2.4.2 คุณสมบัติของวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

2.4.2.1 ผลิตรั้วที่มีคุณภาพสูง: การใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอลช่วยให้ได้ผลิตรั้วที่มีคุณภาพสูงและมีความบริสุทธิ์สูง โดยสามารถควบคุมสภาวะการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ผลิตรั้วที่ตรงตามความต้องการ

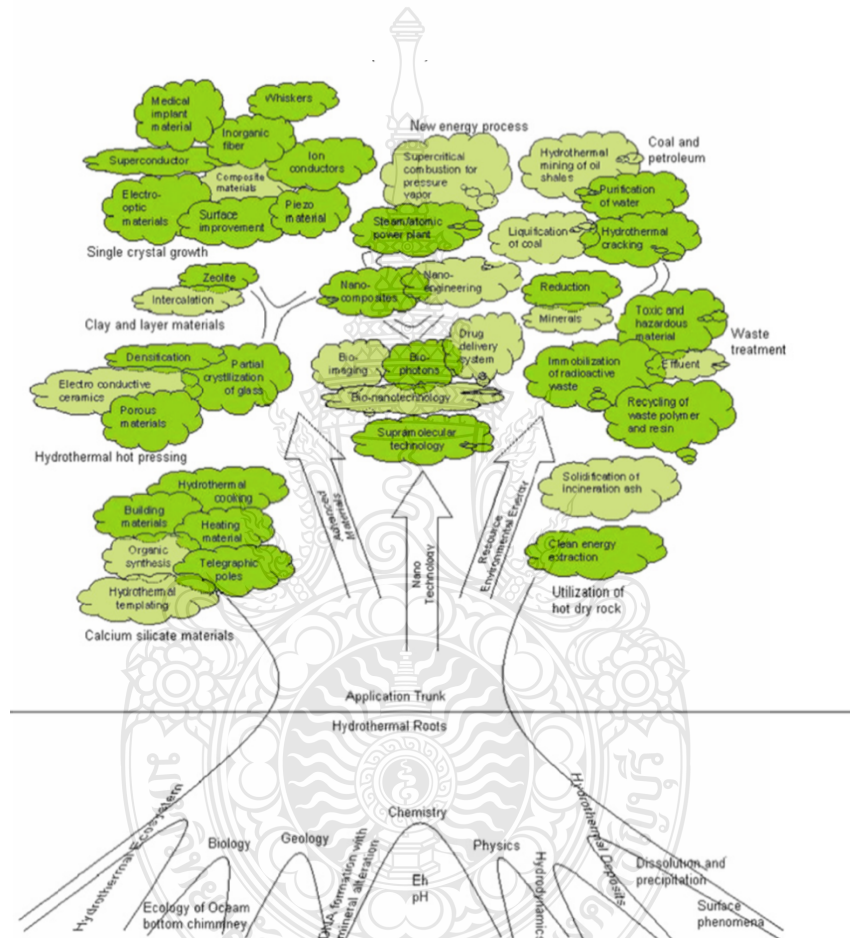
2.4.2.2 ความสม่ำเสมอของผลิตรั้ว: กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถควบคุมได้ง่ายเรื่องการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและสม่ำเสมอของโครงสร้าง ทำให้ผลิตรั้วมีความคงที่และคุณภาพที่ดี

2.4.2.3 การปรับเปลี่ยนสภาวะการสังเคราะห์: วิธีการนี้มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนสภาวะการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น และสัดส่วนโมลาร์ ซึ่งสามารถทำให้ผลิตรั้วที่มีคุณสมบัติที่ต่างกัน

2.4.2.4 ความปลอดภัยและความสะอาดในการควบคุม: การใช้งานอุปกรณ์และเครื่องมือในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นไปอย่างสะดวกและปลอดภัย และสามารถควบคุมสภาวะการสังเคราะห์ได้อย่างง่าย

2.4.3 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเทอร์มอล

ไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการสร้างวัสดุนาโนที่ใช้ในหลายสาขา อาทิเช่น อิเล็กทรอนิกส์ เซรามิกส์ และเทคโนโลยีการแพทย์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น วัสดุนาโนที่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี หรือใช้เป็นตัวกระจายแสงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การนำไฮโดรเทอร์มอลมาใช้นี้มีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ และสร้างวัสดุที่มีประโยชน์สูงสุดในอนาคต



รูปที่ 2.3 แผนภูมิต้นไม้แสดงกิ่งก้านความสัมพันธ์ของวิธีการไฮโดรเทอร์มอล [21]

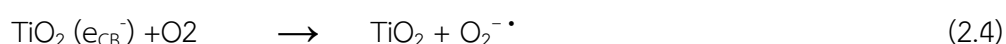
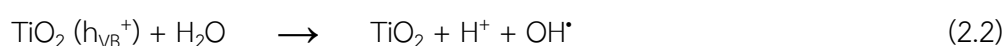
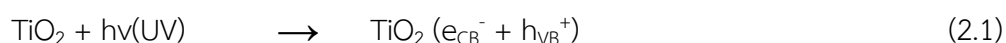
2.4.4 วิธีการไฮโดรเทอร์มอลกับ TiO_2 [22]

วัสดุ TiO_2 นั้นถือเป็นผงสีขาวเชิงพาณิชย์ เนื่องจากในตัวมันมีความสามารถในการกระเจิงแสงได้มาก ไม่มีพิษ และเฉื่อยต่อสารเคมี มีกระบวนการมากมายในการสังเคราะห์ TiO_2 โดยทั่วไปนั้นในระดับอุตสาหกรรมใช้กระบวนการสังเคราะห์ TiO_2 ด้วยวิธีที่เรียกว่า “กระบวนการ

ซัลเฟต” และ “กระบวนการคลอไรด์” ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากมากอีกทั้งยังต้องใช้วัสดุ และเครื่องมือที่ทนทานมากเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,400 องศาเซลเซียส และยังต้องทนต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย

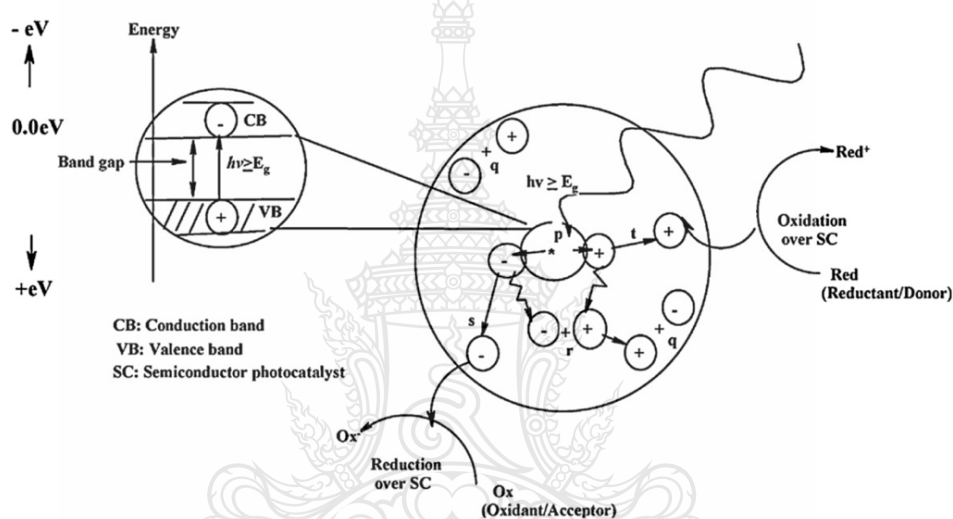
2.5 กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic Process) [23]

กระบวนการโฟโตแคตะไลติกหรือกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงประเภทหนึ่งซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการถูกกระตุ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band-Gap Energy, E_{bg}) ของตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดกลืนดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์การแยกประจุ (Charge Separation) อันเนื่องมาจากการเคลื่อนอิเล็กตรอน (Electron, e^-) จากแถบวาเลนซ์ (Valence Band, VB) ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction Band, CB) จึงทำให้เกิดโฮล (Hole, h^+) ในแถบวาเลนซ์แสดงดังแผนผังในรูปที่ 2.4 ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอนและโฮลหากต้องการสนับสนุนกระบวนการโฟโตแคตะไลติก เป้าหมายสูงสุดของกระบวนการนี้คือการสร้างปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นกับกับสารออกซิแดนท์ (Oxidant) เพื่อทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ถูกย่อยลง (reduced) และยังเป็นปฏิกิริยาระหว่างโฮลที่สร้างขึ้นกับรีดักแทนต์ (Reductant) เพื่อทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ถูกออกซิเดชัน (oxidized) อิเล็กตรอนที่สร้างด้วยแสงสามารถสลายหรือทำปฏิกิริยากับตัวรับอิเล็กตรอน เช่น O_2 ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว $Ti(III)$ หรือละลายในน้ำ ทำให้กลายเป็นไอออนลบซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (superoxide radical anion, $O_2^{\cdot-}$) โฮลที่เกิดจากแสงสามารถออกซิไดซ์โมเลกุลอินทรีย์เพื่อสร้าง R^+ หรือทำปฏิกิริยากับ OH^- หรือ H_2O ออกซิไดซ์โมเลกุลเหล่านั้นให้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^\cdot$) เมื่อใช้ร่วมกับสารออกซิไดซ์สูงอื่น ๆ มีรายงานว่าสารเหล่านี้มีหน้าที่ในการสลายตัวด้วยแสง TiO_2 ที่ต่างกันของสารตั้งต้นอินทรีย์เป็นสีย้อม ผลที่ได้คือ $OH^\cdot$ ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงมากซึ่งมีค่าศักย์รีดอกซ์เท่ากับ 2.8 โวลต์ (ตารางที่ 2.1) สามารถออกซิไดซ์สีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากข้อมูลดังกล่าวปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของสีย้อมสามารถแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.8





โดยที่ $h\nu$ คือพลังงานโฟตอนที่จำเป็นในการกระตุ้นอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำจากบริเวณแถบวาเลนซ์ (VB) ไปยังบริเวณแถบนำไฟฟ้า (CB)



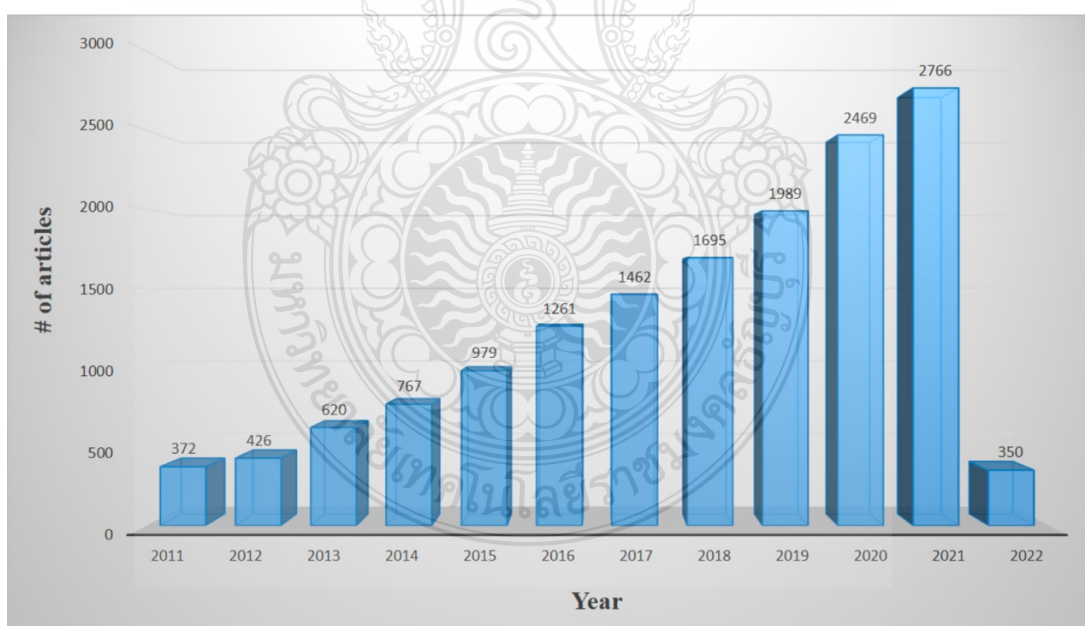
รูปที่ 2.4 แผนผังของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่เริ่มต้นจากโฟตอนที่กระทำต่อสารกึ่งตัวนำ [24]

ตารางที่ 2.1 ศักย์รีดอกซ์ของตัวออกซิไดซ์หลักที่ใช้ในเทคโนโลยีบำบัดน้ำ [8]

Oxidizing agent	Oxidation potential (V)	Relative oxidation power
OH radical	2.80	2.06
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.68	1.24
Chlorine dioxide	1.57	1.15
Chlorine	1.36	1
Oxygen	1.20	0.88

2.6 เมทิลีนบลู (Methylene Blue) [25]

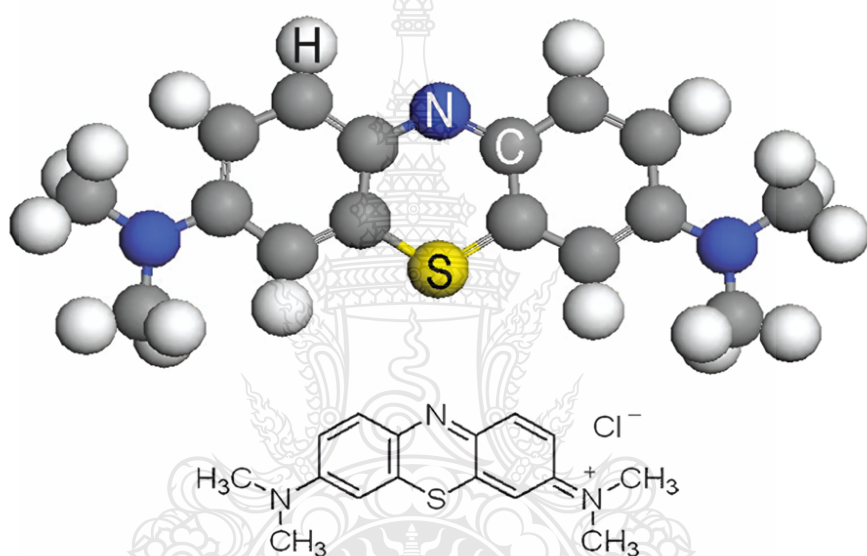
สีย้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์อะโรมาติกที่มีสีซึ่งดูดซับแสงและให้สีแก่บริเวณที่มองเห็นได้ มีรายงานการใช้สีย้อมเชิงพาณิชย์มากกว่า 100,000 รายการทั่วโลก ซึ่งคิดเป็นประมาณ 7 ร้อยล้าน ถึง 1 พันล้าน กิโลกรัมต่อปี [26] สีย้อมถูกนำไปใช้กับพื้นผิวเพื่อให้สีถาวร ซึ่งสามารถต้านทานการซีดจาง เมื่อสัมผัสกับน้ำ แสง สารออกซิไดซ์ เหนือ และการโจมตีของจุลินทรีย์ [27] ด้วยข้อดีเหล่านี้สีย้อมต่าง ๆ จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สิ่งทอ อาหาร ยาง การพิมพ์ เครื่องสำอาง ยา พลาสติก คอนกรีต และอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อวัตถุประสงค์หลายประการ อุตสาหกรรมเหล่านี้สร้างน้ำเสีย จำนวนมหาศาลที่มีสารก่อมะเร็งและสีย้อมที่เป็นพิษซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อน้ำ ซึ่งทำให้ไม่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์ ในอุตสาหกรรมเหล่านี้ อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้สีย้อมมากที่สุด โดยใช้สีย้อมสิ่งทอซึ่งเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนสูงและมีกลุ่มโครงสร้างที่แตกต่างกัน สีย้อมที่มีการใช้มากที่สุดชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมสีย้อมคือเมทิลีนบลูซึ่งมักใช้สำหรับระบายสีผ้าไหม ขนสัตว์ ผ้าฝ้าย และกระดาษ ฐานข้อมูล Scopus ระบุว่าเมทิลีนบลูถูกใช้อย่างกว้างขวางสำหรับแอปพลิเคชันต่าง ๆ จำนวนบทความเกี่ยวกับการย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 ถึง 2020 ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความถี่ของบทความประจำปีตามที่ระบุโดยฐานข้อมูล Scopus (ค้นหาด้วยคำสำคัญ “methylene blue dye degradation” [25])

2.6.1 คุณสมบัติของเมทิลีนบลู

เมทิลีนบลูมีสูตรเคมีคือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง จึงเป็นสารละลายที่เสถียรกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง เมทิลีนบลูจัดอยู่ในกลุ่มสีย้อมโพลิเมทินที่มีหน่วยอะมิโนอโตโครมและเป็นสารประกอบที่มีประจุบวก มีแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมทิลีนบลูมีสูตรมีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้มที่เป็นของแข็ง ไม่มีกลิ่น ที่อุณหภูมิห้อง และกลายเป็นสารละลายสีน้ำเงินเมื่อละลายในน้ำ มีความสามารถในการละลายในน้ำ คือ 43.6 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.6 แบบจำลองและโครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมเมทิลีนบลู [25]

สีของเมทิลีนบลูขึ้นอยู่กับกลุ่มโครโมโฟริก (Chromophoric) และกลุ่มออกโซโครม (Auxochrome) หมู่โครโมฟอร์ของเมทิลีนบลูเป็นระบบคอนจูเกต N-S บนเฮเทอโรไซเคิลอะโรมาติกส่วนกลาง ในขณะที่หมู่ออกโซโครมคือหมู่ที่ประกอบด้วย N โดยมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวบนวงแหวนเบนซีน ในการศึกษาการสลายตัวด้วยแสงและการดูดซับ การวิเคราะห์ UV ของ MB มีความสำคัญมาก เนื่องจากการคำนวณเกือบทั้งหมดวัดจากสเปกตรัมที่มองเห็นด้วย UV สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ MB เผยให้เห็นจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงที่รุนแรงที่สุดที่ประมาณ 664 นาโนเมตร ที่เกี่ยวข้องกับโมโนเมอร์ (Monomer) ของเมทิลีนบลู โดยมีจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 612 นาโนเมตร ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ไดเมอร์ (Dimer) ของเมทิลีนบลูมีแถบอีกสองแถบปรากฏขึ้นในบริเวณอัลตราไวโอเลต

โดยมีจุดสูงสุดประมาณ 292 และ 245 นาโนเมตร (เกี่ยวข้องกับการเข้าแทนที่ของวงแหวนเบนซีน) ยอดการดูดซึมเหล่านี้จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงเกิดขึ้น

2.6.2 การใช้และการประยุกต์ใช้เมทิลีนบลู

สีเมทิลีนบลูเป็นโมเลกุลที่น่าสนใจพร้อมสมบัติต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานด้านชีวการแพทย์ และใช้เป็นสารรักษาโรคที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรคโลหิตจาง มาลาเรีย และภาวะหลอดอาหารบาร์เรตต์ (Barrett's Esophagus) เมทิลีนบลูถูกนำมาใช้เป็นหลักในการแพทย์ของมนุษย์และสัตวแพทย์สำหรับขั้นตอนการวินิจฉัยและการรักษาหลายอย่าง [28] และสีเมทิลีนบลูยังมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้มากมายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ การย้อมสี การพิมพ์ สี ยา และอาหาร เป็นสีย้อมที่พบมากที่สุดในการอุตสาหกรรมสิ่งทอและถือว่าเป็นหนึ่งในสีย้อมเส้นใยที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากสามารถย้อมเกาะอย่างแน่นหนาในช่องว่างระหว่างเส้นใยและยึดติดกับผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.6.3 ความเป็นพิษของเมทิลีนบลู

สีย้อมเมทิลีนบลูซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอมักปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ก่อให้เกิดภัยคุกคามต่อสุขภาพที่สำคัญต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม มีความเป็นพิษสูง เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ การสัมผัสกับเมทิลีนบลูสามารถนำไปสู่ความเสี่ยงด้านสุขภาพต่าง ๆ เช่น อาการหายใจลำบาก ความผิดปกติของช่องท้อง ตาบอด ความผิดปกติในการย่อยอาหารและทางจิต คลื่นไส้ ท้องร่วง อาเจียน ตัวเขียว อาการช็อค โรคกระเพาะ เนื้อเยื่อเนื้อร้าย และอัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการตายของเซลล์ในเนื้อเยื่อและการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตา การสัมผัสกับเมทิลีนบลูอาจทำให้เกิดรอยแดงและคันได้ การปล่อยเมทิลีนบลูออกสู่สิ่งแวดล้อมถือเป็นข้อกังวลที่สำคัญเนื่องจากมีผลกระทบต่อความสวยงามและความเป็นพิษ ลดการซึมผ่านของแสง ขัดขวางห่วงโซ่อาหาร และแม้กระทั่งความเข้มข้นต่ำ ก็ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีสีสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงช่วยลดการส่งผ่านแสงแดด ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน และขัดขวางกิจกรรมการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

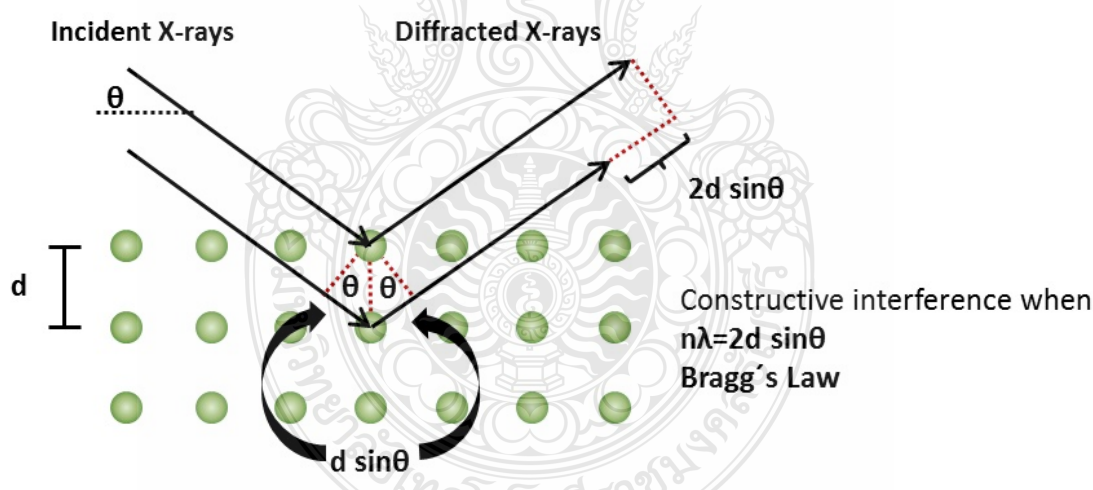
2.7 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์วัสดุ

2.7.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Spectroscopy, XRD) [29]

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ใช้สำหรับการตรวจสอบวัสดุที่เป็นผลึก วัสดุที่เป็นผลึกทั้งหมดมีสิ่งหนึ่งที่เหมือนกันคือส่วนประกอบของพวกมัน (อะตอม ไอออน หรือโมเลกุล) ได้รับการจัดเรียงอย่างสม่ำเสมอ นี่เป็นข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับ XRD เนื่องจากการเลี้ยวเบนสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรังสีเอกซ์กระจัดกระจายตามอนุภาคที่จัดเรียงเป็นคาบในลำดับระยะยาว รังสีเอกซ์ที่กระจัด

กระจายจากตัวอย่างจะรบกวนซึ่งกันและกันไม่ว่าจะในเชิงสร้างหรือเชิงทำลาย ซึ่งหมายความว่าเครื่องตรวจจับสามารถอ่านสัญญาณเฉพาะในมุมที่มีการรบกวนเชิงสร้างเกิดขึ้นเท่านั้น รูปที่ 2.7 จุดในกราฟสอดคล้องกับส่วนประกอบของวัสดุที่เป็นผลึก เนื่องจากธรรมชาติของผลึก อะตอมจึงถูกจัดเรียงเป็นระยะ ลำแสงรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบจะกระจัดกระจายไปตามระนาบต่างๆ ของวัสดุ รังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนที่ได้จึงมีความยาวเส้นทางแสงในการเดินทางที่แตกต่างกัน ขนาดของความยาวเส้นทางนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างระนาบคริสตัลและมุมตกกระทบของลำแสงเอ็กซ์เรย์เท่านั้น สามารถสรุปได้ด้วยสมการของแบรกก์ (Bragg – Equation) (สมการ 2.9) สมการนี้สามารถอธิบายได้ว่าการรบกวนเชิงสร้างเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความแตกต่างของเส้นทาง (กำหนดโดย $2d\sin\theta$) เป็นผลคูณ ($n=1,2,\dots$) ของความยาวคลื่นที่ใช้ของลำแสงรังสีเอกซ์ เนื่องจากทราบความยาวคลื่นในการทดลอง XRD และวัดมุมที่เกิดสัญญาณรบกวนเชิงสร้างการใช้สมการแบรกก์ทำให้สามารถกำหนดระยะห่างระหว่างระนาบขัดแตะของวัสดุได้ผลลัพธ์ของการวัดเรียกว่าการเลี้ยวเบนของแสง นี่คือพล็อตของความเข้มของรังสีเอกซ์บนแกน y เทียบกับมุม 2θ (2θ หมายถึงมุมระหว่างเหตุการณ์กับลำแสงเลี้ยวเบน) บนแกน x

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.9)$$

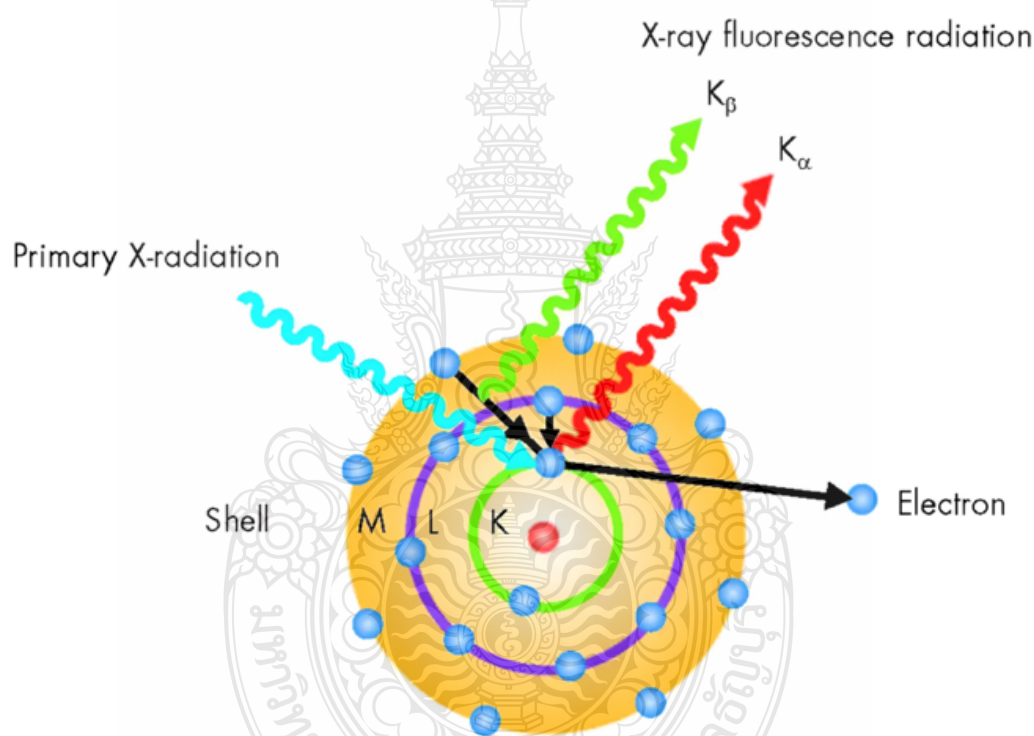


รูปที่ 2.7 การแสดงแผนผังของสมการแบร็ก [29]

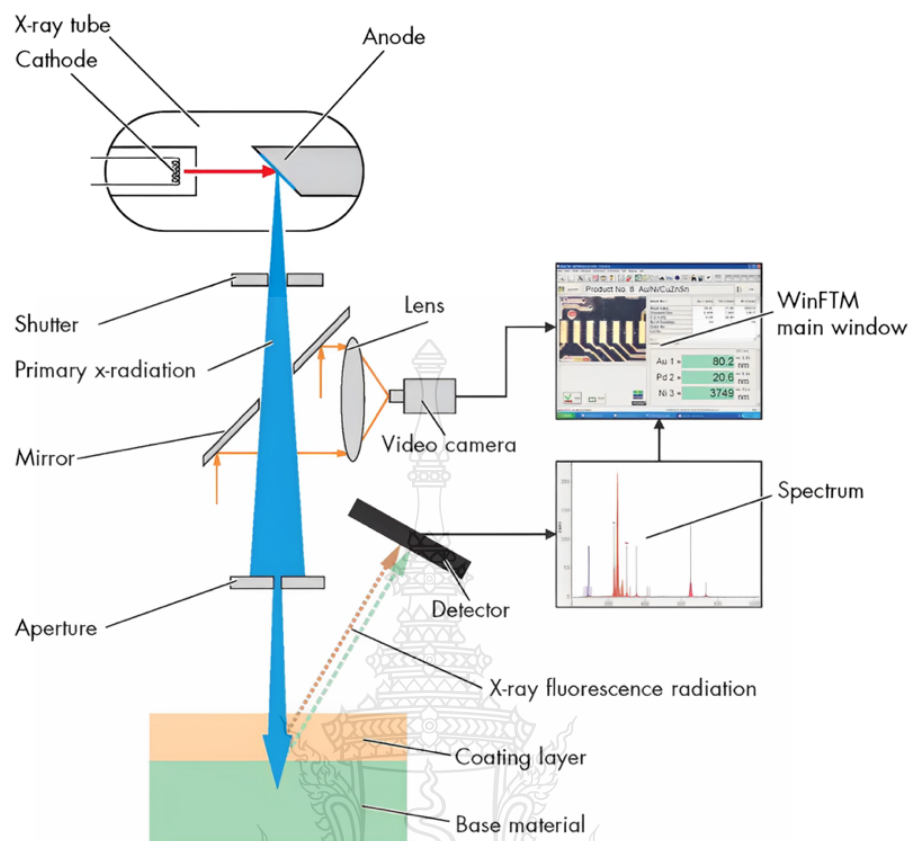
2.7.2 เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF) [30]

เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้ในการหาชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง วิธีการนี้ใช้รังสีเอกซ์เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมที่อยู่ในสารตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกปลดออกจากอะตอมและเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงาน

ที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยที่รังสีเอกซ์ที่คายออกมาจะมีคุณสมบัติเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับธาตุในสารตัวอย่างนั้น ๆ ในกระบวนการนี้ อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นที่สูงกว่าและระดับพลังงานต่ำกว่าจะเคลื่อนที่มาแทนที่ช่องว่างในชั้นที่ต่ำกว่า ซึ่งทำให้ชั้นที่มีพลังงานสูงกว่านั้นว่างลง การทำนี้ก็เป็นที่มาของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเฉพาะที่ของแต่ละธาตุ รังสีเอกซ์จำเพาะนี้จะมีลักษณะเฉพาะและเป็นลายลักษณ์อักษรที่แสดงถึงธาตุนั้น ๆ ดังนั้น เราสามารถใช้การวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่คายออกมาเพื่อระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างได้ การวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่คายออกมา รังสีเอกซ์จำเพาะจะมีเข้มของรังสีที่เกี่ยวข้องกับธาตุนั้น ๆ และปริมาณรังสีที่คายออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.8 หลักการของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [31]

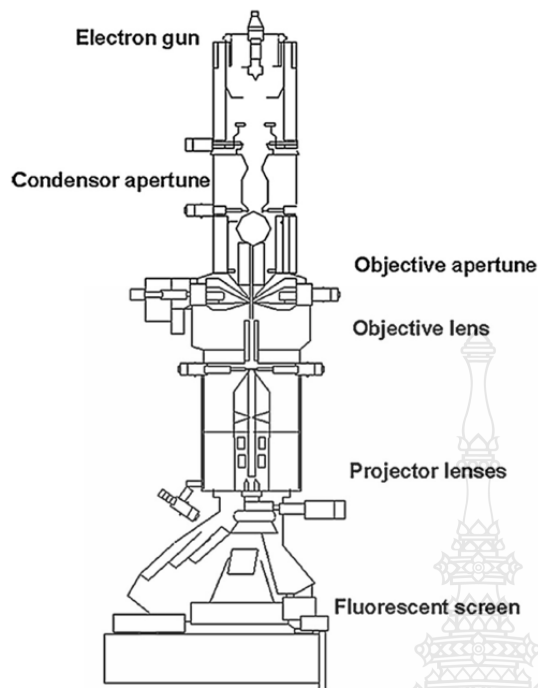


รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [31]

2.7.3 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) [32]

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเทคนิควิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนแทนแสงในการสร้างภาพของวัตถุหรือตัวอย่างที่มีความละเอียดและความคมชัดสูง โดยอิเล็กตรอนมีความละเอียดเทียบเท่ากับคลื่นแสงที่มีความสั้นกว่ามาก จึงช่วยให้สามารถรายงานและสังเกตรายละเอียดของโครงสร้างตามระดับอะตอมหรืออนุภาคได้อย่างละเอียดอ่อน โดยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีสองประเภทหลักคือ

2.7.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาตัวอย่างชนิดบาง โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยวิธีเฉพาะอย่างพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ เครื่องมือประเภทนี้สามารถสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง TEM เหมาะสำหรับศึกษาองค์ประกอบภายในของตัวอย่าง ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมากในระดับ 0.1 นาโนเมตร

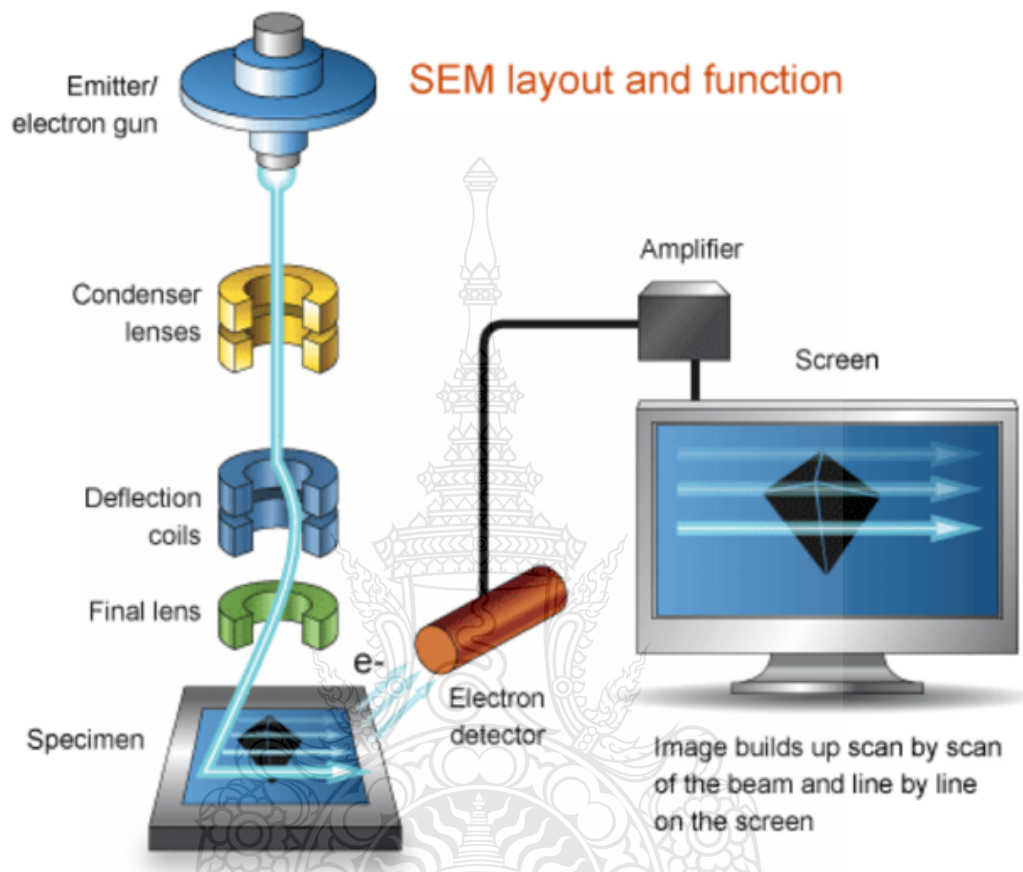


รูปที่ 2.10 แผนผังการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [33]

หลักการทำงานของ TEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่ไป จากนั้นจะเกิดการกระเจิงของอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไปหลังจากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) จะทำหน้าที่ปรับโฟกัสของภาพเพื่อให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้

2.7.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับ TEM อยู่ในระดับ 10 นาโนเมตร ตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบ SEM ไม่จำเป็นต้องเป็นตัวอย่างชนิดบางเหมือนกับ TEM เนื่องจากเป็นการตรวจวัดที่ไม่ได้อาศัยการทะลุผ่านตัวอย่างเหมือนกับ SEM สร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากพื้นผิวของตัวอย่าง รูปที่ได้จาก SEM จะเป็นจะเป็นภาพมิติ ทำให้ SEM

เหมาะสำหรับการใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างของพื้นผิวตัวอย่าง อาทิ ลักษณะพื้นผิวของเนื้อเยื่อและ เซลล์ พื้นผิวหน้าตัดของโลหะและวัสดุอื่น ๆ

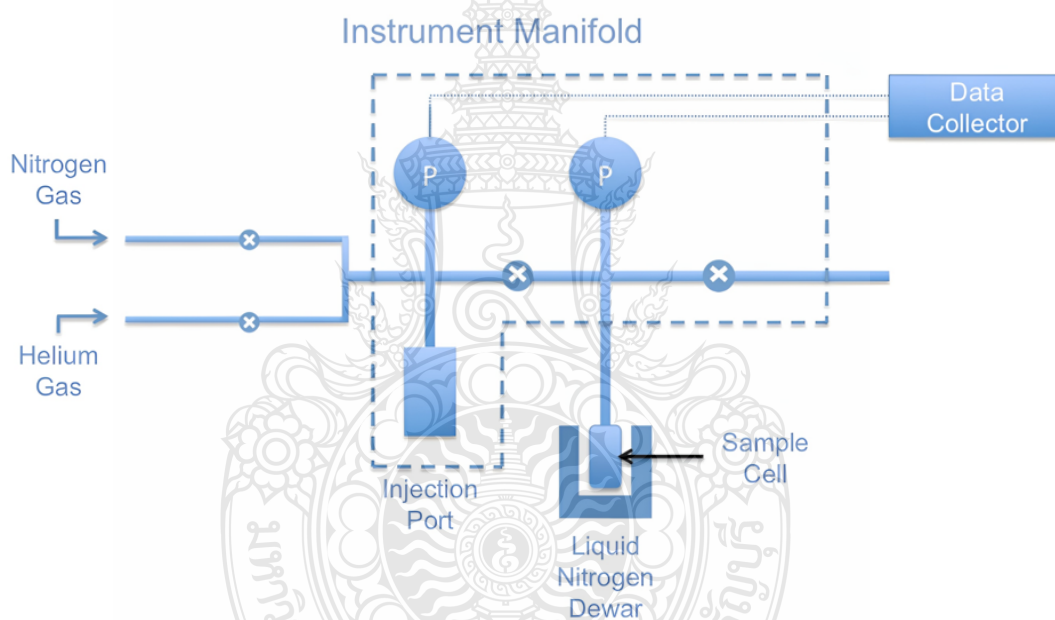


รูปที่ 2.11 แผนผังการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [34]

หลักการทำงานของ SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสีเพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการรูปที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุลงไปยังผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ สามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

2.7.4 เทคนิคบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) [35, 36]

เทคนิคบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (BET) เป็นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน โดยทั่วไป BET จะมีเซลล์ 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่างและอีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์ที่ใช้สำหรับอ้างอิง ก่อนการทดสอบจะต้องให้ความร้อนแก่เซลล์เพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลที่ปนเปื้อนของวัสดุพื้นผิว จากนั้นจึงทำให้เซลล์เป็นสุญญากาศเพื่อแทนที่โมเลกุลและก๊าซอื่น ๆ ต่อไปจุ่มเซลล์ทั้งสองลงในภาชนะไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นเติมก๊าซไนโตรเจนลงในเซลล์เพื่อดูดซับ ก๊าซไนโตรเจนจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุ จากนั้นปล่อยก๊าซไนโตรเจนไปสู่การดูดซับ ก๊าซไนโตรเจนจะถูกดูดซับออกจากพื้นผิวของวัสดุ ติดตามปรากฏการณ์ของความดันสัมพันธ์และปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนเพื่อคาดการณ์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุตัวอย่าง

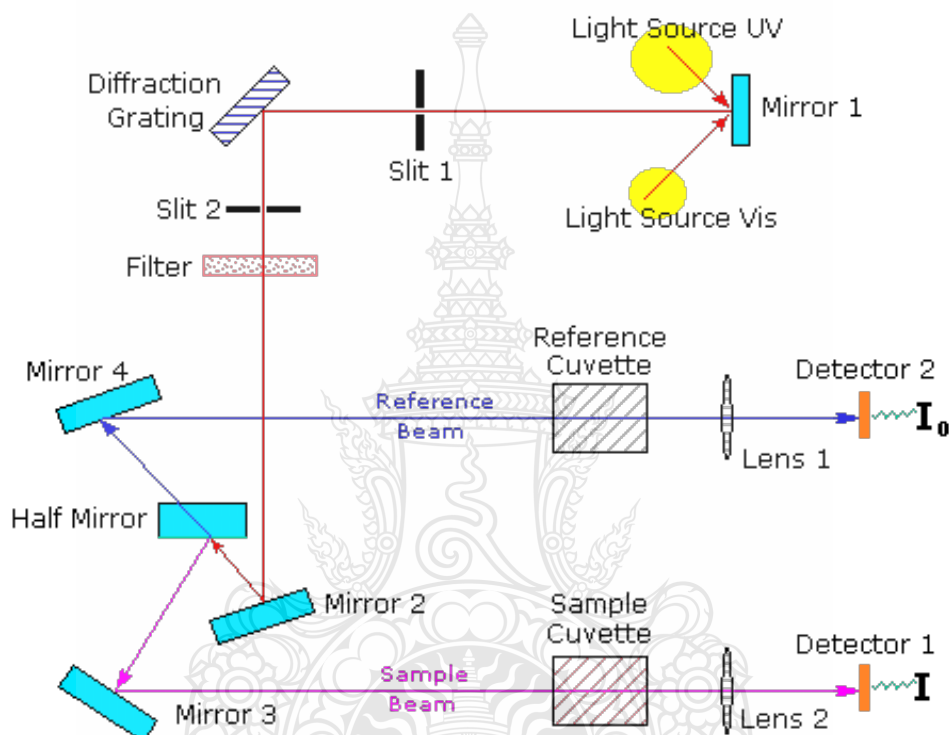


รูปที่ 2.12 การแสดงแผนผังของเครื่องบรูว์นอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ [37]

2.7.5 เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy)

เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณแสงและความเข้มของแสงที่ผ่านผ่านตัวอย่างในระหว่างช่วงคลื่นแสงออร์แกนิก (UV) และแสงที่เห็นได้ ความยาวคลื่นของแสงเกี่ยวข้องกับปริมาณและชนิดของสารตัวอย่าง ตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารเชิงซ้อนอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดซับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นนี้ สมบัติการดูดกลืนแสงของตัวอย่างจะถูกเร่งการฉายรังสีด้วยแสง UV หรือแสงสีขาวที่มีพลังงานที่

เหมาะสมที่สุดแก่อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา อะตอมอิเล็กตรอนจะดูดซับแสงและพลังงานเปลี่ยนสถานะเป็นระดับชั้นพลังงานสูง แล้วเปรียบเทียบแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างโดยอ้างอิงตามกฎเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลแสงที่ดูดซับ เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สามารถวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 900 นาโนเมตร [38, 39]

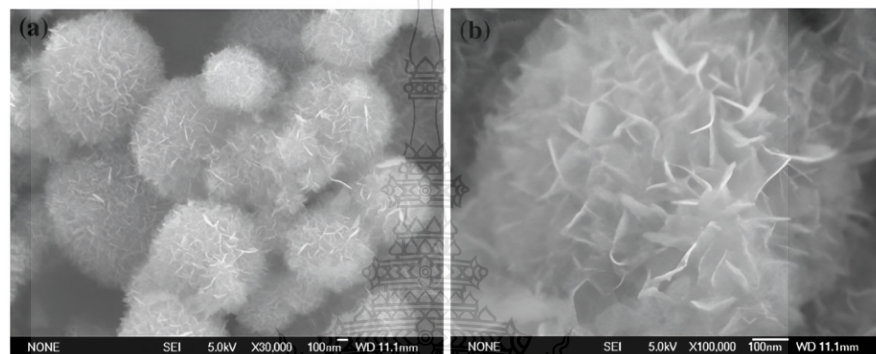


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [38]

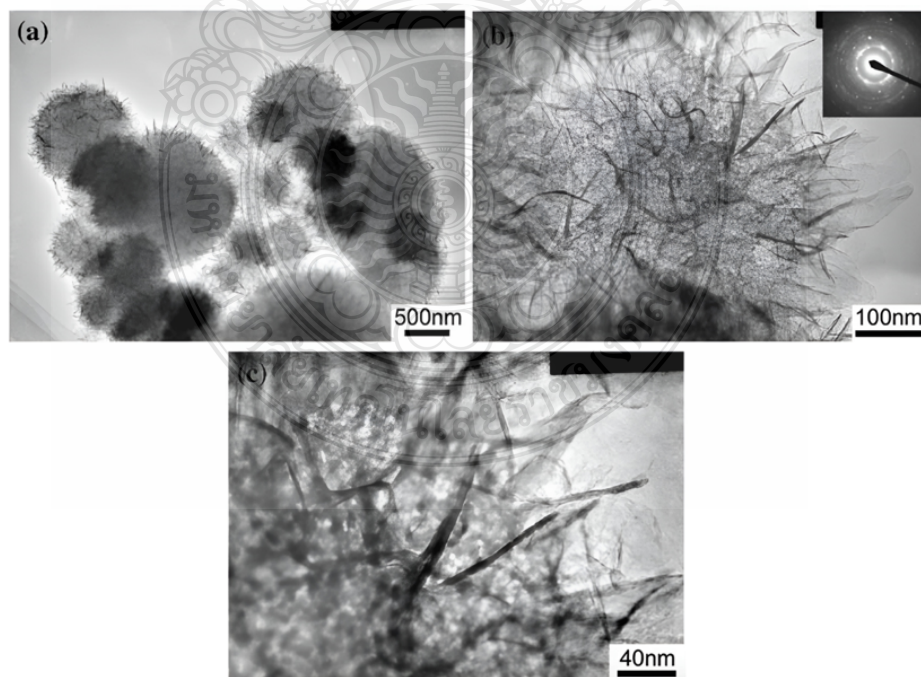
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 Sorapong Pavasupree และคณะ [40] ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์แผ่นนาโน (Nanosheets) จาก TiO_2 ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Mesoporous) ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าสัณฐานวิทยาของแผ่นนาโน TiO_2 มีโครงสร้างคล้ายดอกไม้ (รูปที่ 2.14) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร ถึง 2 ไมโครเมตร ประกอบกับมีแผ่นนาโนที่มีลักษณะโค้งเล็กน้อยความกว้างประมาณ 50 ถึง 100 นาโนเมตร และมีความหนาหลายนาโนเมตรแสดงดังรูปที่ 2.15 แผ่นนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET 642 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดของรูพรุน 0.774 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังศึกษา

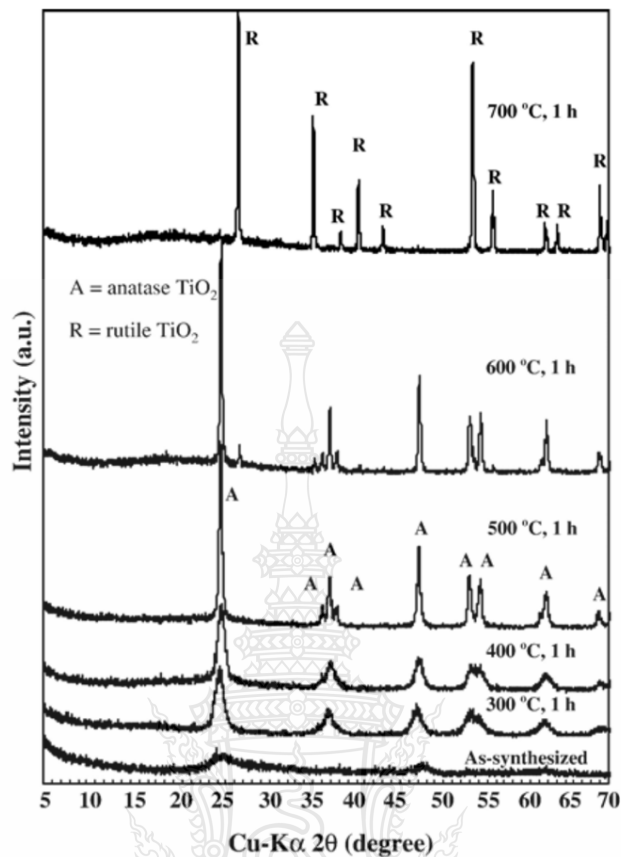
ผลกระทบต่อการเผาแผ่นนาโนที่อุณหภูมิ 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าอุณหภูมิการเผาที่ต่างกันส่งผลให้แผ่นนาโนมีผลึกที่แตกต่างกันดังรูปที่ ที่อุณหภูมิการเผา 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส แผ่นนาโนมีผลึกในรูปแบบของอนุภาค ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แผ่นนาโนมีผลึกรูปแบบของอนุภาคและรูทล์ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แผ่นนาโนจะแสดงผลึกแคโรไทล์ และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นแผ่นนาโนจะเริ่มเปลี่ยนเป็นแท่งนาโนและอนุภาคนาโนดังแสดงในแผนภาพการเปลี่ยนแปลงของแผ่นนาโน รูปที่ (2.17)



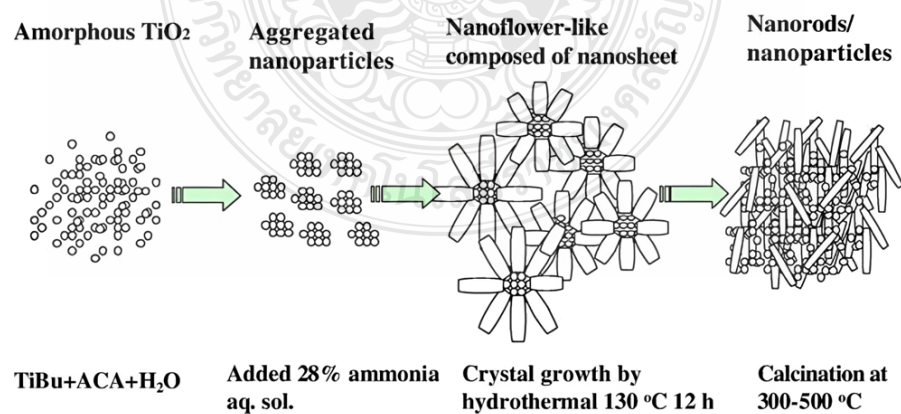
รูปที่ 2.14 ภาพ SEM ของแผ่นนาโนคล้ายดอกไม้ TiO_2 [40]



รูปที่ 2.15 ภาพ TEM ของ (a-c) แผ่นนาโนคล้ายดอกไม้ TiO_2 [40]

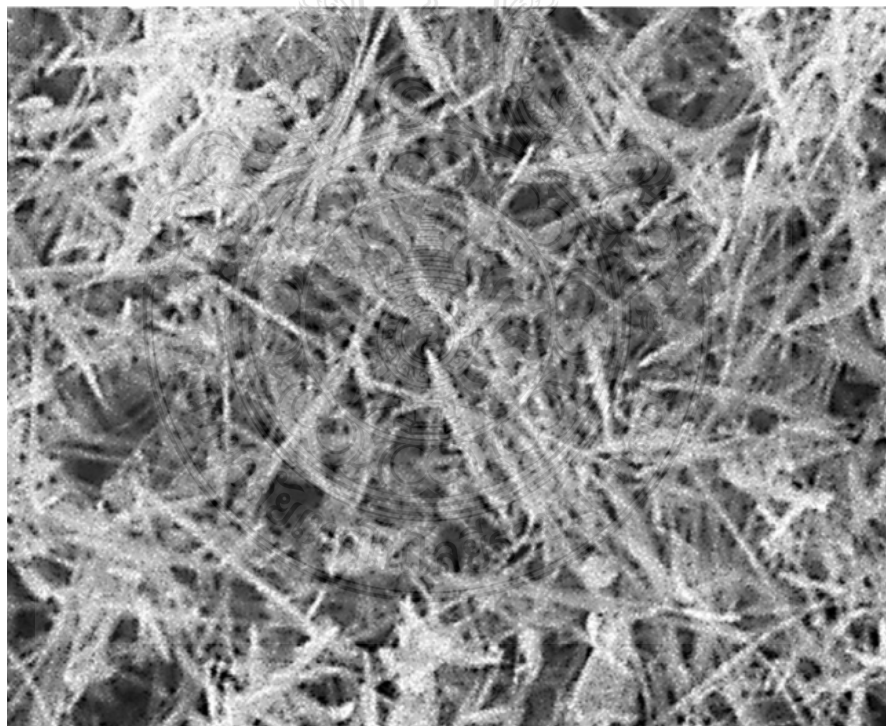


รูปที่ 2.16 รูปแบบ XRD ของแผ่นนาโน TiO_2 และ แผ่นนาโน TiO_2 ที่ถูกเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส [40]

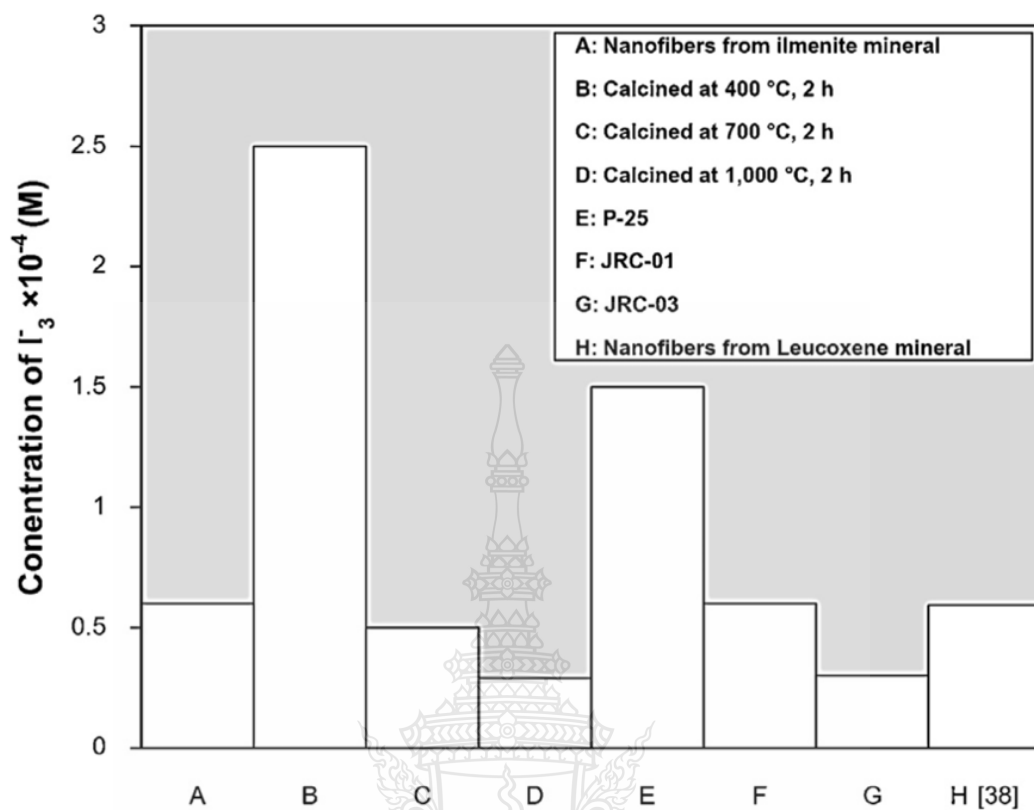


รูปที่ 2.17 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของแผ่นนาโน และแท่งนาโน/อนุภาคนาโน TiO_2 [40]

2.8.2 Athapon Simpraditpan และคณะ [41] ได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนไททาเนต (Titanate nanofibers) โดยสังเคราะห์จากแร่ธรรมชาติโอลเมนไนต์ (FeTiO_3) ผ่านวิธีการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้เป็นเส้นใยนาโน (รูปที่ 2.18) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ถึง 90 นาโนเมตร และยาว 2 ถึง 7 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเผาเส้นนาโนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้มีเฟสของรูไทล์เพิ่มขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 700 องศาเซลเซียส ยังคงโครงสร้างเดิมไว้ได้แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นลักษณะคล้ายแท่งขนาดเล็กกว่าไมครอน ที่น่าสนใจคือ อุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นการดูดกลืนของตัวอย่างที่เตรียมไว้แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนไปยังบริเวณแสงที่มองเห็นได้อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสผลึกและขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานช่องว่างแถบความถี่ของตัวอย่างที่เตรียมไว้จึงแคบลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กิจกรรมโฟโตแคตะไลติกของเส้นใยนาโนที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าไม่เพียงแต่สูงกว่าผงอนุภาคนาโน TiO_2 ทางการค้าเท่านั้น แต่ยังมีค่าสูงสุดในตัวอย่างทั้งหมดในการศึกษานี้ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.19

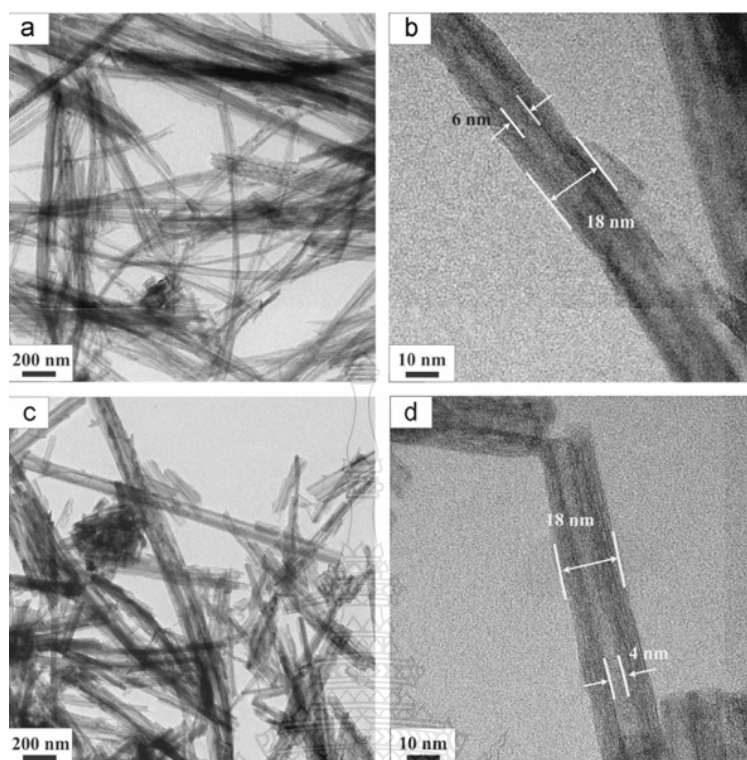


รูปที่ 2.18 เส้นใยนาโนจากแร่โอลเมนไนต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ [41]

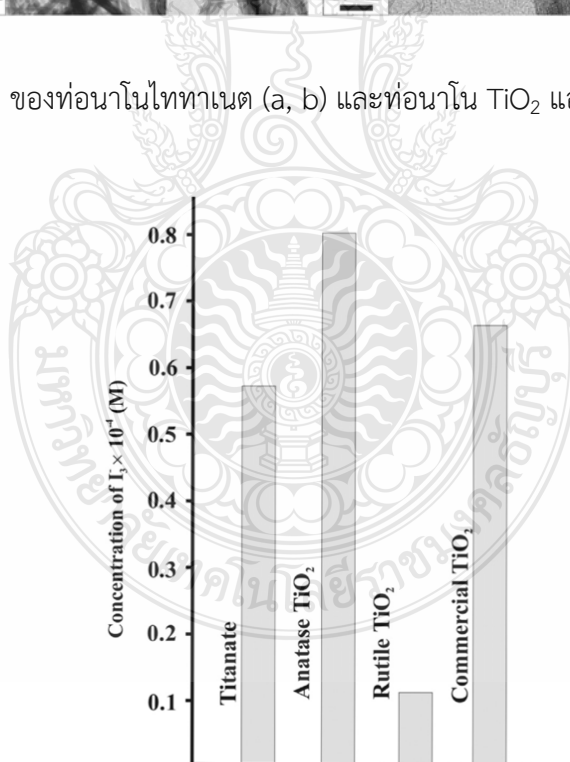


รูปที่ 2.19 กิจกรรมโฟโตแคตะไลติกของเส้นใยนาโนจากแร่ิลเมนไนต์ที่สังเคราะห์ขึ้น เส้นใยนาโนที่ผ่านการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่าง ๆ อนุภาคนาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ และเส้นใยนาโนจากแร่ลูโคซีน [41]

2.8.3 Deaw Aphairaj และคณะ [42] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและวิเคราะห์ท่อนาโน TiO_2 อนุภาตจากแร่ธรรมชาติลูโคซีนโดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 100 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์คือท่อนาโนไททาเนตและเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนเป็น TiO_2 อนุภาตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกประมาณ 6 และ 16 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีความยาวอยู่ในช่วง 20 ถึง 100 นาโนเมตร (รูปที่ 2.20) พื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของท่อนาโน TiO_2 อนุภาตอยู่ที่ประมาณ 82.98 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังพบว่ากิจกรรมโฟโตแคตะไลติกของท่อนาโน TiO_2 อนุภาต นั้นสูงกว่าของอนุภาคนาโนอนุภาต TiO_2 เซิงพาณิชย์ (JRC-01) ดังแสดงในภาพ 2.21

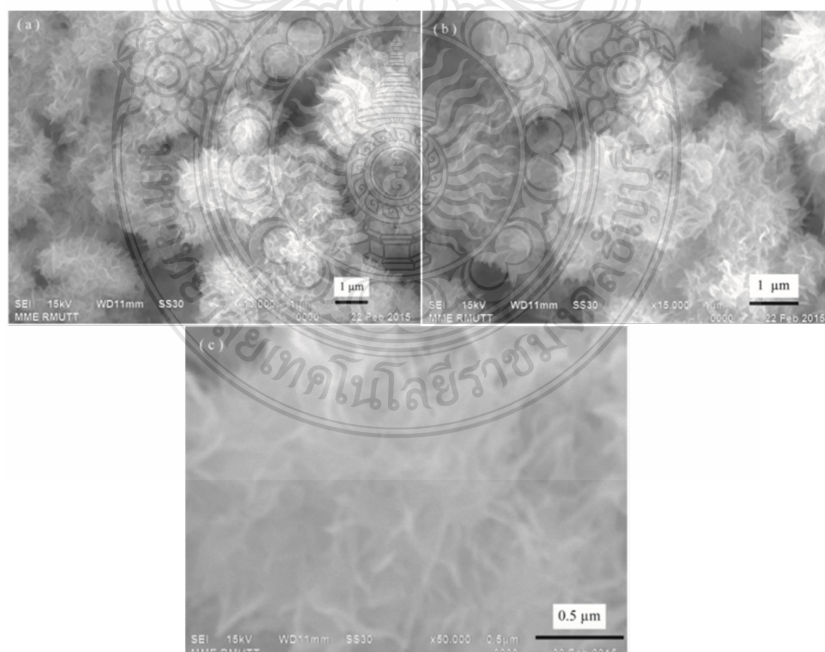


รูปที่ 2.20 ภาพ TEM ของท่อนาโนไททาเนต (a, b) และท่อนาโน TiO_2 แอนาเทส (c, d) [42]

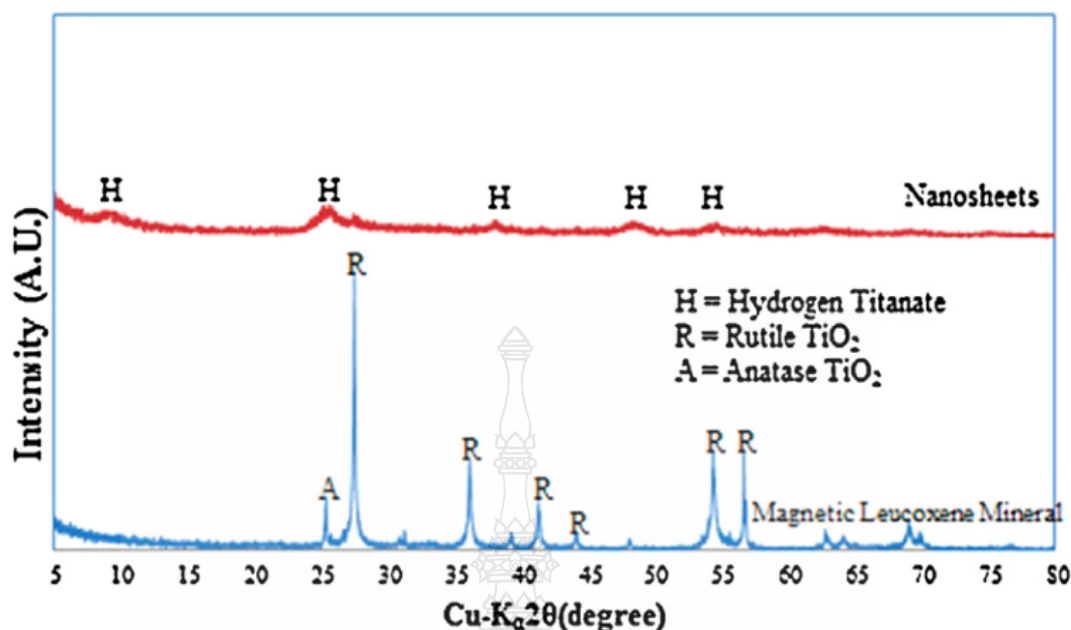


รูปที่ 2.21 กิจกรรมโฟโตแคตะไลติก (ความเข้มข้นของ I_3^-) ของท่อนาโนไททาเนต, ท่อนาโน TiO_2 อนาเทส, TiO_2 รูไทล์ และอนุภาคนาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ (JRC-01)

2.8.4 Wissanu Charerntanom และคณะ [43] ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์แผ่นนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์แร่แม็กเนติกลูโคซีนซึ่งมีองค์ประกอบของ TiO_2 อยู่ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างของแม็กเนติกลูโคซีนจากอนุภาคที่มีโครงสร้างแบบรูทูลเป็นแผ่นนาโนที่มีโครงสร้างแบบไททาเนต (Titanate, $\text{H}_2\text{Ti}_x\text{O}_{2x+1}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23 จากนั้นศึกษาการเผาแผ่นนาโนที่อุณหภูมิ 100 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าหลังจากการเผาในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่เผาแล้วจะแสดงโครงสร้างเป็น TiO_2 (B) ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส แผ่นนาโนที่เผาแล้วเผยให้เห็นส่วนผสมแบบผลึกคู่ซึ่งประกอบด้วย TiO_2 (B) และแอนาเทส TiO_2 ที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกแสดงเฟสแอนาเทสและรูทูล นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของแผ่นนาโนอยู่ที่ประมาณ 279.8 ตารางเมตรต่อกรัม และที่น่าสนใจคือแผ่นนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีกิจกรรมโฟโตแคตะไลติกที่สูงขึ้นและมากกว่าผงอนุภาคนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์ ทั้งในช่วงแสง UV และแสงที่มองเห็นได้ และในงานวิจัย [44] ผู้วิจัยยังได้ศึกษาการใช้แผ่นบางนาโนสำหรับย่อยสลายสีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue) ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสง UV จากการศึกษาพบว่าแผ่นนาโนที่ได้มีประสิทธิภาพในย่อยสลายสีย้อมมากกว่า TiO_2 เชิงพาณิชย์

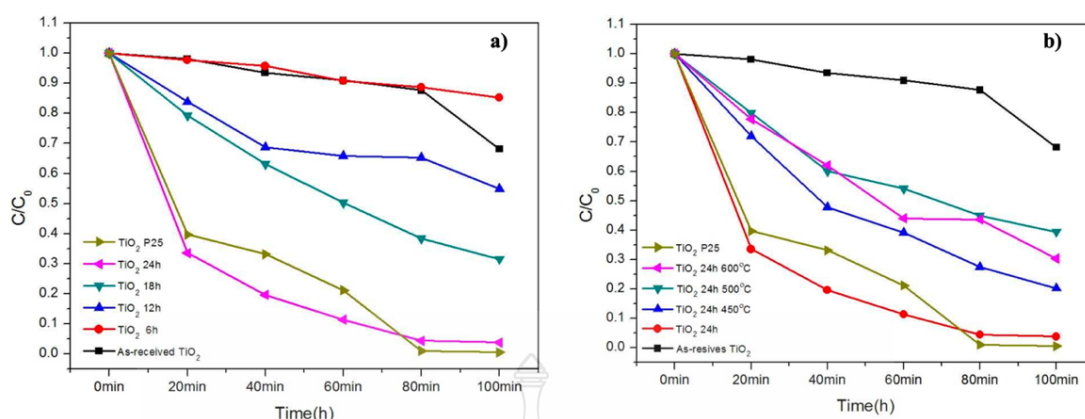


รูปที่ 2.22 ลักษณะของแผ่นนาโนจากแร่แม็กเนติกลูโคซีน



รูปที่ 2.23 โครงสร้างผลึกของแผ่นนาโนจากแร่แมกเนติกลูโคซีนก่อนและหลังสังเคราะห์

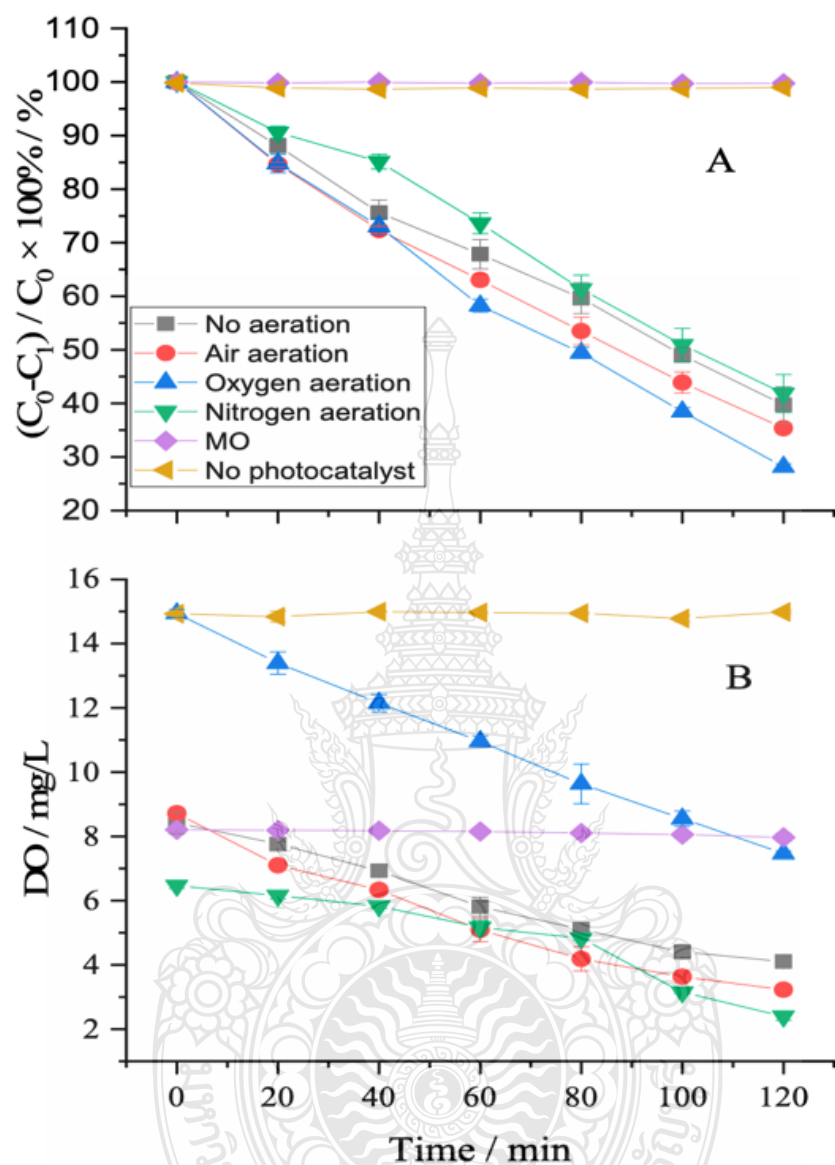
2.8.5 Jiravat Rattanak และคณะ [45] ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสำหรับทดสอบการย่อยสลายสีย้อม RhB ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงถูกเตรียมโดยใช้ผงแอนาเทส TiO_2 ที่ผ่านกระบวนการบดแบบลูกบอลโดยมีสารละลายเอทานอลในโถบด บดเป็นเวลา 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (annealed in nitrogen) ที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า TiO_2 ที่ผ่านการบดแบบลูกบอลมีขนาดของอนุภาคลดลงและพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบด ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม RhB ภายใต้แสงยูวีพบว่าเวลาในการบด TiO_2 มีผลทำให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบด โดยเวลาในการบด 24 ชั่วโมง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเทียบเท่า TiO_2 (P25) นอกจากนี้ยังพบว่าการอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนสามารถจัดสิ่งเจือปนได้อย่างมีนัยสำคัญ เพิ่มความบริสุทธิ์ของเฟสแอนาเทส ปรับปรุงความเป็นผลึก และกระตุ้นการรวมตัวกันของอนุภาค TiO_2 ซึ่งการรวมตัวกันของอนุภาค TiO_2 นี้อาจสกัดกั้นปฏิกิริยาการย่อยสลายสีย้อมทำให้มีประสิทธิภาพลดลงเมื่ออบที่อุณหภูมิเริ่มต้น และมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบแต่ยังคงน้อยกว่าตัวอย่างก่อนที่จะอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การย่อยสลายสีย้อม RhB ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ a) TiO_2 บดแบบลูกบอลที่เวลาต่าง ๆ b) TiO_2 บดแบบลูกบอล 24 ชั่วโมง และอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ [45]

2.8.6 N. HARUN และคณะ [46] ได้ศึกษาเกี่ยวกับได้ศึกษาเกี่ยวกับการการบำบัดสีย้อมสังเคราะห์โรดามีนบี (Rhodamine B, RhB) ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ภายใต้รังสี UV-C ที่มีความยาวคลื่นสั้น (พลังงานสูง) และได้มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide H_2O_2) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการย่อยสลายของสีย้อม RhB ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการที่ใช้ TiO_2 0.5 กรัมต่อลิตร และ H_2O_2 0.1 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม RhB ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 98

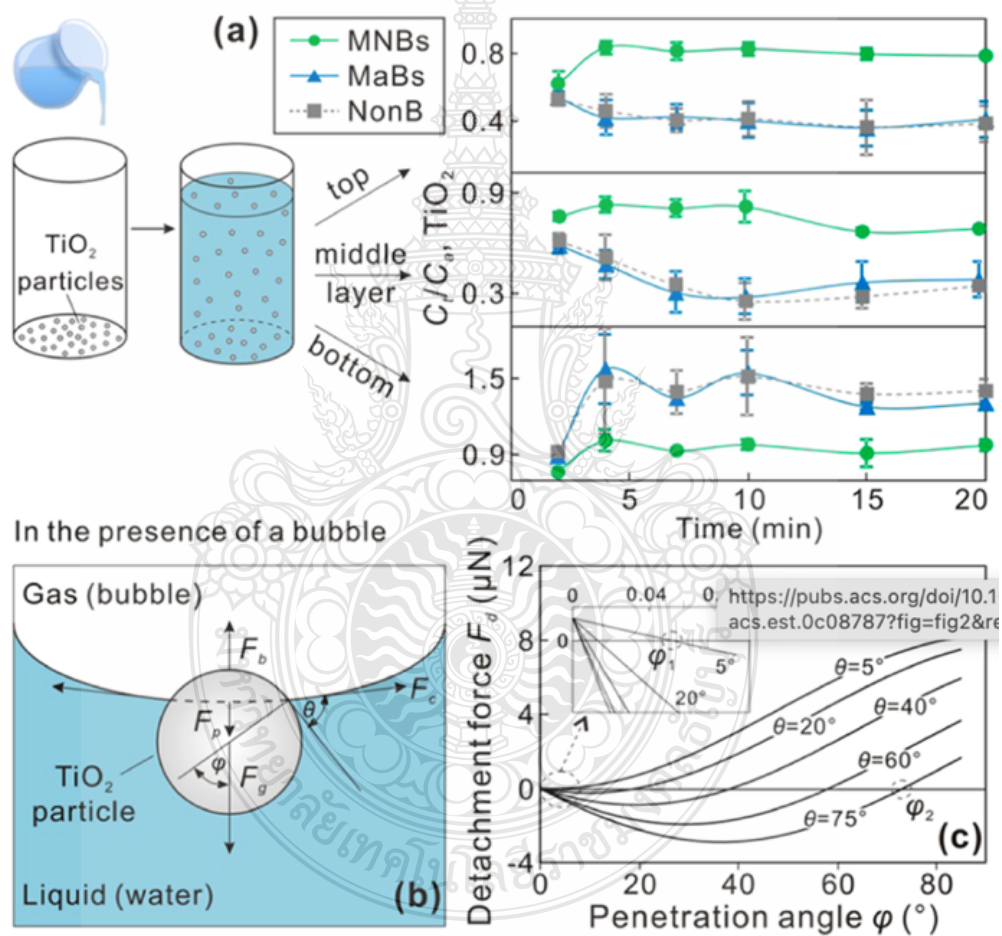
2.8.6 Weijia Yu และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่ใช้ TiO_2 (P25) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเพิ่มฟองอากาศนาโนที่บรรจุอากาศแตกต่างกันคือ อากาศสังเคราะห์ ไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) อย่างต่อเนื่องในกระบวนการเพื่อย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.25 พบว่าฟองอากาศออกซิเจน และฟองอากาศสังเคราะห์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลออเรนจ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.2 ± 3.5 (การเติมอากาศ N_2) เป็นร้อยละ 71.9 ± 0.6 (การเติมอากาศ O_2) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ได้ที่ 14.93 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ฟองนาโน O_2 เมื่อเปรียบเทียบกับ 8.43 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่มีการเติมอากาศ



รูปที่ 2.25 (A) การย่อยสลายสีย้อมเมทิลออเรนจ์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ (B) ปริมาณออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไป

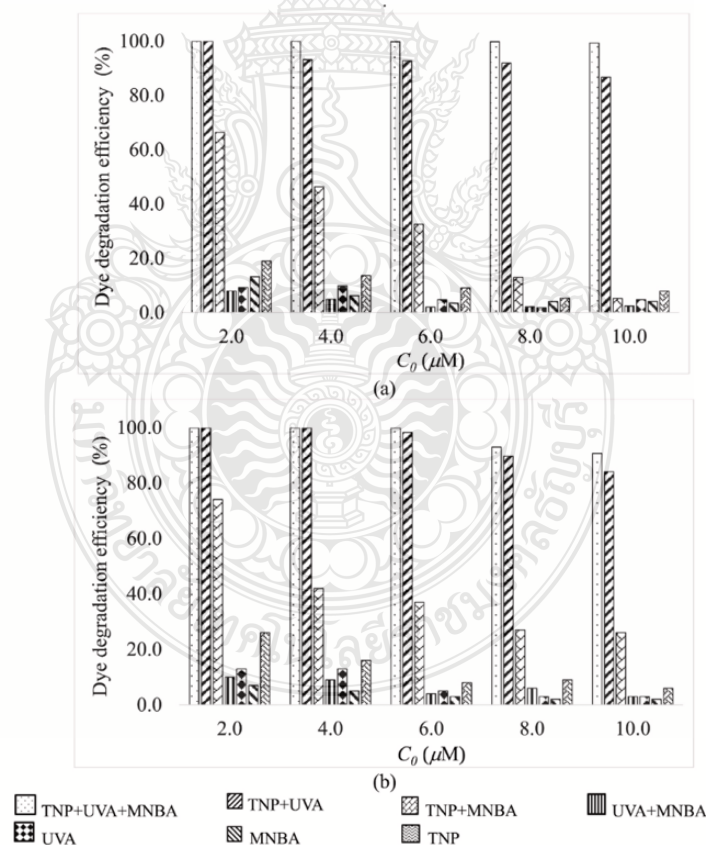
2.8.7 Wei Fan และคณะ [47] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสังเคราะห์เมทิลินบลูโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 (P25) ร่วมกับการเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโน (Micro/Nano Bubble, MNB) พบว่ากระบวนการที่มีการเติม MNB มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมมากกว่าร้อยละ 41-141 เมื่อเทียบกับการเติมฟองอากาศธรรมดา โดยการทดลองชี้ให้เห็นว่าการย่อยสลายด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากหลายปัจจัยคือ การละลายของ

ออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ความเสถียรของคอลลอยด์ที่ดีขึ้น (รูปที่ 2.26) และการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยานาโน TiO_2 และผลกระทบจากโฟโตอิเล็กทริกที่ผิวสัมผัสของสารแขวนลอย TiO_2/MNB ความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen, DO) สูงสุดของสารแขวนลอย MNB (นั่นคือ 11.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) สูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายในน้ำที่มีการเติมอากาศธรรมดาร้อยละ 32 (นั่นคือ 8.8 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้นจึงเร่งการเกิดออกซิเดชันของโพลีเมอร์ของน้ำบน TiO_2 นอกจากนี้ยังยืนยันเพิ่มเติมว่า MNB ทำให้เกิดผลการกระเจิงแสงที่แตกต่างซึ่งส่งผลให้ความยาวเส้นทางแสงในสารแขวนลอย TiO_2/MNB เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.6



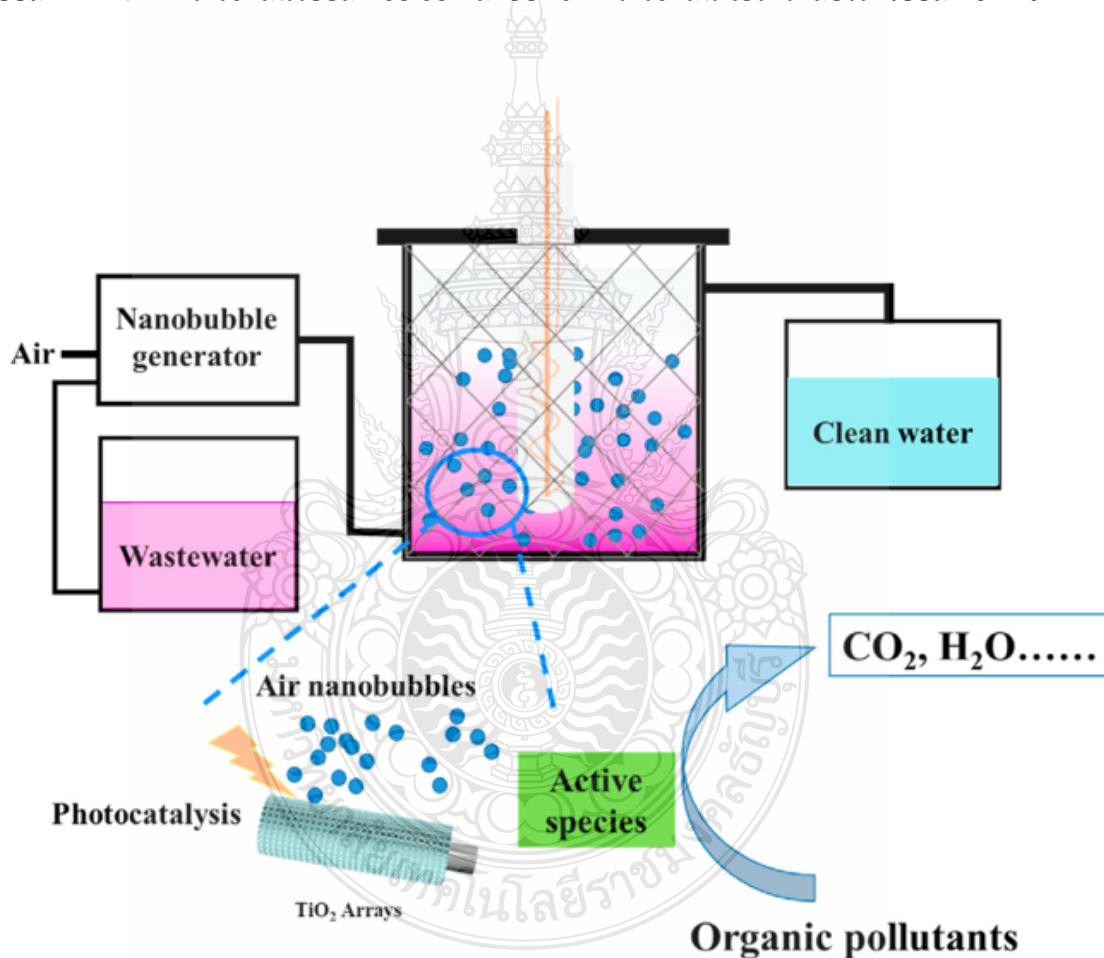
รูปที่ 2.26 ความเสถียรของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา [47] (a) ความเข้มข้นของอนุภาค TiO_2 ตามฟังก์ชันของเวลาในสารละลายสามแบบที่แตกต่างกันคือสารแขวนลอยที่ไม่เติมอากาศ เติมอากาศธรรมดา และเติม NMB (b) แผนผังแสดงแรงของอนุภาค TiO_2 ที่เกาะติดกับฟองอากาศ (c) แรงหลุดออกของอนุภาค TiO_2

2.8.8 Orawan Rojviroon และ Thammasak Rojviroon [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสังเคราะห์อินดิโกคาร์มีน (indigo carmine, IC) และรีแอ็กทีฟแบล็ก 5 (RB5) ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผงนาโน TiO_2 (TNP) ร่วมกับการเติมอากาศขนาดไมโคร/นาโน (Micro/Nano Bubble Aeration, MNBA) ผลการศึกษาพบว่าดังรูปที่ 2.26 เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของสีย้อม IC และ RB5 เริ่มต้นที่ $2\ \mu\text{M}$ ประสิทธิภาพการย่อยสลายของ TNP + UVA และ TNP + UVA + MNBA อยู่ที่ร้อยละ 100 ด้วยความเข้มข้นของสีย้อมที่สูงขึ้น ($4\text{--}10\ \mu\text{M}$) ประสิทธิภาพการย่อยสลายของ TNP + UVA และ TNP + UVA + MNBA อยู่ระหว่างร้อยละ 84.05 ถึง 98.20% และร้อยละ 90.64 ถึง 100 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสงของสีย้อมทั้งสองถูกอธิบายโดยแบบจำลองจลนศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยที่มี MNBA สูงกว่ากระบวนการที่ไม่มี MNBA สำหรับ IC และ RB5 อยู่ที่ 1.44 และ 1.66 เท่า



รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (C_0) : (a) IC, (b) RB5 [13]

2.8.9 Zesen Lin และคณะ [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องโฟโตแคตะไลติกควบคู่กับฟองนาโนเพื่อย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ในน้ำเสีย เครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยตาข่ายไทเทเนียมที่เคลือบด้วยอาร์เรย์ท่อนาโน TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.28 การใช้ฟองอากาศนาโนในเครื่องปฏิกรณ์จะเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตแคตะไลติก เครื่องปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกแสดงประสิทธิภาพโฟโตแคตะไลติกที่โดดเด่น และความสามารถในการย่อยสลายของโรดามีนบี คือร้อยละ 95.39 หลังจากการฉายรังสีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เครื่องปฏิกรณ์ยังแสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยแสงที่ดีเยี่ยมสำหรับสารมลพิษอินทรีย์อื่น ๆ เช่น เมทิลีนบลู ร้อยละ 74.23 เตตราไซคลินร้อยละ 68.68 และออกซิเตตราไซคลิน ไฮโดรคลอไรด์ร้อยละ 64.10



รูปที่ 2.28 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์โฟโตแคตะไลติกที่เชื่อมต่อกับฟองนาโนสำหรับการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ [12]

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ลำดับ	สารตั้งต้น	กระบวนการเตรียม	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	อ้างอิง (ปี)
1	Titanium (IV) butoxide	Hydrothermal ที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 12 ชม. โดยใช้สารละลาย Ammonia aqueous 28%	แผ่นนาโนรูปร่างคล้ายดอกไม้ เส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 50–100 nm พื้นที่ผิวจำเพาะ BET 642 m ² /g	[40] 2007
2	Ilmenite	Hydrothermal ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 72 ชม. โดยใช้สารละลาย NaOH 10 M	เส้นใยนาโน เส้นผ่านศูนย์กลาง 20–90 nm และยาว 2–7 mm พื้นที่ผิวจำเพาะ BET 50 m ² /g	[41] 2013
3	Leucosene	Hydrothermal ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชม. โดยใช้สารละลาย NaOH 10 M	ท่อนาโน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและ ภายนอกประมาณ 6 และ 16 nm พื้นที่ผิวจำเพาะ BET 103.8 m ² /g	[42] 2014
4	magnetic leucosene	Hydrothermal ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชม. โดยใช้สารละลาย NaOH 5 M	แผ่นนาโนรูปร่างคล้ายดอกไม้ เส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 100 nm–2 µm พื้นที่ผิวจำเพาะ BET 279.8 m ² /g	[43] 2017

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสง UV สำหรับย่อยสลายสีย้อม

ลำดับ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	วิธีเพิ่มประสิทธิภาพ	ผลที่ได้	อ้างอิง (ปี)
1	Magnetic Leucosene	สังเคราะห์วัสดุให้เป็นแผ่น นาโนด้วยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอล	ย่อยสลายสีย้อม Methylene Blue ได้ 96.8 % มีประสิทธิภาพมากกว่าท่อนาโน TiO ₂ และ P25 เชิงพาณิชย์	[44] 2017
2	TiO ₂	เติม H ₂ O ₂ 1 M	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B 98% เมื่อมีการเติม H ₂ O ₂ 1 M	[46] 2020
3	TiO ₂ (P25)	เติมฟองอากาศ ไมโคร/นาโน	กระบวนการที่มีการเติม MNB มีอัตราการย่อย สลายสีย้อม Methylene Blue มากกว่า 41– 141% เมื่อเทียบกับการเติมฟองอากาศธรรมดา	[47] 2021
4	TiO ₂ (P25)	เติมฟองอากาศนาโน ที่ใช้ N ₂ , O ₂ , Synthetic air	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อม Methyl Orange เพิ่มขึ้นจาก 58.2 ± 3.5% (การเติม อากาศ N ₂) เป็น 71.9 ± 0.6% (เติมอากาศ O ₂)	[14] 2021

ตารางที่ 2.3 ตารางสรุปงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสง UV สำหรับย่อยสลายสีย้อม (ต่อ)

ลำดับ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	วิธีเพิ่มประสิทธิภาพ	ผลที่ได้	อ้างอิง (ปี)
5	TiO ₂ Nanopowder Photocatalyst	เติมฟองอากาศ (O ₂) ไมโคร/นาโน	เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสี indigo carmine, reactive black 5 ย้อมเพิ่มขึ้นจาก 84.05–98.20% กลายเป็น 90.64–100% เมื่อมี การเติมฟองอากาศไมโคร/นาโน	[13] 2022
6	TiO ₂ Nanotube Arrays	เติมฟองอากาศนาโน	ย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B ได้ 95.39% และ Methylene Blue 74.23% เมื่อมีการเติม ฟองอากาศไมโคร/นาโน	[12] 2023



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์วัสดุนาโนจากแร่ธรรมชาติในประเทศไทยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมของวัสดุนาโนร่วมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสงยูวี

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1.1 แร่ลูโคซีน บริษัท สิ้นแร่สาคร จำกัด
- 3.1.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
- 3.1.1.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
- 3.1.1.4 ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (Degussa P25 TiO₂)
- 3.1.1.5 สีย้อมเมทิลีนบลู (Methylene Blue, MB)

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.2.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ขนาด 200 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.1)
- 3.1.2.2 เครื่องบดอนุภาคด้วยลูกบด (Planetary Ball Mill) ยี่ห้อ Fritsch ชื่อรุ่นทางการค้า PULVERISETTE 5 classic line
- 3.1.2.3 เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ (รูปที่ 3.2)
- 3.1.2.4 ชุดกรองสุญญากาศ
- 3.1.2.5 แผ่นกรองสาร 0.2 ไมครอน
- 3.1.2.4 ตู้อบสารเคมี
- 3.1.2.5 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.1.2.6 เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง
- 3.1.2.7 เครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer)
- 3.1.2.8 ชุดทดลองกระบวนการโฟโตแคตะไลติก
- 3.1.2.9 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ขนาด 200 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.2 เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

3.1.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.1.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

3.1.3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3.1.3.4 เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

3.1.3.5 เครื่องบรูว์นเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (BET)

3.1.3.6 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Spectroquant Prove 600

3.1.3.3 เครื่องวัดขนาดและกระจายตัวของอนุภาค Nanosight รุ่น NS 300

3.1.3.4 เครื่องวัดออกซิเจนในน้ำ (DO Meter)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การสังเคราะห์วัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีนด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

3.2.1.1 บดลูโคซีนด้วยเครื่อง Planetary Ball Mill บดด้วยลูกเซอร์โคเนีย ขนาด 5 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างตัวอย่างกับลูกบดคือ 1 ต่อ 10 โดยใช้สภาวะการบดที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

3.2.1.2 ชั่งแร่ลูโคซีนที่ผ่านการบดแล้วปริมาณ 8 กรัม ใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ในชุดปฏิกิริยาทำด้วยสแตนเลสที่เคลือบด้วยเทฟลอนอยู่ภายใน แล้วให้ความร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารตลอดระยะเวลาการสังเคราะห์ เมื่อครบเวลาทำการปิดเครื่องปฏิกิริยาแล้วปล่อยให้สารเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

3.2.1.3 นำสารที่ได้มากรองสารละลายออกด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศโดยใช้แผ่นกรองที่มีความละเอียดในการกรอง 0.2 ไมครอน จากนั้นนำสารบนแผ่นกรองไปล้างในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ตามด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ประมาณ 6 ถึง 7 แล้วจึงกรองสารแล้วนำสารที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้เป็นตัวอย่างนาโนลูโคซีน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200–800 องศาเซลเซียส

3.2.2 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

3.2.2.1 เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยเติมสีย้อมเมทิลีนบลูลงในน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

3.2.2.2 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วเริ่มกระบวนการโฟโตแคตะไลติก โดยการกวนอย่างต่อเนื่องในที่ที่บแสงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงเริ่มฉายแสง UV ในเวลาต่ออีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง รวมระยะเวลา 3 ชั่วโมง

3.2.2.3 เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโฟโตแคตะไลติก ที่เวลา 0, 10, 20, 30 และ 60 นาที ที่สภาวะที่บแสง และที่เวลา 10, 20, 30, 60, 90, และ 120 ที่สภาวะรับแสง

3.2.2.4 นำน้ำตัวอย่างที่เก็บได้แต่ละเวลา 10 มิลลิลิตร มาแยกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.2.2.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ผ่านการแยกในช่วงความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร และคำนวณความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลือในตัวอย่าง

3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อม RhB ของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีนร่วมกับการเติมฟองอากาศขนาดเล็กด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

ทำการทดลองเหมือนในหัวข้อ 3.2.2 โดยมีการเติมฟองอากาศขนาดเล็กลงในน้ำเสียสังเคราะห์เมทิลีนบลูก่อนแล้วจึงเริ่มกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.3.1 วัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน

โครงสร้างผลึกและเฟสของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกซ์ (XRD: X'Pert PRO MPD Model pw 3040/60, PAN Alytical) กับ Cu K α ($\lambda = 0.154$ นาโนเมตร) ช่วง 2θ ของ 5 ถึง 80 องศา องค์ประกอบของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF: ED-2000, Oxford) ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ที่เตรียมได้นั้นถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM: JSM-6510 JEOL) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM: JEM-2010, JEOL) สำหรับพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของตัวอย่างนั้นถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธี The Brunauer-Emmett Teller (BET: BELSORP-Mini, Rubotherm)

3.3.2 ฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

3.3.2.1 วัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค ตามมาตรฐาน 19430

วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค การวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Nanosight รุ่น NS 300 ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทดสอบผ่านโปรแกรม Nanosight NTA ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทดสอบตัวอย่างละ 5 นาทีแบ่งเป็นรอบรอบละ 1 นาที จากนั้นโปรแกรมสรุปค่าออกมาเป็นกราฟที่บอกถึงขนาดและการกระจายตัว

3.3.2.2 วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำ

วิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนโดยใช้เครื่อง DO meter ใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 25 องศาเซลเซียส ทดสอบตั้งแต่น้ำที่ยังไม่ผ่านการผลิตฟองอากาศไปจนถึงผ่านการผลิตฟองอากาศเป็นเวลา 20 นาที ระหว่างขั้นตอนการผลิตฟองอากาศแบ่งวัดทุก ๆ 1 นาที

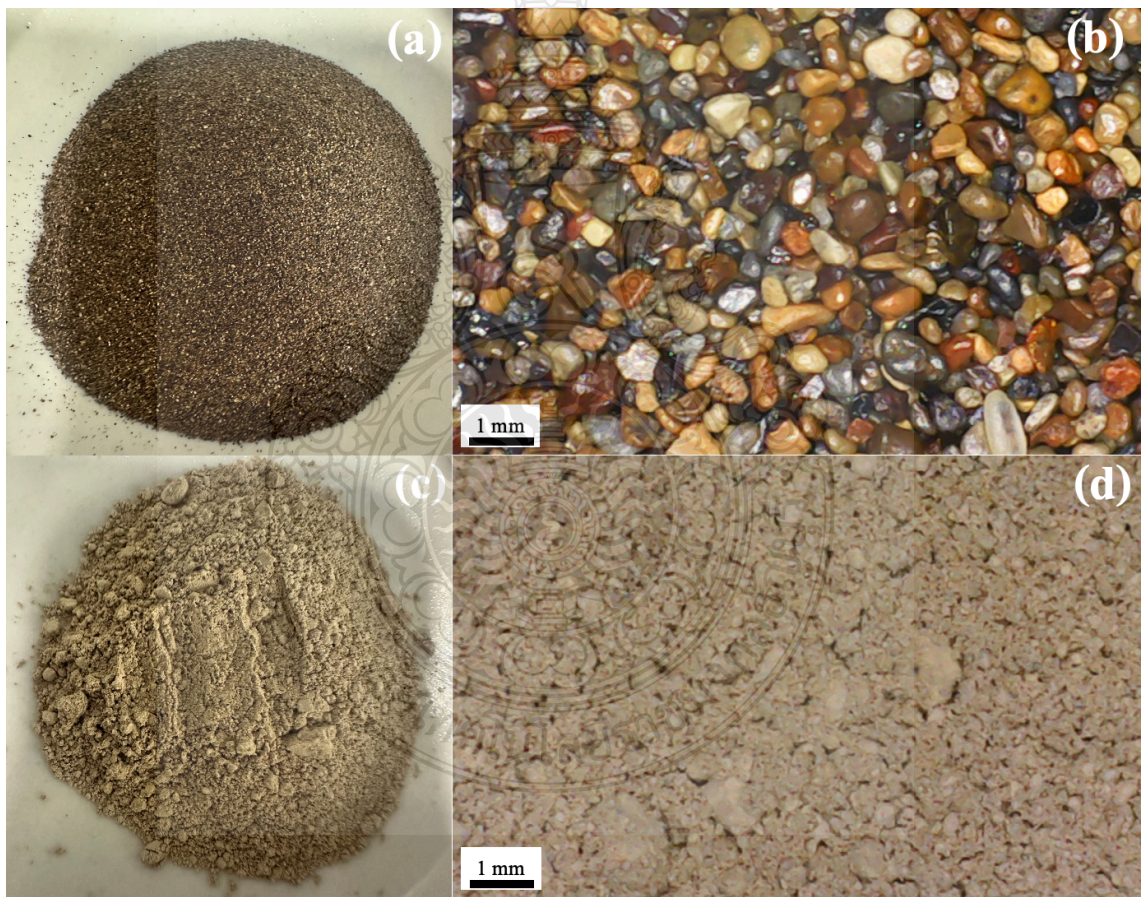
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน

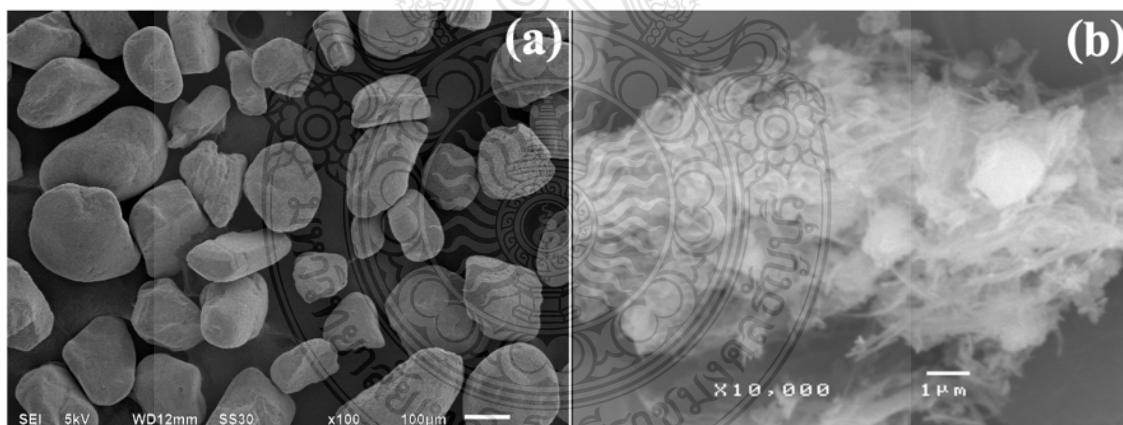
4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง

ลักษณะของแร่ลูโคซีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าแร่ลูโคซีนก่อนสังเคราะห์มีลักษณะเป็นก้อนคล้ายทรงกลมที่มีหลายสีและเมื่อผ่านการสังเคราะห์แร่ลูโคซีนมีลักษณะเป็นผงที่มีความละเอียดมากขึ้นและมีสีน้ำตาลอ่อน

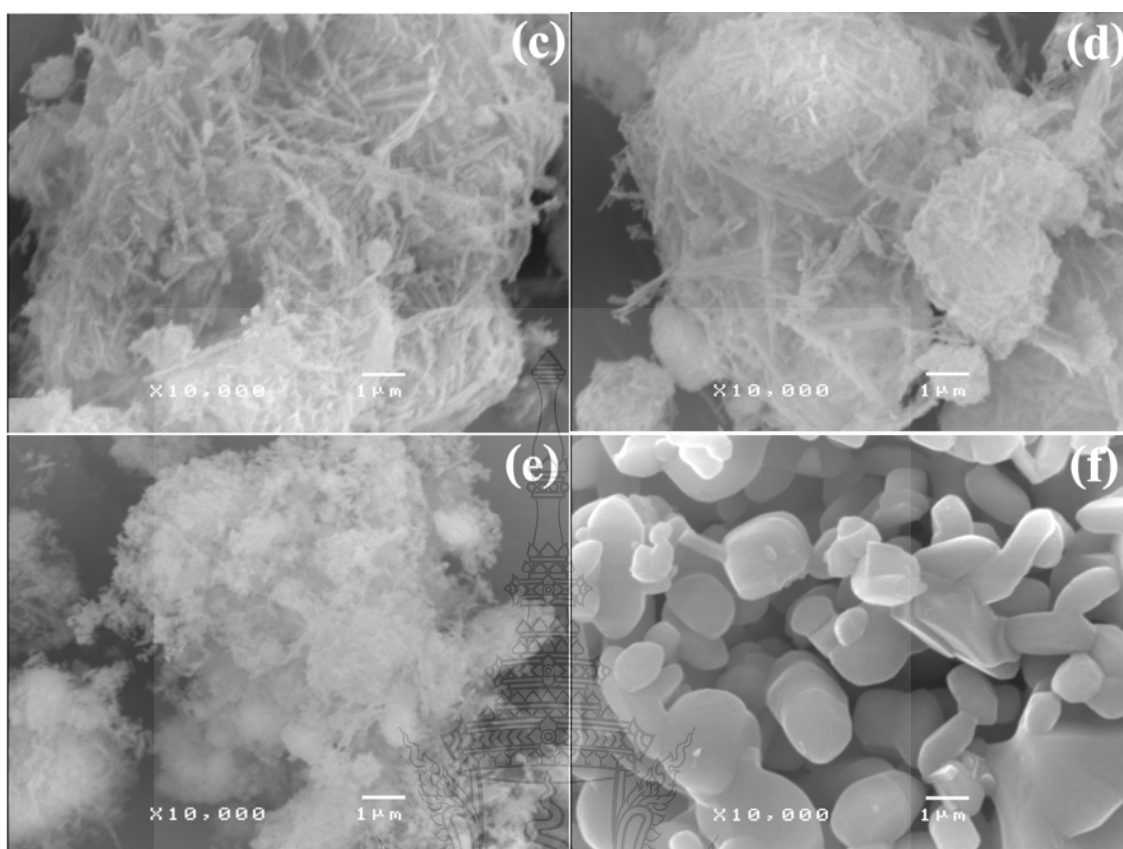


รูปที่ 4.1 ลักษณะของตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วย OM (a, b) แร่ลูโคซีน และ (c, d) นาโนลูโคซีน

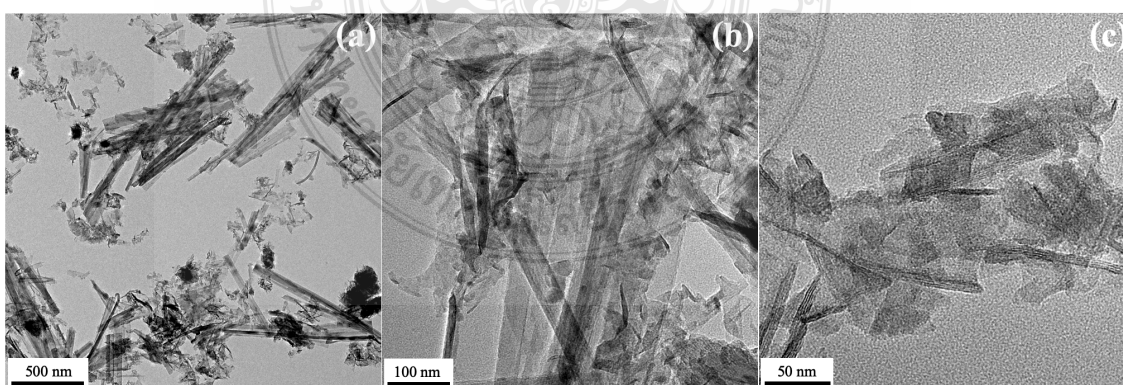
ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของตัวอย่างแร่ลูโคซีน และวัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ลูโคซีนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าแร่ลูโคซีนก่อนผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนขนาด 100–200 ไมโครเมตร และเมื่อผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นนาโนลูโคซีนส่งผลให้มีลักษณะสัณฐานวิทยาเปลี่ยนเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคที่มีการรวมตัวของอนุภาคและแท่งซึ่งยังไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นแท่งนาโน เส้นใยนาโน หรือท่อนาโน โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วย TEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลุ่มก้อนอนุภากดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวของแผ่นนาโนและแท่งนาโน [42, 43] ซึ่งท่อนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร เมื่อนาโนลูโคซีนถูกเผาด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ลักษณะสัณฐานวิทยามีลักษณะคล้ายเดิม แต่เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบการหายไปของแผ่นนาโนและมีการเปลี่ยนแปลงของท่อโนที่ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในลดลง เมื่อนาโนลูโคซีนถูกเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าท่อนาโนที่มีลักษณะทรงกลวงถูกเปลี่ยนเป็นแท่งนาโนที่ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงตัน และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าแท่งนาโนเกิดการหดตัวและเกาะกลุ่มกลายเป็นอนุภาคลักษณะคล้ายทรงกลมตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ไมครอน



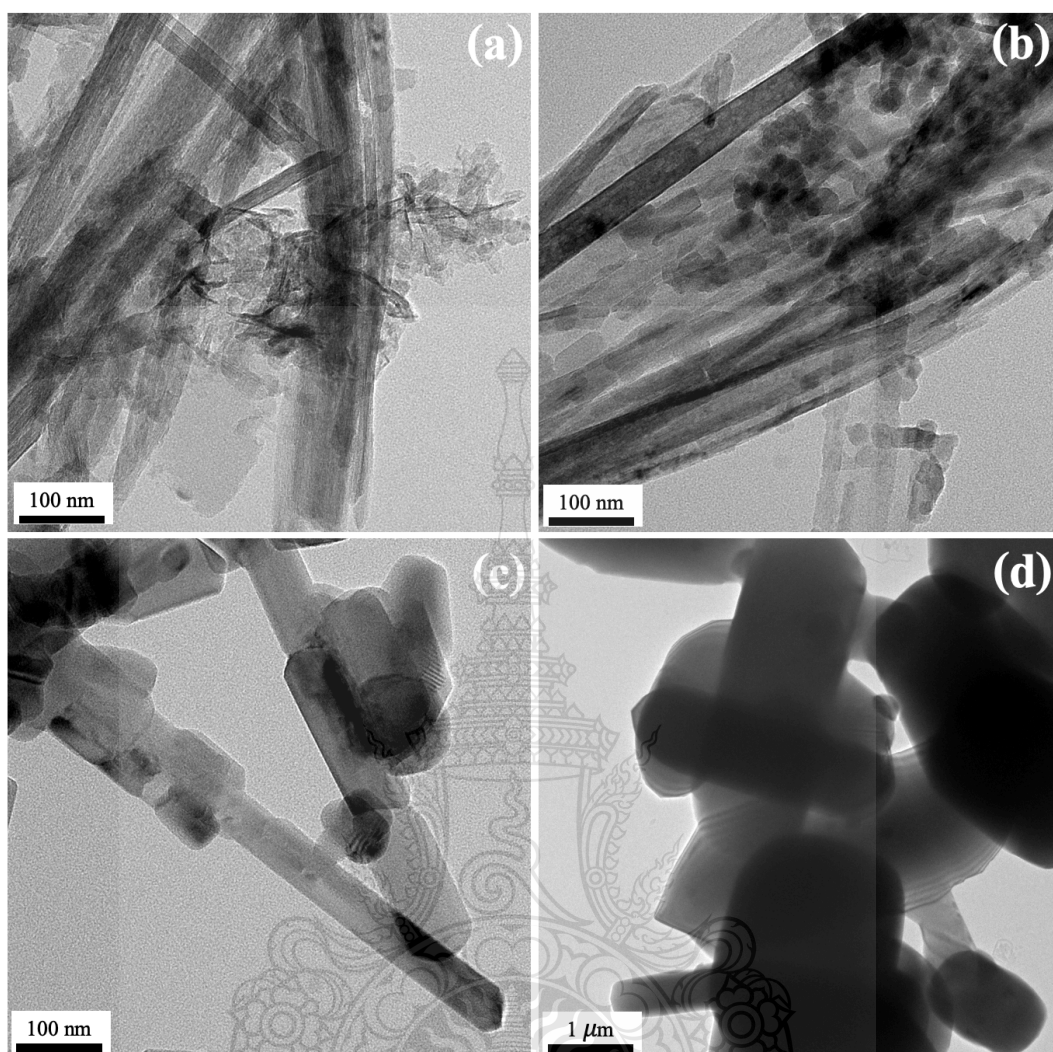
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของแร่ลูโคซีน นาโนลูโคซีน และนาโนลูโคซีนหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) แร่ลูโคซีน, (b) นาโนลูโคซีน, (c) 200 °C, (d) 400 °C, (e) 600 °C และ (f) 800 °C



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย SEM ของแรลลูโคซีน นาโนลูโคซีน และนาโนลูโคซีน หลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) แรลลูโคซีน, (b) นาโนลูโคซีน, (c) 200 °C, (d) 400 °C, (e) 600 °C และ (f) 800 °C (ต่อ)



รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ นาโนลูโคซีนที่ภาพกำลังขยาย (a) 12,000 เท่า , (b) 50,000 เท่า และ (c) 100,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วย TEM ของ นาโนรูโคซินหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (a) 200 °C, (b) 400 °C, (c) 600 °C และ (d) 800 °C

4.1.2 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารประกอบของตัวอย่าง

การศึกษาชนิดและปริมาณสารประกอบของแร่ลูโคซิน และวัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ลูโคซินด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าแร่ลูโคซินก่อนผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีปริมาณของสารประกอบ TiO_2 ร้อยละ 90.88 และมีปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 91.24 เมื่อผ่านการสังเคราะห์เป็นนาโนลูโคซิน ซึ่งปริมาณ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการลดลงของเหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ปะปนอยู่ในแร่ [43] โดยภายในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยสารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิสูงส่งผลทำให้เหล็กเกิดการละลายใน

สารละลายและเมื่ออุณหภูมิต่ำลงเหล็กที่ถูกละลายจะจับตัวเป็นก้อนบางส่วนและตกตอน [41-43] จากนั้นจะถูกกำจัดออกระหว่างการกรอง ส่งผลให้สารประกอบ Fe_2O_3 ของแร่ลดลงจากร้อยละ 3.03 เป็นร้อยละ 2.40

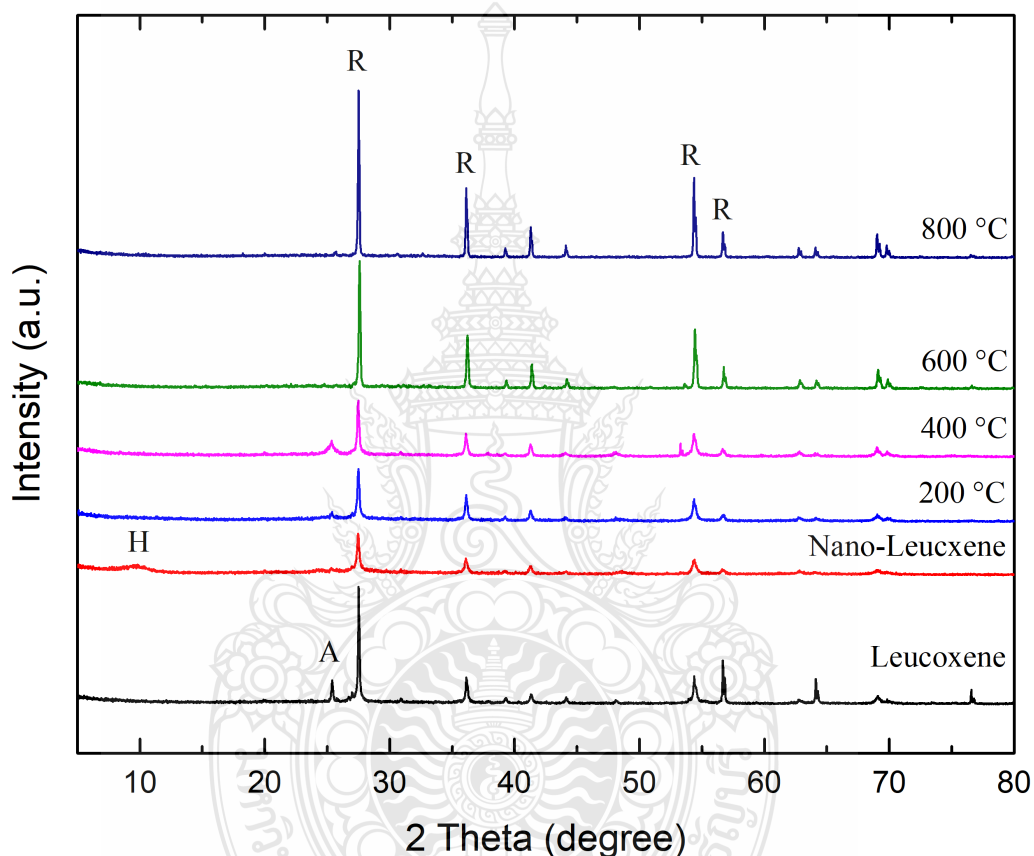
ตารางที่ 4.1 ชนิดและปริมาณสารประกอบของแร่ลูโคซีนก่อนและหลังสังเคราะห์

สารประกอบออกไซด์	แร่ลูโคซีน (%)	นาโนลูโคซีน (%)
TiO_2	90.88	91.24
Fe_2O_3	3.03	2.40
ZrO_2	1.86	2.03
SiO_2	1.94	0.97
Al_2O_3	0.94	0.38
Nb_2O_5	0.47	0.37
V_2O_5	0.47	0.51
CaO	0.08	0.97
K_2O	0.05	0.07
P_2O_5	0.07	0.03
Y_2O_3	0.04	0.03
HfO_2	0.03	0.03
WO_3	0.04	0.02
ThO_2	0.03	0.03
SO_3	0.04	0.05
MnO	0.03	0.03

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่าง

การศึกษาโครงสร้างผลึกของแร่ลูโคซีน และวัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ลูโคซีน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าแร่ลูโคซีนก่อนผ่านการสังเคราะห์ด้วย กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอนาเทสโดยที่มีการปริมาณผลึกแบบรูไทล์ สูงกว่าผลึกแบบอนาเทส และเมื่อผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นนาโนลูโคซีน ส่งผลให้วัสดุมีปริมาณผลึกของรูไทล์และอนาเทส นอกจากนี้พบการปรากฏของโครงสร้างผลึกแบบ ไฮโดรเจนไททานเนต ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่แสดงถึงการมีอยู่ของอะตอมไฮโดรเจนอันเนื่องมาจากน้ำใน

กระบวนการสังเคราะห์ [41-43] โครงสร้างผลึกของนาโนลูโคซีนพบว่าการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 200 องศาเซลเซียส ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแบบไฮโดรเจนถูกกำจัดออก เมื่อเผาส่งผลให้ของปริมาณโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอนาเทสมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุถูกเผาด้วยอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ไม่พบโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเหลือเพียงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์

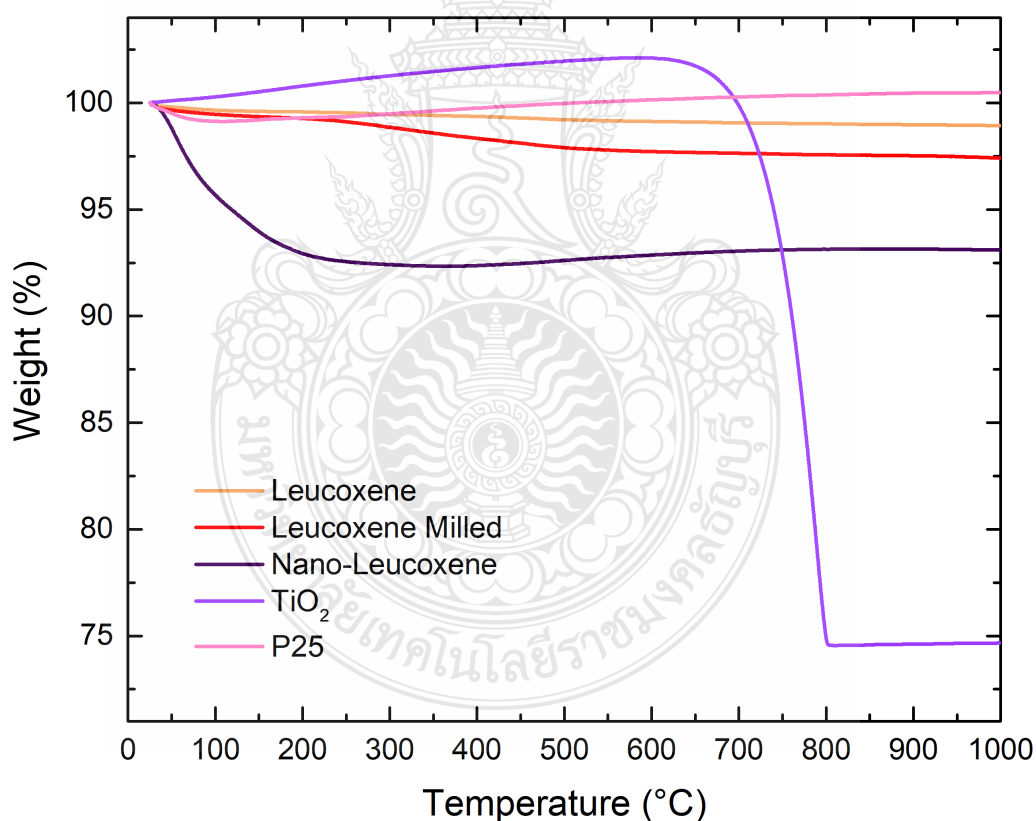


รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของแรลูโคซีน นาโนลูโคซีน และนาโนลูโคซีนหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A = anatase TiO₂, R = rutile TiO₂ และ H = hydrogen titanate)

4.1.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของแรลูโคซีน และวัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ลูโคซีนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าแรลูโคซีนและแรลูโคซีนที่ผ่านการบำบัดด้วยบอลมิลล์พบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้น้ำหนักลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่นาโนลูโคซีนในช่วงการเผา

100–200 องศาเซลเซียส พบว่ามีการลดลงอย่างมากเนื่องจากการสลายตัวของโมเลกุลน้ำภายในโมเลกุล [41-43] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบไฮโดรเจนไททาเนตที่มีน้ำอยู่ในโมเลกุลและโครงสร้างของไฮโดรเจนไททาเนตหายไปเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส ภายหลังการถูกเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักของนาโนลูโคซีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการรวมตัวของท่อนาโนและแผ่นนาโนจนกลายเป็นอนุภาคนาโน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ SEM และ TEM นอกจากนี้ น้ำหนักของนาโนลูโคซีน TiO_2 และ P25 ในสภาวะอุณหภูมิหนึ่งน้ำหนักมีการเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากวัสดุดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง (สอดคล้องกับผลการทดสอบการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนในหัวข้อที่ 4.1.5) ส่งผลให้เกิดการดูดซับก๊าซระหว่างการเผาทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น [48] อีกสาเหตุหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของ TiO_2 โดยก๊าซออกซิเจนปริมาณเล็กน้อยภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน (เตาไม่สามารถกันแก๊สได้สมบูรณ์) [49]



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของแร่ลูโคซีน นาโนลูโคซีน และสารเปรียบเทียบกับ TiO_2 เชิงพาณิชย์

4.1.5 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

การดูดซับไนโตรเจนถูกนำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของ BET ของวัสดุตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ วัสดุตั้งต้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 0 ตารางเมตร/กรัม เนื่องจากวัสดุก่อนการสังเคราะห์มีขนาดอนุภาคใหญ่ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะที่สามารถใช้ดูดซับก๊าซมีน้อยมากและอาจมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เหมาะสมสำหรับการดูดซับก๊าซ เช่น ไม่มีรูพรุนหรือมีโครงสร้างที่ไม่เอื้อต่อการเข้าถึงของก๊าซ หลังการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นาโนลูโคซีนมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 88.194 ตารางเมตร/กรัม และปริมาตรรูพรุน 0.112 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม นอกจากนี้ พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคไมโคร TiO_2 และอนุภาคนาโน TiO_2 (P25) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีค่าเท่ากับ 21.175 และ 48.675 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของ BET และปริมาตรรูพรุนของแผ่นนาโน วัสดุตั้งต้น อนุภาคไมโคร TiO_2 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และอนุภาคนาโน TiO_2 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (P25)

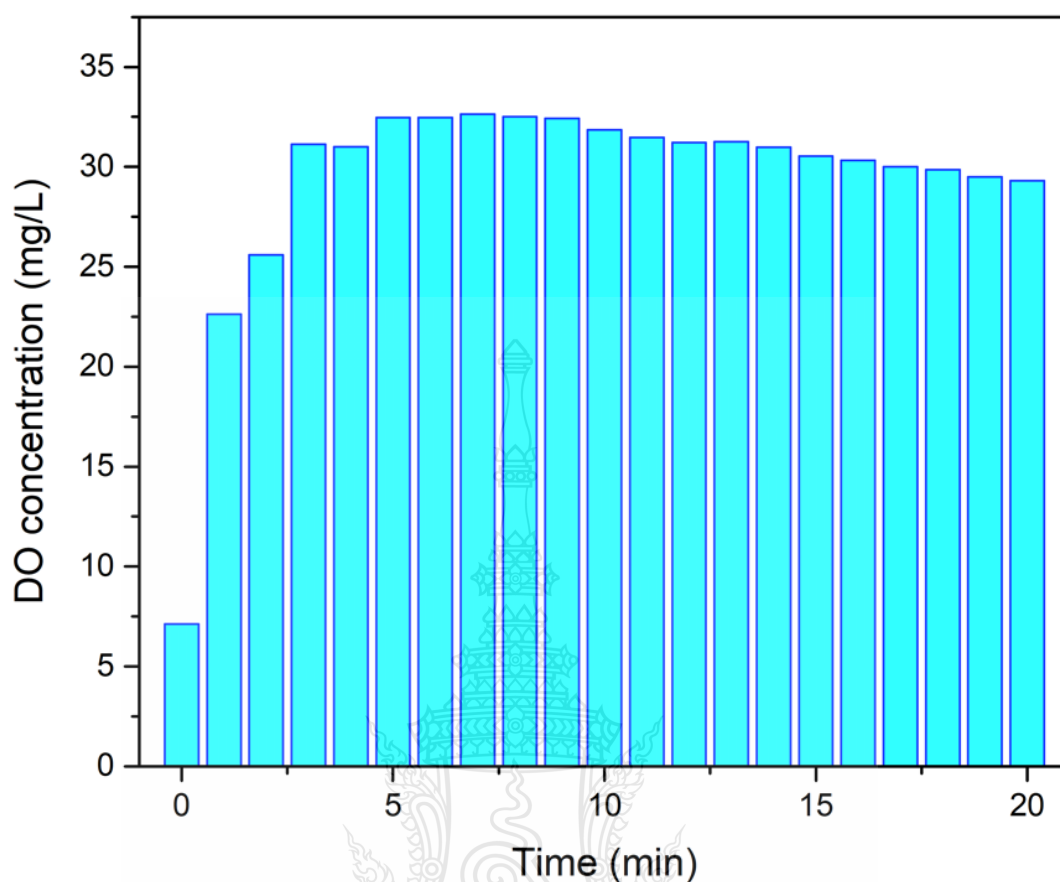
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของนาโนลูโคซีนและสารเปรียบเทียบ TiO_2 และ P25

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)
แร่ลูโคซีน	~0	-
นาโนลูโคซีน	88.194	0.112
ไมโคร TiO_2	21.175	0.036
นาโน TiO_2 (P25)	48.675	0.108

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำที่เติมฟองอากาศขนาดเล็ก

4.2.1 ปริมาณออกซิเจน

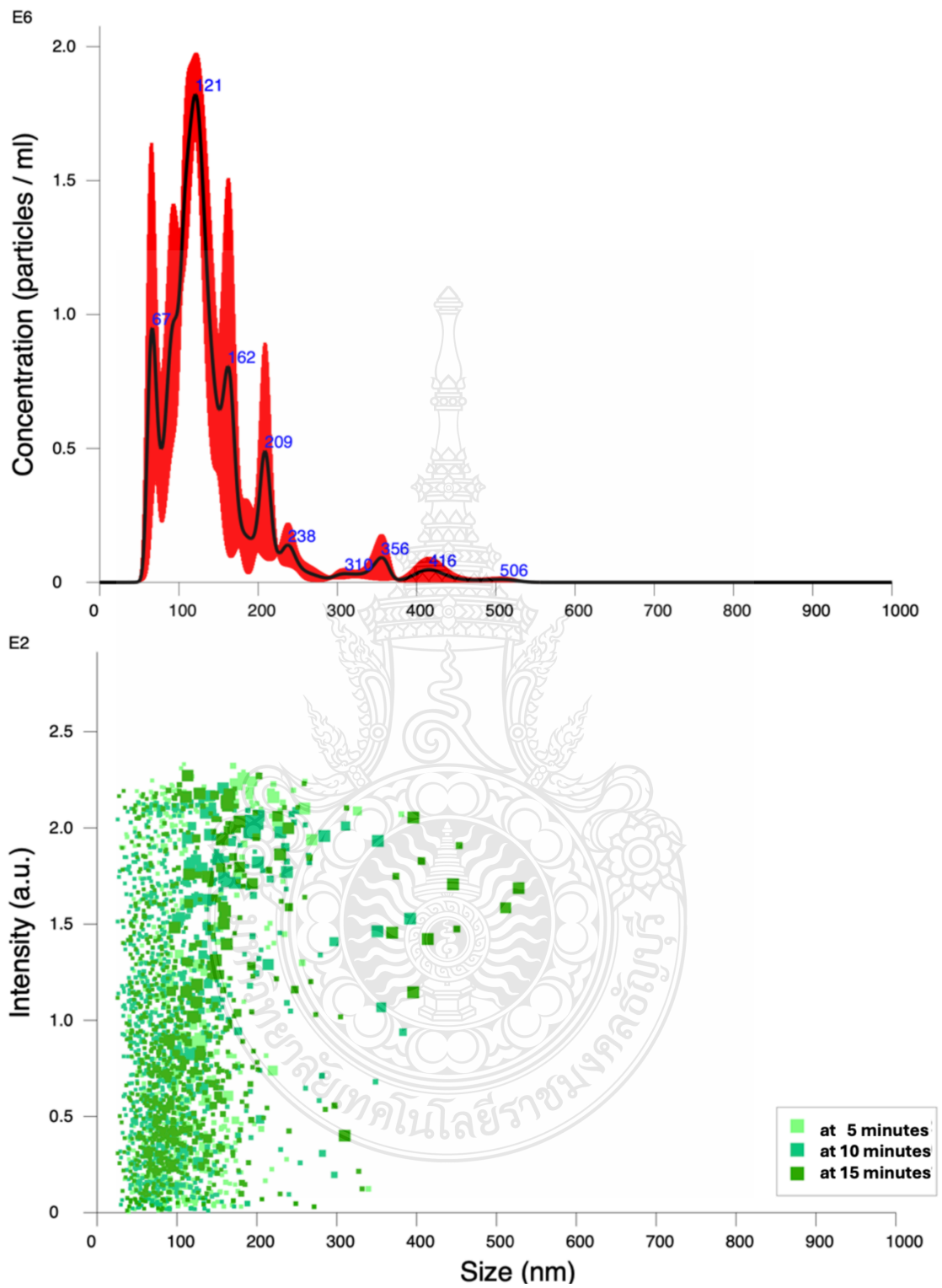
การศึกษาปริมาณออกซิเจนในน้ำที่มี UFB ด้วยเครื่อง DO meter ดังแสดงดังรูปที่ 4.7 จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณของออกซิเจนในน้ำที่ไม่มี UFB มีปริมาณของออกซิเจนอยู่ที่ 9 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อทำการผลิต UFB ลงในน้ำ ใน 1 นาทีแรกปริมาณออกซิเจนเริ่มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีปริมาณสูงสุดที่เวลา 5 นาที ปริมาณออกซิเจนเท่ากับ 32.47 มิลลิกรัม/ลิตร และเริ่มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปและเริ่มมีค่าคงที่อยู่ที่ 29 ถึง 30 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำที่มี UFB มีค่าออกซิเจนที่มากกว่าน้ำปกติได้ [14, 50] โดยสามารถเพิ่มออกซิเจนได้มากกว่า 4 เท่า



รูปที่ 4.7 ปริมาณออกซิเจนในน้ำที่มีการเติม UFB

4.2.2 การวิเคราะห์ขนาดของฟองอากาศในน้ำ

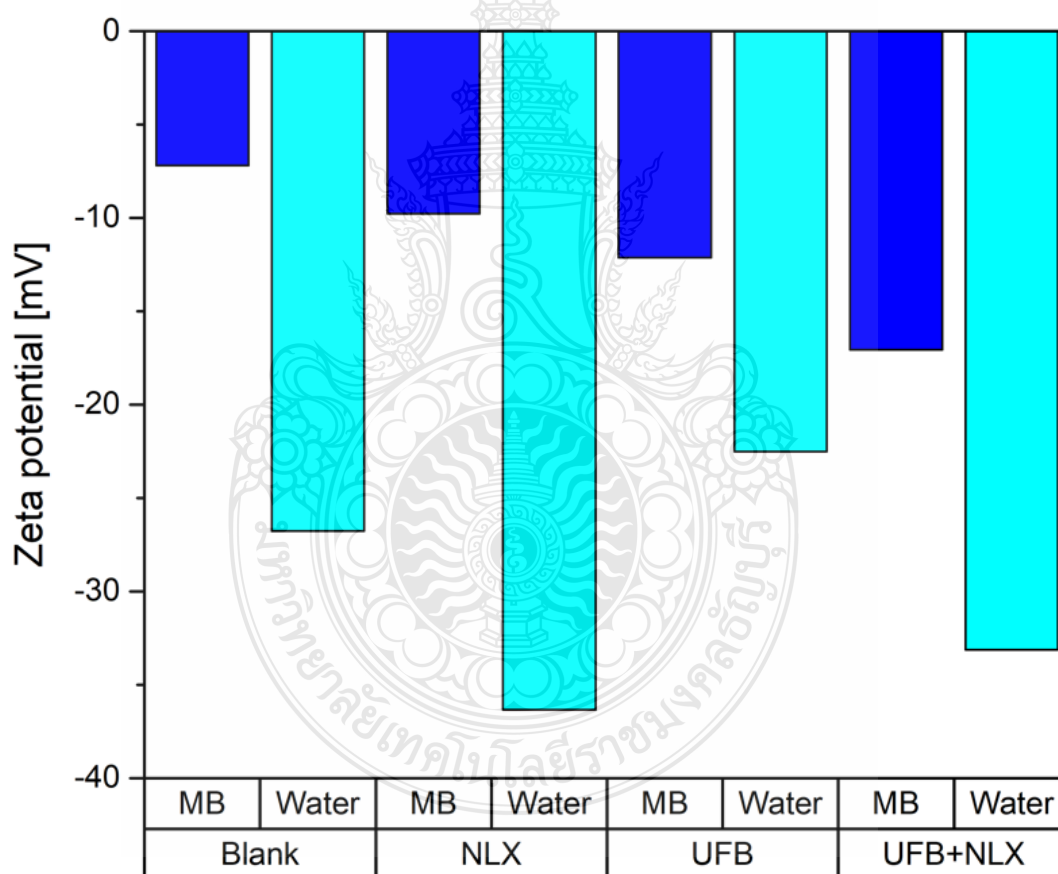
การศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในน้ำที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องผลิต UFB โดยตรวจตัวอย่างฟองอากาศเป็นเวลา 15 นาที ผลการตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (NanoSight, NS300) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 140.0 ± 4.8 นาโนเมตร โดยมีการกระจายตัวของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 50–500 นาโนเมตร ซึ่งความเข้มข้นของฟองอากาศในน้ำมีค่าเท่ากับ $1.40 \times 10^8 \pm 1.55 \times 10^7$ อนุภาค/มิลลิลิตร ขนาดของฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้เกิดจากอัตราการไหลและพลังงานสูงจากเครื่องผลิต UFB จนทำให้เกิดฟองการแตกหัก และการรวมตัวกันในเวลาเดียวกันในช่วงการไหลเวียนของน้ำทำให้เกิดฟองอากาศขนาดต่าง ๆ [51] นอกจากนี้ UFB ที่มีขนาดเล็กจะสามารถคงตัวอยู่ได้นานกว่าฟองอากาศที่ใหญ่กว่า ส่งผลให้น้ำมีระดับ DO มากขึ้น [52, 53] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณออกซิเจน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในน้ำที่มีการเติม UFB

4.2.3 การวิเคราะห์ศักย์ซีตาของสารแขวนลอยนาโนลูโคซีน และ UFB

ศักย์ซีตาของนาโนลูโคซีนที่ถูกแขวนลอยในน้ำและสารละลายเมทิลีนบลูดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่านาโนลูโคซีนเมื่ออยู่ในน้ำมีค่าศักย์ซีตาเท่ากับ -36.34 mV ซึ่งค่าศักย์ซีตาเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงความเสถียรของอนุภาคในสารแขวนลอยได้ ค่าศักย์ของสารแขวนลอยที่มีค่าต่ำกว่า -30 mV หรือมากกว่า 30 mV บ่งบอกถึงความเสถียรที่สูง [54] ซึ่งแสดงให้เห็นว่านาโนลูโคซีนมีความเสถียรเมื่อถูกกระจายตัวในน้ำ และยังแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของนาโนลูโคซีนเป็นประจุลบ และเมื่อมีการเติม UFB เข้าไปในนาโนลูโคซีนที่แขวนลอยในน้ำพบว่าส่งผลทำให้มีความเสถียรภาพในน้ำของนาโนลูโคซีนลดลง แต่เมื่อมีการเติม UFB ในนาโนลูโคซีนที่แขวนลอยในสารละลายเมทิลีนบลูพบว่าส่งผลให้มีความเสถียรเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ศักย์ซีตาของสารแขวนลอยนาโน 1 กรัม/ลิตร ในน้ำ DI และสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 25 กรัม/ลิตร

4.3 ผลการวิเคราะห์การกำจัดสีย้อมเมทิลินบลู ณ สภาวะต่าง ๆ

4.3.1 ผลกระทบของปริมาณนาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของนาโนลูโคซีนที่ได้จากการสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.10 เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณนาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมช่วงแรกของการทดสอบในที่มีดเป็นเวลา 60 นาที เป็นการประเมินประสิทธิภาพการดูดซับของนาโนลูโคซีน พบว่าปริมาณของนาโนลูโคซีนในกระบวนการ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 45.45 69.85 84.73 และ 93.40 ภายหลังการฉายแสง UV เป็นการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พบว่านาโนลูโคซีนที่ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 58.87 77.44 87.13 และ 94.46 ซึ่งแสดงให้เห็นว่านาโนลูโคซีนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่สูงเนื่องจากภายหลังการสังเคราะห์แร่ลูโคซีนให้เป็นนาโนลูโคซีนส่งผลให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงเป็นแบบท่อนาโนและแผ่นนาโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะได้ปริมาณสูง [42, 43] ทำให้นาโนลูโคซีนมีบริเวณที่ดูดซับมากขึ้น [55] นาโนลูโคซีนที่ปริมาณ 1.0 กรัม/ลิตร เหมาะสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมที่สภาวะอื่น ๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่ไม่ต่ำหรือมากเกินไปทำให้เหมาะแก่การเปรียบเทียบที่สภาวะอื่น ๆ นอกจากนี้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1.0 กรัม/ลิตร ยังได้รับการยืนยันว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโฟโตแคตะไลติก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณน้อยเกินไปอาจทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอสำหรับการดูดซับสีย้อมทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมลดลง แต่หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้แสงส่องถึง TiO_2 น้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมลดลง

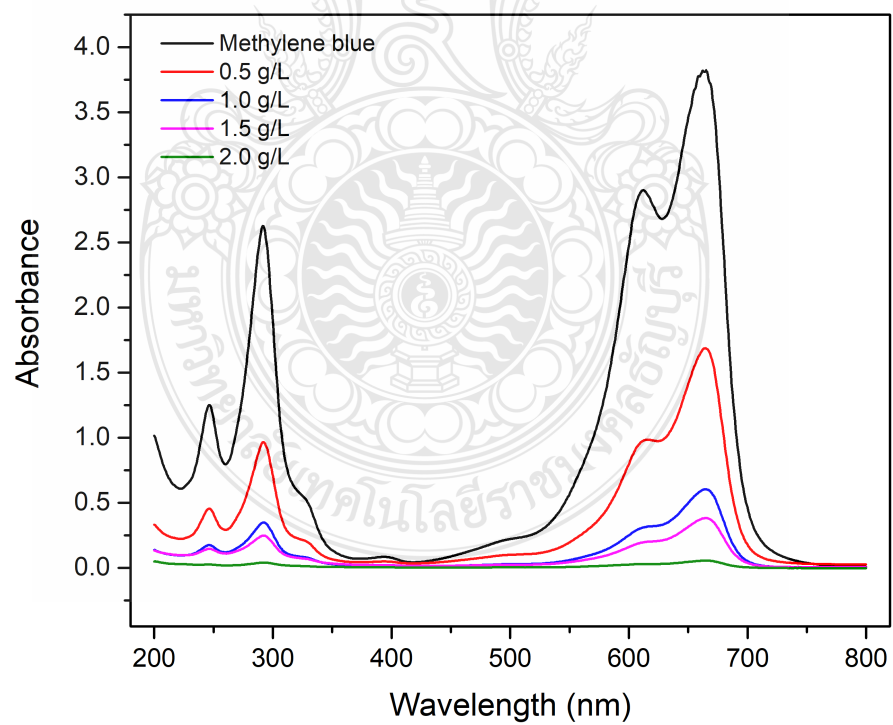
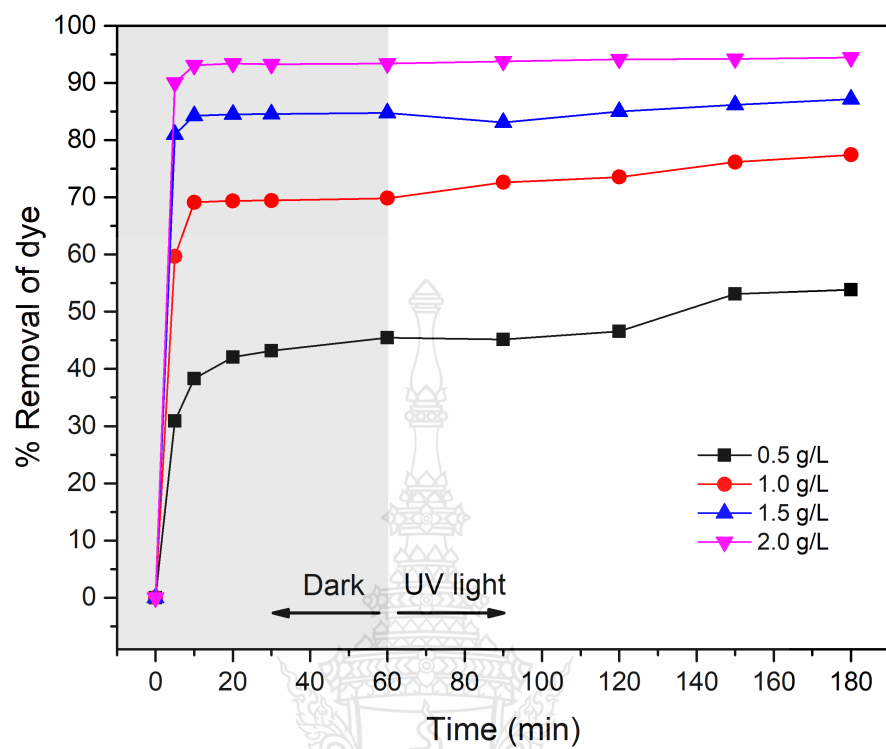
4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิการเผานาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูของนาโนลูโคซีนที่ได้จากการสังเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.11 เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผานาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม พบว่า นาโนลูโคซีนที่ผ่านการเผา 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 60.78 23.69 19.87 และ 4.52 ในสภาวะการทดสอบในที่มีด ภายหลังการฉายแสง UV นาโนลูโคซีนที่ผ่านการเผา 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมร้อยละ 63.54 26.80 22.84 และ 5.64 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาส่งผลให้นาโนลูโคซีนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเผาส่งผลให้พื้นที่ผิวที่ลดลงจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากท่อนาโนและแผ่นนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีส่วนช่วยทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกดีขึ้น [56] ให้เป็นแท่งนาโนและอนุภาคระดับไมโคร นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนไปจากการเผาที่มีการลดลงของโครงสร้างเฟสอานาเทสส่งผลทำให้

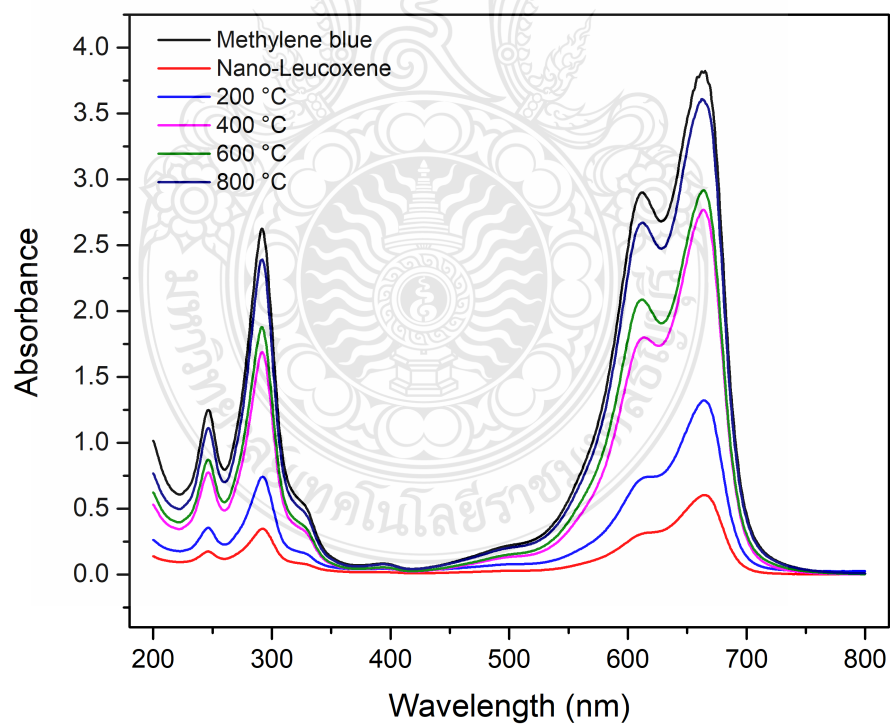
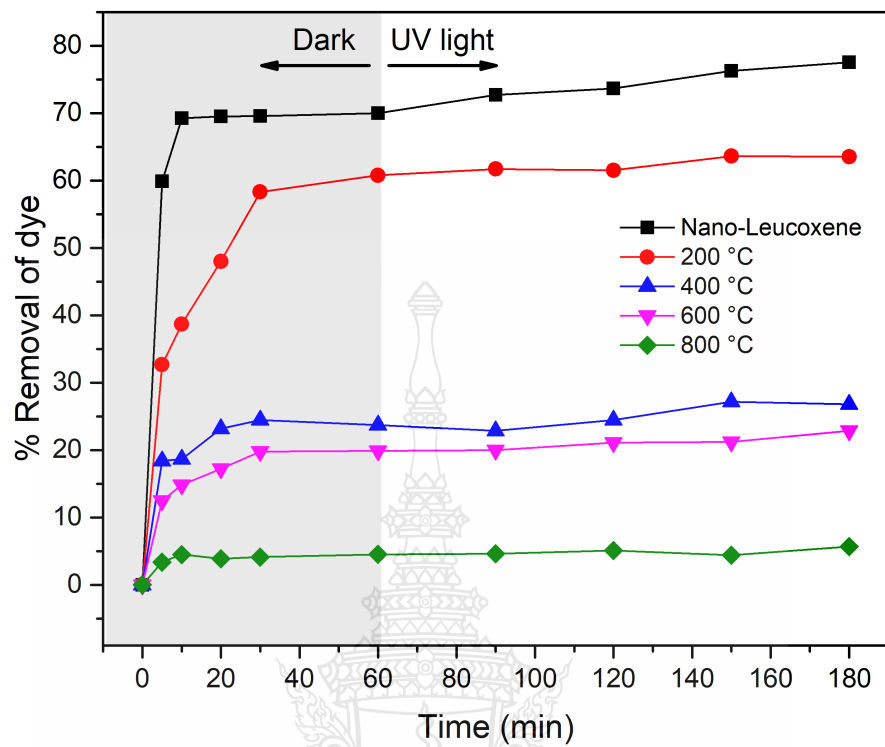
ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลง [57] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างผลึกที่พบการลดลงของเฟสอนาเทสเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

4.3.3 ผลกระทบของการเติม UFB ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

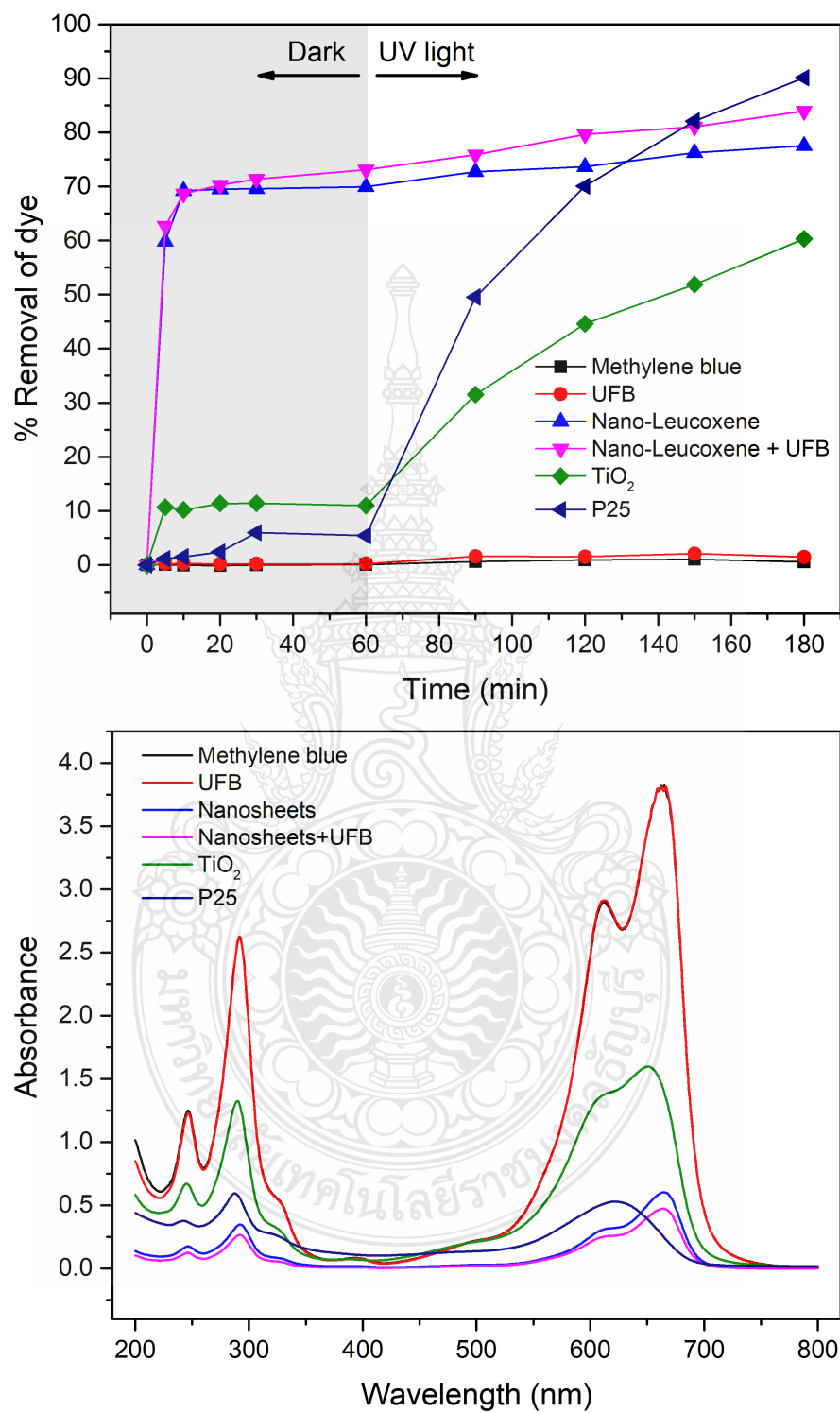
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของนาโนลูโคซินที่ได้จากการสังเคราะห์เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน TiO_2 และ P25 แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าช่วงแรกของการทดสอบในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที นาโนลูโคซินสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 69.96 ซึ่งมากกว่าสารเปรียบเทียบ P25 และ TiO_2 ที่สามารถดูดซับสีย้อมได้ร้อยละ 10.94 และ 4.83 ตามลำดับ ผลกระทบดังกล่าวเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงของนาโนลูโคซินทำให้มีบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของประจุของสีย้อมและประจุบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ [58] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบศักย์ซีตาที่แสดงให้เห็นว่าประจุของเมทิลีนบลูเป็นบวกซึ่งตรงข้ามกับประจุของนาโนลูโคซินทำให้โมเลกุลของเมทิลีนบลูสามารถดูดติดที่ผิวของนาโนลูโคซินได้มาก และการเติม UFB ส่งผลให้นาโนลูโคซินสามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจาก UFB สามารถทำให้อนุภาคของนาโนลูโคซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและการกระจายตัวที่ดียิ่งขึ้น [11] ภายหลังจากฉายแสง UV พบว่านาโนลูโคซินสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 77.52 แต่เมื่อมีการเติม UFB สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของนาโนลูโคซินเป็นร้อยละ 82.93 ซึ่งสูงกว่า TiO_2 แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่า P25 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่เพิ่มขึ้นจากการเติม UFB เป็นผลมาจากออกซิเจนบนพื้นผิวของนาโนลูโคซินมีหน้าที่ในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อสร้าง $\cdot\text{O}_2^-$ ซึ่งสามารถดักจับอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นด้วยการกระตุ้นโดยแสงและลดการรวมตัวใหม่ของหลุมอิเล็กตรอน [47] UFB ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยการสร้าง $\cdot\text{O}_2^-$ ผ่านปฏิกิริยารีดักชันระหว่างอิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันและออกซิเจน จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่อย่างต่อเนื่องและเกิดผลิตภัณฑ์คือ $\cdot\text{O}_2^-$, $\cdot\text{OH}$ และ H_2O_2 [13] ที่มีสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ซึ่งระดับ DO ที่เพิ่มขึ้นจากการเติม UFB เอื้อต่อการสร้างและความสมบูรณ์ของ $\cdot\text{O}_2^-$, $\cdot\text{OH}$ และ H_2O_2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อตัวของอนุมูลอิสระที่เกิดปฏิกิริยานี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มระดับ DO ในกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง [59, 60]



รูปที่ 4.10 ผลกระทบของปริมาณนาโนลูโคซีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

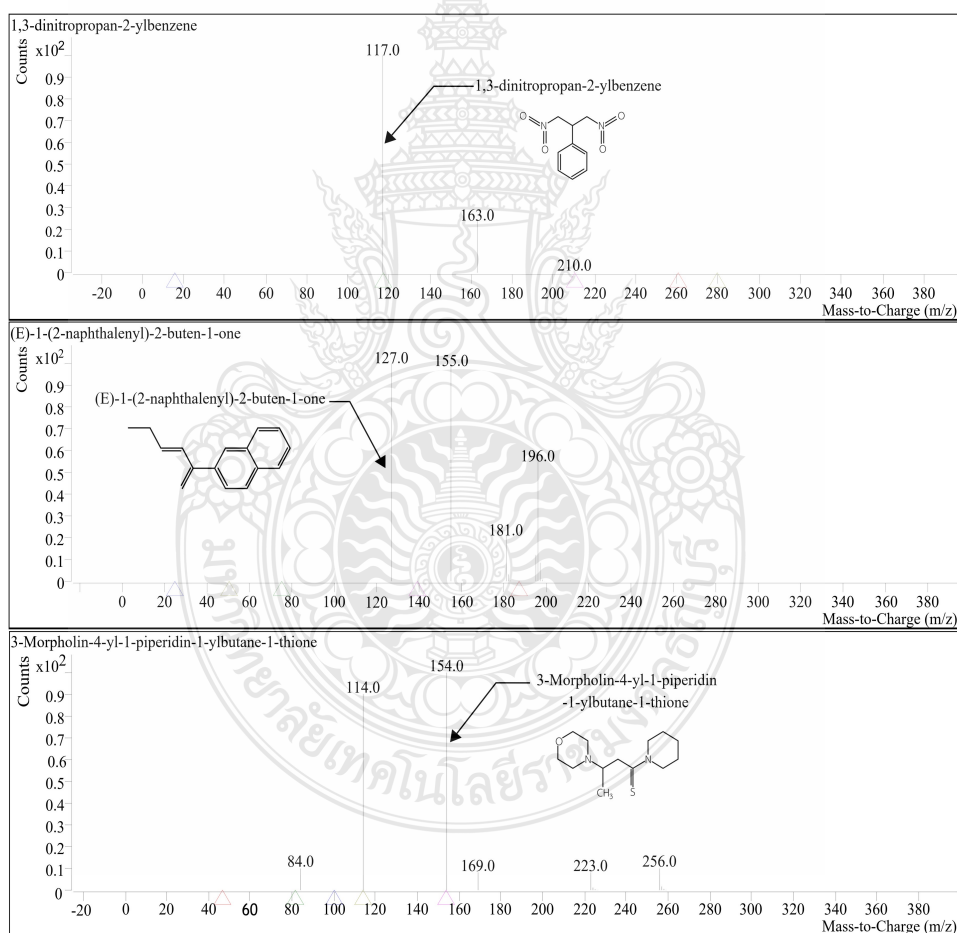


รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิการเผา Nano-Leucoxene ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

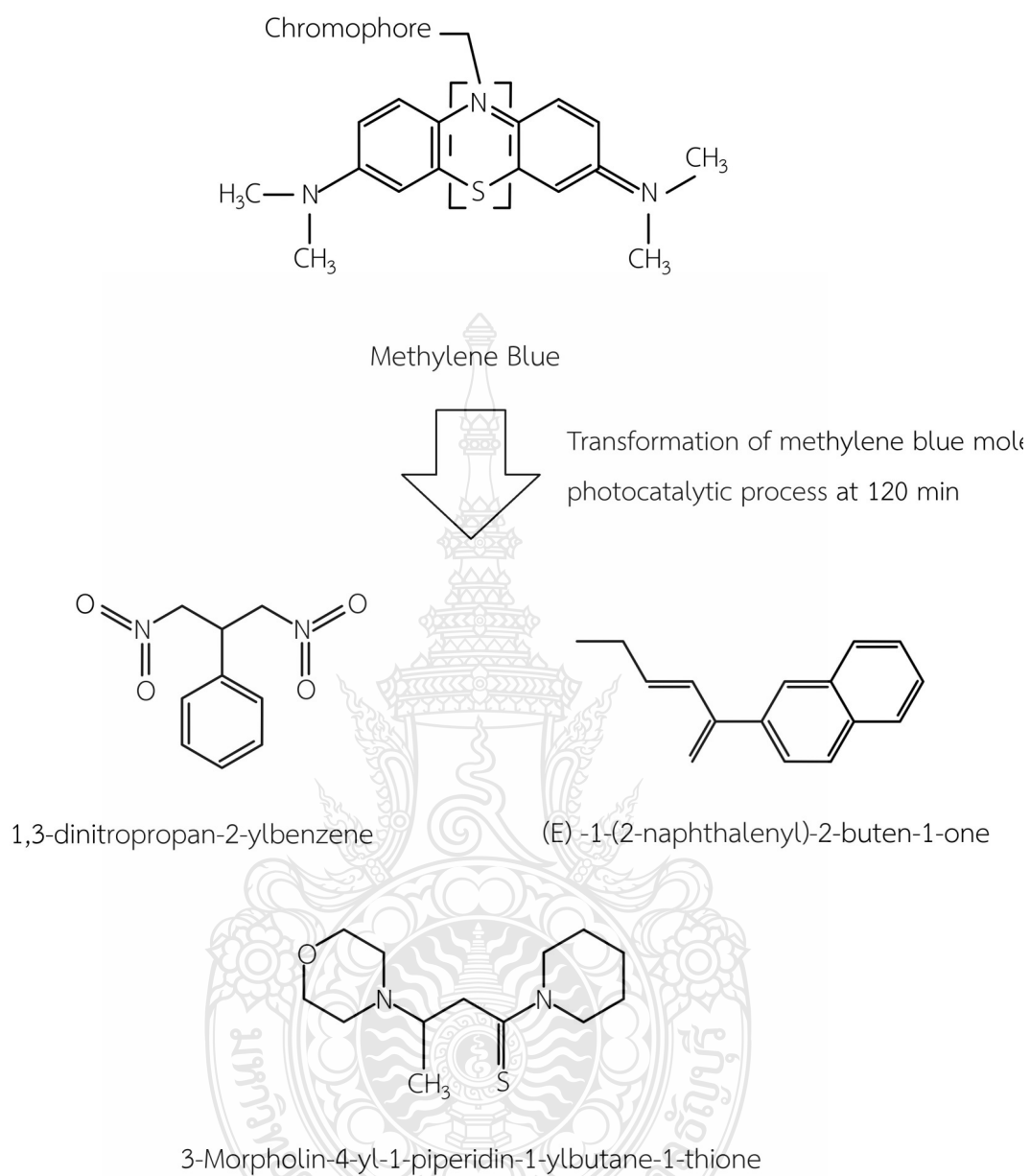


รูปที่ 4.12 ผลกระทบของการเติม UFB ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

โดยทั่วไปกระบวนการโฟโตแคตะไลติกสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้มีสถานะออกซิเดชันที่เสถียรที่สุดและกลายเป็น CO₂ และ H₂O ในการวิจัยนี้ แม้ว่าปฏิกิริยาจะไม่สมบูรณ์ แต่การเปลี่ยนสีย้อมให้เป็นผลพลอยได้ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายขึ้น บ่งชี้ว่า •O₂⁻, •OH และ H₂O₂ ภายใต้สภาวะ DO สูง ทำให้เกิดกลไกการแตกแยกของวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างสีย้อม และทำลายโครโมฟอร์ ส่งผลให้สีซีดจาง อย่างรวดเร็วและความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยาลดลง [61, 62] รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงโครงสร้างที่ซับซ้อนและโครโมฟอร์ของเมทิลีนบลู และโครงสร้างที่มีความเป็นไปได้จากการเปลี่ยนแปลงภายหลังการย่อยสลายด้วยแสงของนาโนลูโคซินร่วมกับการเติม UFB รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของเมทิลีนบลูจาก GC-MS แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ซับซ้อนและโครโมฟอร์ของเมทิลีนบลูถูกสลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนของโมเลกุลและขนาดโมเลกุลลดลง



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างและแยกสารผสมที่สามารถระเหยได้หรือกลายเป็นไอได้ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีของสารละลายเมทิลีนบลูภายหลังกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของนาโนลูโคซินร่วมกับการเติม UFB



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลูในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของนาโนลูโคซีนร่วมกับการเติม UFB

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 วัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีน

วัสดุนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์แร่ลูโคซีนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล พบว่า วัสดุนาโนที่ได้มีปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 90.88 เป็น 91.24 วัสดุนาโนที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ อนาเทส และไททาเนต โดยที่วัสดุนาโนมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นกลุ่มก้อนของแผ่นนาโนและท่อนาโน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 88.194 ตารางเมตร/กรัม เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 200–800 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสมีการหายไปของโครงสร้างผลึกแบบไททาเนต และโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส วัสดุนาโนเหลือเพียงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ลักษณะสัณฐานวิทยาเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงนาโนลูโคซีนมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะจากท่อนาโนและแผ่นนาโนเหลือเพียงท่อนาโนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส วัสดุนาโนมีลักษณะเป็นแท่งนาโนและที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แท่งนาโนเกิดการหดตัวและเกาะกลุ่มกันกลายเป็นอนุภาคลักษณะคล้ายทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ไมครอน

5.1.2 ฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

ฟองอากาศขนาดเล็กที่ถูกเติมในน้ำ DI ส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเพิ่มขึ้นจาก 7.12 เป็น 32.47 มิลลิกรัม/ลิตร โดยที่ขนาดของฟองอากาศที่กระจายตัวในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 140.0 ± 4.8 นาโนเมตร ซึ่งมีความเข้มข้นของฟองอากาศที่อยู่ในน้ำเท่ากับ $1.40 \times 10^8 \pm 1.55 \times 10^7$ อนุภาค/มิลลิลิตร ขนาดของฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้เกิดจากอัตราการใช้พลังงานสูงจากเครื่องผลิต UFB จนทำให้เกิดฟอง การแตกหัก และการรวมตัวกันในเวลาเดียวกันในช่วงการไหลเวียนของน้ำทำให้เกิดฟองอากาศขนาดต่าง ๆ นอกจากนี้ UFB สามารถเพิ่มความเสถียรภาพของนาโนลูโคซีนที่ถูกแขวนลอยในสารละลายเมทิลีนบลูให้มีความเสถียรมากขึ้นได้

5.1.3 การกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของนาโนลูโคซีนด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พบว่าปริมาณของนาโนลูโคซีนในกระบวนการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณนาโนลูโคซีนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเผานาโนลูโคซีนที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้นาโนลูโคซีนมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง

ตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น เนื่องจากการเผาานาโนลูโคซีนส่งผลให้นาโนลูโคซีนเปลี่ยนแปลงลักษณะ
สัณฐานวิทยาทำให้มีพื้นที่ผิวลดลง และนาโนลูโคซีนเมื่อเปลี่ยนเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมกับ
สารมาตรฐาน TiO_2 และ P25 พบว่านาโนลูโคซีนมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงกว่า TiO_2 แต่ต่ำกว่า
P25 เมื่อมีการเติม UFB สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของนาโนลูโคซีนได้แต่ยังคงมี
ประสิทธิภาพต่ำกว่าสารเปรียบเทียบกับ P25 ผลกระทบที่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่ม
สูงขึ้นจากการเติม UFB เกิดจากการที่ UFB นั้นเอื้อต่อการสร้างและความสมบูรณ์ของ $\cdot\text{O}_2^-$, $\cdot\text{OH}$ และ
 H_2O_2 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญที่มีสมบัติในการย่อยสลายโมเลกุลของสีย้อม กระบวนการโฟโตแคตะไลติ
กของนาโนลูโคซีนร่วมกับ UFB แม้ไม่สามารถย่อยสลายโมเลกุลสีย้อมให้เห็น H_2O และ CO_2 แต่
สามารถทำลายโครงสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนของสีย้อมให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนของ
โมเลกุลและขนาดโมเลกุลลดลง ส่งผลให้สีซีดจางอย่างรวดเร็วและความเป็นพิษของผลิตภัณฑ์ที่ทำ
ปฏิกิริยาลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์
วัสดุซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติของวัสดุได้ เป็นกระบวนการ
ที่จะช่วยทำให้ลดระยะเวลา สารเคมี หรือ อุณหภูมิ ของการสังเคราะห์จากกระบวนการ
ไฮโดรไลซิสได้ เช่น การนำไปสังเคราะห์นาโนเซลล์ลูโลส การเลือกขนาดของสารตั้งต้นใน
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นสิ่งสำคัญที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของ
ผลิตภัณฑ์ การใช้อุณหภูมิขนาดเล็กมักจะทำให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในหลายด้าน เช่น อัตราการ
เกิดปฏิกิริยา ความสม่ำเสมอของผลึก และความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่การใช้
อุณหภูมิขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดปัญหาในด้านเหล่านี้ ดังนั้น ควรพิจารณาขนาดของสารตั้ง
ต้นอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

5.2.2 ทดลองใช้สีย้อมประเภทอื่นหรือใช้สีย้อมที่มีการใช้จริงในอุตสาหกรรมใน
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

5.2.3 ทดลองใช้ก๊าซที่แตกต่างกันในการสร้าง UFB

5.2.4 ทดลองใช้ UFB ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ในการกำจัดสีย้อม

5.2.5 ควรมีการวัดและวิเคราะห์ค่า COD (Chemical Oxygen Demand) และ
TOC (Total Organic Carbon) ซึ่งเป็นค่าเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนในน้ำ ซึ่ง

จะสามารถบอกถึงความแตกต่างของกระบวนการที่เติมและไม่เติม UFB ได้เพิ่มเติมจากผลการทดสอบที่มีอยู่

5.2.6 จุดเด่นของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่เพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเติม UFB คือการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา, เพิ่มปริมาณออกซิเจน, ช่วยการในการกระจายตัว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมแก่การพัฒนาต่อไป

5.2.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของนาโนลูโคซีนพบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงมาก โดยทั่วไปกระบวนการโฟโตแคตะไลติกจะเริ่มจากการดูดซับสีของมาไว้ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนที่จะทำปฏิกิริยาร่อยสลายสีในลำดับถัดไป หากต้องการทราบให้แน่ชัดว่า ภายหลังการดูดซับของนาโนลูโคซีนเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสีขึ้นจริง จำเป็นต้องทดสอบตะกอนตัวเร่งปฏิกิริยาภายหลังกระบวนการโฟโตแคตะไลติกเพื่อให้สามารถว่ายังมีโมเลกุลของสีติดที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ ด้วยเทคนิคที่สามารถทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น FTIR



บรรณานุกรม

- [1] Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2021). Biomass-based adsorbents for removal of dyes from wastewater: a review. **Frontiers in Environmental Science**, **9**, 558.
- [2] Khattab, T. A., Abdelrahman, M. S., & Rehan, M. (2020). Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. **Environmental Science and Pollution Research**, **27**, 3803-3818.
- [3] Ashtekar, V., Bhandari, V., Shirsath, S., Sai Chandra, P., Jolhe, P., & Ghodke, S. (2014). DYE WASTEWATER TREATMENT: REMOVAL OF REACTIVE DYES USING INORGANIC AND ORGANIC COAGULANTS. **Journal of Industrial Pollution Control**, **30**(1).
- [4] Modroga, C., Miron, A. R., Orbulat, O. D., Costache, C., & Apostol, G. (2015). Ion exchange processes on weak acid resins for wastewater containing copper ions treatment. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, **14**(2).
- [5] Foo, K., & Hameed, B. H. (2010). An overview of dye removal via activated carbon adsorption process. **Desalination and Water Treatment**, **19**(1-3), 255-274.
- [6] Rashidi, H. R., Sulaiman, N. M. N., Hashim, N. A., Hassan, C. R. C., & Ramli, M. R. (2015). Synthetic reactive dye wastewater treatment by using nano-membrane filtration. **Desalination and Water Treatment**, **55**(1), 86-95.
- [7] Paz, A., Carballo, J., Pérez, M. J., & Domínguez, J. M. (2017). Biological treatment of model dyes and textile wastewaters. **Chemosphere**, **181**, 168-177.
- [8] Lee, S.-Y., & Park, S.-J. (2013). TiO₂ photocatalyst for water treatment applications. **Journal of industrial and engineering chemistry**, **19**(6), 1761-1769.
- [9] Devi, L. G., & Kavitha, R. (2013). A review on non metal ion doped titania for the photocatalytic degradation of organic pollutants under UV/solar light: Role of photogenerated charge carrier dynamics in enhancing the activity. **Applied Catalysis B: Environmental**, **140**, 559-587.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chemical reviews**, **95**(1), 69-96.
- [11] Wu, J., Zhang, K., Cen, C., Wu, X., Mao, R., & Zheng, Y. (2021). Role of bulk nanobubbles in removing organic pollutants in wastewater treatment. **Amb Express**, **11**, 1-13.
- [12] Lin, Z., Dong, C., Mu, W., & Han, X. (2023). Degradation of Rhodamine B in the photocatalytic reactor containing TiO₂ nanotube arrays coupled with nanobubbles. **Advanced Sensor and Energy Materials**, **2**(2), 100054.
- [13] Rojviroon, O., & Rojviroon, T. (2022). Photocatalytic process augmented with micro/nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater. **Water Resources and Industry**, **27**, 100169.
- [14] Yu, W., Chen, J., Ateia, M., Cates, E. L., & Johnson, M. S. (2021). Do gas nanobubbles enhance aqueous photocatalysis? Experiment and analysis of mechanism. **Catalysts**, **11**(4), 511.
- [15] Azevedo, A., Etchepare, R., Calgaroto, S., & Rubio, J. (2016). Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. **Minerals Engineering**, **94**, 29-37.
- [16] Azevedo, A., Oliveira, H., & Rubio, J. (2019). Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating research and applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, **271**, 101992.
- [17] Takahashi, M., Chiba, K., & Li, P. (2007). Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus. **The Journal of Physical Chemistry B**, **111**(6), 1343-1347.
- [18] Guo, Q., Zhou, C., Ma, Z., Ren, Z., Fan, H., & Yang, X. (2016). Fundamental Processes in Surface Photocatalysis on TiO₂. **Heterogeneous Photocatalysis: From Fundamentals to Green Applications**, 361-416.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Zhang, H., & Banfield, J. F. (2000). Understanding polymorphic phase transformation behavior during growth of nanocrystalline aggregates: insights from TiO_2 . **The Journal of Physical Chemistry B**, **104**(15), 3481-3487.
- [20] Siamchemi. (13 September 2022). ไททาเนียมไดออกไซด์/ TiO_2 และประโยชน์ไททาเนียมไดออกไซด์. Retrieved from <https://www.siamchemi.com/ไททาเนียมไดออกไซด์/>
- [21] Byrappa, K., & Adschiri, T. (2007). Hydrothermal technology for nanotechnology. **Progress in crystal growth and characterization of materials**, **53**(2), 117-166.
- [22] Cheng, H., Ma, J., Zhao, Z., & Qi, L. (1995). Hydrothermal preparation of uniform nanosize rutile and anatase particles. **Chemistry of Materials**, **7**(4), 663-671.
- [23] Akpan, U. G., & Hameed, B. H. (2009). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO_2 -based photocatalysts: a review. **Journal of hazardous materials**, **170**(2-3), 520-529.
- [24] Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: a review of fundamentals, progress and problems. **Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry reviews**, **9**(1), 1-12.
- [25] Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., . . . Shah, L. A. (2022). Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation. **Water**, **14**(2), 242.
- [26] Bouras, H. D., Isik, Z., Arikan, E. B., Yeddou, A. R., Bouras, N., Chergui, A., . . . Dizge, N. (2021). Biosorption characteristics of methylene blue dye by two fungal biomasses. **International Journal of Environmental Studies**, **78**(3), 365-381.
- [27] Khan, I., Khan, I., Usman, M., Imran, M., & Saeed, K. (2020). Nanoclay-mediated photocatalytic activity enhancement of copper oxide nanoparticles for enhanced methyl orange photodegradation. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, **31**, 8971-8985.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] Hou, C., Hu, B., & Zhu, J. (2018). Photocatalytic degradation of methylene blue over TiO₂ pretreated with varying concentrations of NaOH. *Catalysts*, 8(12), 575.
- [29] Paar, A. (13 September 2022). **X-ray diffraction (XRD)**. Retrieved from <https://wiki.anton-paar.com/za-en/x-ray-diffraction-xrd/>
- [30] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (13 September 2022). การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. Retrieved from <https://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>
- [31] FISCHER, H. (13 September 2022). **X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) – Basics**. Retrieved from <https://xrf-spectroscopy.com>
- [32] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. (13 September 2022). เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน. Retrieved from <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [33] Tang, C., & Yang, Z. (2017). **Transmission electron microscopy (TEM)**. In Membrane characterization (pp. 145-159): Elsevier.
- [34] Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). **Scanning electron microscopy (SEM): A review**. Paper presented at the Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania.
- [35] Lowell, S., Shields, J. E., Thomas, M. A., & Thommes, M. (2006). **Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density** (Vol. 16): Springer Science & Business Media.
- [36] Naderi, M. (2015). **Surface area: brunauer–emmett–teller (BET)**. In Progress in filtration and separation (pp. 585-608): Elsevier.
- [37] Barron, P.M.V.R.A.R. *BET Surface Area Analysis of Nanoparticles*. Available from: <https://chem.libretexts.org/@go/page/55840>.
- [38] chemistry, M. (13 September 2022). **UV-Visible Spectroscopy**. Retrieved from <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/uv-vis/uvspec.htm>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] Workman Jr, J. (2000). **The handbook of organic compounds, three-volume set: Nir, ir, r, and uv-vis spectra featuring polymers and surfactants:** Elsevier.
- [40] Pavasupree, S., Ngamsinlapasathian, S., Suzuki, Y., & Yoshikawa, S. (2007). Preparation and characterization of high surface area nanosheet titania with mesoporous structure. **Materials letters**, **61**(14-15), 2973-2977.
- [41] Simpraditpan, A., Wirunmongkol, T., Pavasupree, S., & Pecharapa, W. (2013). Effect of calcination temperature on structural and photocatalyst properties of nanofibers prepared from low-cost natural ilmenite mineral by simple hydrothermal method. **Materials Research Bulletin**, **48**(9), 3211-3217.
- [42] Aphairaj, D., Wirunmongkol, T., Niyomwas, S., Pavasupree, S., & Limsuwan, P. (2014). Synthesis of anatase TiO₂ nanotubes derived from a natural leucoxene mineral by the hydrothermal method. **Ceramics International**, **40**(7), 9241-9247.
- [43] Charerntanom, W., Pecharapa, W., Pavasupree, S., & Pavasupree, S. (2017). Effect of calcination temperature on structure and photocatalytic activity under UV and visible light of nanosheets from low-cost magnetic leucoxene mineral. **Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications**, **25**, 38-45.
- [44] Charerntanom, W., Simpraditpan, A., O-Charoen, N., Srisawat, N., Pecharapa, W., Pavasupree, S., & Pavasupree, S. (2016). **Hydrothermal Preparation and MB Photocatalytic Activity under UV light of Nanosheet from Natural Magnetic Leucoxene Mineral**. Paper presented at the Proceeding, Science and Technology of Emerging Materials (STEMa 2016), Pattaya, Thailand.
- [45] Rattanak, J., Mekprasart, W., Pecharapa, W., & Techitdheera, W. (2013). Photocatalytic activities under UV light of ball-milled TiO₂ photocatalysts. **Advanced Materials Research**, **802**, 237-241.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [46] Harun, N., SHENG, C., SABRI, M., DAGANG, A., & SALLEH, H. (2020). Impact of TiO_2 and H_2O_2 on photocatalytic degradation of phodamine B under ultraviolet c (uv-c) radiation for efficient polluted wastewater treatment. **Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials Vol, 12(1)**, 9-15.
- [47] Fan, W., Li, Y., Wang, C., Duan, Y., Huo, Y., Januszewski, B., . . . Elimelech, M. (2021). Enhanced photocatalytic water decontamination by micro–nano bubbles: measurements and mechanisms. **Environmental Science & Technology**, **55(10)**, 7025-7033.
- [48] Olaremu, A. G. (2015). Physico-chemical characterization of Akoko mined kaolin clay. **Journal of Minerals and Materials characterization and Engineering**, **3(5)**, 353-361.
- [49] Hamdy, M. S., Saputera, W. H., Groenen, E. J., & Mul, G. (2014). A novel TiO_2 composite for photocatalytic wastewater treatment. **Journal of catalysis**, **310**, 75-83.
- [50] Xiao, W., Zhang, H., Wang, X., Wang, B., Long, T., Deng, S., & Yang, W. (2022). Interaction Mechanisms and Application of Ozone Micro/Nanobubbles and Nanoparticles: A Review and Perspective. **Nanomaterials**, **12(12)**, 1958.
- [51] Meegoda, J.N., S. Aluthgun Hewage, and J.H. Batagoda, Stability of nanobubbles. **Environmental Engineering Science**, **2018. 35(11)**: p. 1216-1227.
- [52] Bu, X., & Alheshibri, M. (2021). The effect of ultrasound on bulk and surface nanobubbles: A review of the current status. **Ultrasonics Sonochemistry**, **76**, 105629.
- [53] Tekile, A., Kim, I., & Lee, J.-Y. (2016). Extent and persistence of dissolved oxygen enhancement using nanobubbles. **Environmental Engineering Research**, **21(4)**, 427-435.
- [54] Kumar, A., & Dixit, C. K. (2017). Methods for characterization of nanoparticles. In **Advances in nanomedicine for the delivery of therapeutic nucleic acids** (pp. 43-58): Elsevier.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [55] Özer, D., Dursun, G., & Özer, A. (2007). Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. **Journal of hazardous materials**, **144**(1-2), 171-179.
- [56] Jitputti, J., Rattanaavoravipa, T., Chuangchote, S., Pavasupree, S., Suzuki, Y., & Yoshikawa, S. (2009). Low temperature hydrothermal synthesis of monodispersed flower-like titanate nanosheets. **Catalysis Communications**, **10**(4), 378-382.
- [57] Gautam, A., Kshirsagar, A., Biswas, R., Banerjee, S., & Khanna, P. K. (2016). Photodegradation of organic dyes based on anatase and rutile TiO₂ nanoparticles. **RSC advances**, **6**(4), 2746-2759.
- [58] Srimoon, R. (2016). Dyes treatment in wastewater using adsorption processes. **KKU Science Journal**, **44**(3), 419-434.
- [59] Jin, J., Wang, R., Tang, J., Yang, L., Feng, Z., Xu, C., . . . Gu, N. (2020). Dynamic tracking of bulk nanobubbles from microbubbles shrinkage to collapse. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 589, 124430.
- [60] Yasui, K., Tuziuti, T., & Kanematsu, W. (2018). Mysteries of bulk nanobubbles (ultrafine bubbles); stability and radical formation. **Ultrasonics Sonochemistry**, **48**, 259-266.
- [61] Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. **Water research**, **44**(10), 2997-3027.
- [62] Montoya Sánchez, N., & de Klerk, A. (2018). Autoxidation of aromatics. **Applied Petrochemical Research**, **8**(2), 55-78.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การเผยแพร่ผลงาน



ผลงานประชุมวิชาการระดับชาติ

Chatnarin, C., Thammasak, R., & Sorapong, P. (2024). Dye Removal Using Photocatalytic Process of Nano-Leucoxene Combined with Ultrafine Bubbles. Paper presented at the The 9th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2024 (RMTC 2024), Heritage Chiang Rai Hotel, Mueang District, Chiang Rai Province, Thailand.

ทรัพย์สินทางปัญญา

สิทธิบัตร “เครื่องสังเคราะห์วัสดุนาโน” ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ นายธนกร วิรุฬห์มงคล นายประสาน ไชยแสนฤทธิ์ และนายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงใหม่ เลขที่คำขอ 2302004280 วันที่ยื่นขอจดทะเบียน 3 ตุลาคม 2566.

สิทธิบัตร “เครื่องผลิตฟองอากาศ” ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ นายธนกร วิรุฬห์มงคล นายประสาน ไชยแสนฤทธิ์ และนายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงใหม่ เลขที่คำขอ 2302004828 วันที่ยื่นขอจดทะเบียน 3 พฤศจิกายน 2566.

สิทธิบัตร “เครื่องผลิตฟองอากาศ” ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ นายธนกร วิรุฬห์มงคล นายประสาน ไชยแสนฤทธิ์ และนายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงใหม่ เลขที่คำขอ 2402000961 วันที่ยื่นขอจดทะเบียน 29 กุมภาพันธ์ 2567.

สิทธิบัตร “เครื่องผลิตฟองอากาศ” ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ นายธนกร วิรุฬห์มงคล นายประสาน ไชยแสนฤทธิ์ และนายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงใหม่ เลขที่คำขอ 2402000962 วันที่ยื่นขอจดทะเบียน 29 กุมภาพันธ์ 2567.



Proceedings

Conference 2024

1 - 3 พฤษภาคม 2567

โรงแรมเออีทเว เชียงราย โฮเทล แอนด์ คอนเวนชั่น

การประชุมวิชาการราชมณฑล
ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ครั้งที่

9



“เทคโนโลยีการผลิตและการจัดการสู่การยั่งยืนในอุตสาหกรรม”

Production technology and management towards sustainability in the industry

The 9th Rajamangala Manufacturing
& Management Technology Conference 2024

Conference Topics

- Production and Operations Management (POM)
- Manufacturing Engineering (MFE)
- Material Science and Application (MSA)
- Supply Chain and Logistics (SCL)
- Industrial Education (IED)
- Technology and Innovation (TIN)

ดำเนินการจัดงานประชุมวิชาการโดยสมาคมเครื่องจักรกลราชมณฑลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (RNMT)
ร่วมกับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดำเนินการจัดงาน (Organizer)
โดย สมาคมเครื่องจักรกลด้านเทคโนโลยีการผลิต
และการจัดการ (RNMT)



อำนวยการจัดงาน (Hosts)
โดย



ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)
โดย



การกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกของนาโนลูโคซีนร่วมกับฟองอากาศขนาดเล็ก Dye Removal Using Photocatalytic Process of Nano-Leucoxene Combined with Ultrafine Bubbles

ฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์¹ ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์² และ สรพงษ์ ภาวสุปรีย์^{3*}

^{1,3} สาขาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: sorapong.p@en.rmutt.ac.th*

Chatnarin Chatchiangkan¹ Thammasak Rojviroon² and Sorapong Pavasupree^{3*}

^{1,3} Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University
of Technology Thanyaburi

E-mail: sorapong.p@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมที่มีการใช้สีย้อมมีการเติบโตอย่างมากจากความต้องการทางด้านสิ่งทอ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้สีย้อมเพื่อให้เกิดความสวยงามอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่มีการเจือปนของสีย้อมก่อนปล่อยสู่ระบบนิเวศ งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุนาโนจากแร่ลูโคซีนที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยการเติมฟองอากาศขนาดเล็ก นาโนลูโคซีนถูกเตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์พบว่านาโนลูโคซีนมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่มีการรวมตัวกันของท่อนาโนและอนุภาคโมไครท์ มีพื้นผิวขรุขระ ซึ่งมีองค์ประกอบโครงสร้างผลึกส่วนหนึ่งเป็นไฮโดรเจนไททาเนต ($H_2Ti_2O_7$) นาโนลูโคซีน สามารถแสดง ประสิทธิภาพที่โดดเด่นในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูผ่านกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลติกภายใต้แสง อัลตราไวโอเลต นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมื่อมีการเติมฟองอากาศขนาดเล็กในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของนาโนลูโคซีนในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีนัยสำคัญทั้งในด้านการดูดซับและโฟโตแคตะไลติก

คำสำคัญ: การกำจัดสีย้อม; แร่ลูโคซีน; กระบวนการโฟโตแคตะไลติก; ไททาเนต; ฟองอากาศขนาดเล็ก

Abstract

Industries utilizing dyes have experienced significant growth due to the demand from the textile and other related product sectors, which are essential for aesthetic purposes. These industries necessitate wastewater treatment to mitigate environmental impacts caused by dye contamination before discharge into the ecosystem. This research focuses on enhancing the efficiency of nanomaterials derived from leucoxene minerals capable of degrading dyes through the photocatalytic process by adding ultrafine bubbles. Nano-

leucoxene was prepared through the hydrothermal method at 105 °C for 24 hours. Analysis revealed that nano-leucoxene exhibited clustered formations of nanotubes and microparticles with rough surfaces. Some parts of the nanostructure comprised hydrogen titanate ($H_2Ti_3O_7$) structures. Nano-leucoxene demonstrated outstanding efficiency in removing methylene blue dye through both adsorption and photocatalytic processes under UV light. In addition, adding ultrafine bubbles made the dye removal process much more effective, increasing both adsorption and photocatalytic efficiency under ultraviolet light.

Keywords: Dye Removal; Leucoxene Mineral; Photocatalytic Process; Titanate; Ultrafine Bubbles

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสีย้อมมีการเติบโตขึ้นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการสำหรับสิ่งทอ เครื่องหนัง กระดาษ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องใช้สีเพื่อให้เกิดความสวยงาม อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของอุตสาหกรรมสีย้อมนี้ได้นำมาซึ่งความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะต่อแหล่งน้ำ การปล่อยน้ำเสียที่มีการปะปนของสีย้อมลงในแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ผ่านทางโซ่อาหาร [1, 2] จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมก่อนปล่อยออกสู่ระบบนิเวศ การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมสามารถทำได้หลากหลายวิธีเพื่อให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

เทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง คือ การบำบัดทางเคมีโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนอย่างสีย้อมในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic process) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงที่อาศัยปฏิกิริยาการย่อยสลายของเสียด้วยแสงอัลตราไวโอเลตหรือแสงที่มองเห็นได้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH\cdot$) และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($\cdot O_2^-$) ได้ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบที่ไม่เป็นอันตราย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ [3] ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน สารที่นิยมนำมาใช้ในการกระบวนการโฟโตแคตะไลติกมากที่สุดคือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปของอนุภาคนาโน TiO_2 เนื่องจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ รวมถึงโครงสร้างผลึก

อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมวัสดุนาโนมีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศในบางส่วนทำให้ในปัจจุบันเริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุนาโนจากแร่ที่มี TiO_2 เป็นองค์ประกอบ เช่น แร่โอลิเมนไนท์ และแร่ลูโคซีน ที่มีอยู่ในประเทศไทยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลซึ่งมีขั้นตอนในการผลิตที่เรียบง่าย ใช้ต้นทุนที่ไม่สูงมากในการเตรียม การเกิดปฏิกิริยาทำในระบบปิดและมีต้นทุนของวัตถุดิบตั้งต้นต่ำ ซึ่งวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถนำไปใช้ประโยชน์แทนการใช้ TiO_2 เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง [4, 5] สารเติมแต่งในสีสะท้อนความร้อน [6] และสีกันไฟ [7]

ฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ (Ultrafine Bubbles, UFB) คือฟองอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจาก UFB มีขนาดเล็กมากทำให้มีสมบัติพิเศษเฉพาะตัว ได้แก่ ความเสถียรสูง เวลาอยู่ในน้ำนาน พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพการถ่ายเทก๊าซสูง และความสามารถในการสร้างอนุมูลอิสระ [8] การประยุกต์ใช้ UFB ในการบำบัดน้ำเสียได้รับความสนใจเนื่องจากมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาดำแสงของ TiO_2 [9, 10] ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไป UFB สามารถช่วยปรับปรุงการถ่ายเทมวลของสารตั้งต้นไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถทำให้มีอัตราการย่อยสลายของเสียเพิ่มขึ้น [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเอาแร่ลูโคซีนที่มีอยู่ในประเทศไทยมาเตรียมเป็นวัสดุนาโนผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล และใช้วัสดุนาโนที่ได้สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พร้อมทั้งศึกษามลกระทบของการเติม UFB ในกระบวนการโฟโตแคตะไลติก

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุ

วัสดุนาโนถูกเตรียมขึ้นโดยใช้แร่ลูโคซีนเป็นสารตั้งต้น โดยการนำมาบดด้วยเครื่องบดมิล (Ball Mill) ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแร่ที่ผ่านการบดแล้วสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการต้มและกวนตลอดเวลาในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในสภาวะภายใต้แรงดันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาทำการปล่อยให้เย็นตัวลง ณ อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยที่ได้กรองให้เหลือเพียงตะกอนและล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และน้ำ DI ตามลำดับ จนกระทั่งสารแขวนลอยมีค่า pH เท่ากับ 7 จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งได้ออกมาเป็นนาโนลูโคซีน (NLX)

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุและ UFB

โครงสร้างผลึกและเฟสของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: X'Pert PRO MPD, PANalytical) โครงสร้างและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JSM-6510, JEOL)

ฟองอากาศขนาดเล็กถูกผลิตขึ้นในน้ำ DI และถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน (Nanosight NS300, Malvern)

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มแสง $1,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ โดยใช้สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 25 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.25 กรัม และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 30 นาที โดยเริ่มกระบวนการจากการกวนในที่มืดเป็นเวลา 60 นาที แล้วกวนต่อในสภาวะภายใต้แสงยูวีต่ออีก 120 นาที การคำนวณร้อยละการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้สมการ (1)

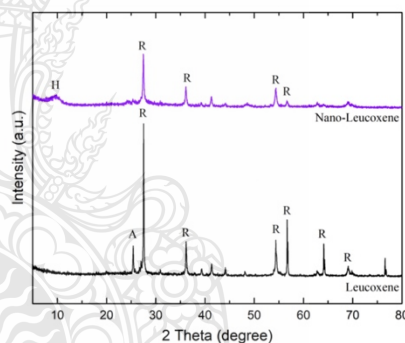
$$\% \text{Removal of dye} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม C_t คือความเข้มข้นของสีย้อม ณ ช่วงเวลาหนึ่ง

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของวัสดุ

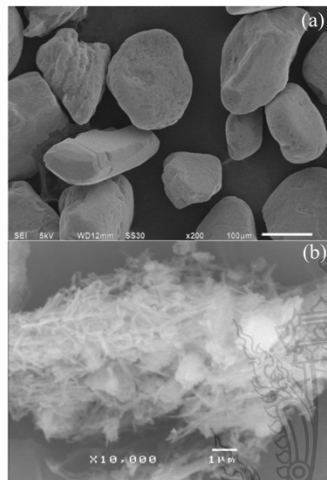
นาโนลูโคซีนที่ถูกเตรียมขึ้นมีลักษณะเป็นผงสีขาวอ่อนซึ่งแตกต่างจากแร่ลูโคซีนที่เป็นสารตั้งต้นซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากอะตอมของเหล็ก (Fe) บางส่วนถูกละลายหรือชะล้างในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ [5] โครงสร้างผลึกของแร่ลูโคซีนและนาโนลูโคซีนแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าแร่ลูโคซีนมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์และอนาเทส ในขณะที่เมื่อผ่านการสังเคราะห์เป็นนาโนลูโคซีนผลของรูไทล์และอนาเทสมีปริมาณลดลง



รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของแร่ลูโคซีนก่อนและหลังสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (A = anatase TiO_2 , R = rutile TiO_2 และ H = hydrogen titanate)

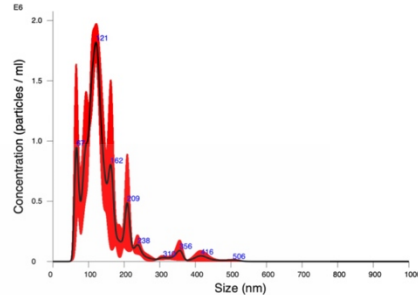
และนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างผลึกแบบไฮโดรเจนไทเทเนต (Hydrogen Titanate, $\text{H}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) เพิ่มเข้ามาซึ่งเป็นผลึกที่บ่งบอกถึงการมีอยู่ของอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งมาจากน้ำในกระบวนการเตรียมเป็นส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่เตรียมได้ [4, 5, 12-14] ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างแร่ลูโคซีน พบว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคนาโนประมาณ 100-200

ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2a และตัวอย่างนาโนโคซินที่ได้จากการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่มีการรวมตัวกันของท่อนาโน [12] และอนุภาคไมโครเมตรที่มีพื้นผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2b ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด และโครงสร้างดังกล่าวสามารถส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM (a) แร่ลูโคซิน (b) นาโนลูโคซิน

ผลการทดสอบการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำที่ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องผลิต UFB ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 140.0 ± 4.8 นาโนเมตร โดยมีการกระจายตัวของขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 50–500 นาโนเมตร ซึ่งความเข้มข้นของฟองอากาศในน้ำมีค่าเท่ากับ $1.40 \times 10^6 \pm 1.55 \times 10^7$ อนุภาค/มล. ขนาดของฟองอากาศที่มีขนาดเล็กนี้เกิดจากอัตราการไหลและพลังงานสูงจากเครื่องผลิต UFB จนทำให้เกิดฟอง การแตกหัก และการรวมตัวกันในเวลาเดียวกันในช่วงการไหลเวียนของน้ำทำให้เกิดฟองอากาศขนาดต่าง ๆ [15] นอกจากนี้ UFB ที่มีขนาดเล็กจะสามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานกว่าฟองอากาศที่ใหญ่กว่าส่งผลให้น้ำมีระดับ DO มากขึ้น [16, 17] โดยจากการทดลอง UFB สามารถเพิ่มระดับ DO สูงสุดที่ประมาณ 32 มิลลิกรัม/ลิตร



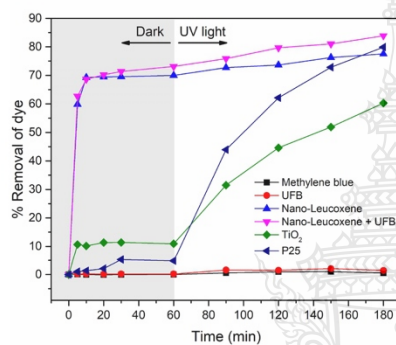
รูปที่ 3 การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำ

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูของนาโนลูโคซินที่ได้จากการสังเคราะห์แสดงรูปที่ 4 ช่วงแรกของการทดสอบในที่มีดเป็นเวลา 60 นาที เป็นการประเมินประสิทธิภาพการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่านาโนลูโคซินสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ร้อยละ 69.96 ซึ่งมากกว่าสารเปรียบเทียบ P25 และ TiO_2 ที่สามารถดูดซับสีย้อมได้ร้อยละ 10.94 และ 4.83 ตามลำดับ ผลกระทบดังกล่าวเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงของนาโนลูโคซินทำให้มีบริเวณที่เกิดการดูดซับมีมากขึ้น [18] นอกจากนี้การเติม UFB ส่งผลให้นาโนลูโคซินสามารถดูดซับสีย้อมได้มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจาก UFB สามารถทำให้อนุภาคของนาโนลูโคซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นและการกระจายตัวที่ดีขึ้น [8]

ผลการทดสอบภายหลังการฉายแสง เป็นการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติก พบว่านาโนลูโคซินสามารถกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 77.52 ซึ่งสูงกว่า TiO_2 แต่ยังมีค่าต่ำกว่า P25 แต่เมื่อมีการเติม UFB สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของนาโนลูโคซินเป็นร้อยละ 82.93 ซึ่งสูงกว่าสารเปรียบเทียบ P25 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกที่เพิ่มขึ้นจากการเติม UFB เป็นผลมาจากออกซิเจนบนพื้นผิวของนาโนลูโคซินมีหน้าที่ในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อสร้าง $\cdot\text{O}_2$ ซึ่งสามารถดักจับอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นด้วยการกระตุ้นโดยแสงและลดการรวมตัวใหม่ของหลุมอิเล็กตรอน [19] UFB ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโดยการสร้าง $\cdot\text{O}_2$ ผ่านปฏิกิริยารีดักชันระหว่างอิเล็กตรอน

จากแถบคอนดักชันและออกซิเจน จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่อย่างต่อเนื่องและเกิดผลิตภัณฑ์คือ $\bullet\text{O}_2^-$, $\bullet\text{OH}$ และ H_2O_2 [10] ที่มีสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ซึ่งระดับ DO ที่เพิ่มขึ้นจากการเติม UFB เอื้อต่อการสร้างและความสมบูรณ์ของ $\bullet\text{O}_2^-$, $\bullet\text{OH}$ และ H_2O_2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อตัวของอนุมูลอิสระที่เกิดปฏิกิริยานี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มระดับ DO ในกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง [20, 21]



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู

4. สรุป

นาโนลูโคซีนที่ได้จากการเตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงลักษณะรูปร่างเป็นกลุ่มก้อนของท่อนาโนและอนุภาคไมโครเมตรที่มีพื้นผิวขรุขระ ซึ่งมีโครงสร้างหลักแบบไฮโดรเจนไททาเนต นาโนลูโคซีนแสดงสมบัติที่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพและการเติมฟองอากาศขนาดเล็กสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของนาโนลูโคซีนให้ดียิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ วช. [หมายเลขทุน N23D650003] และเครื่องมือระดับโรงงานนำร่องได้รับการสนับสนุนโดยทุนสนับสนุนการวิจัยขั้นพื้นฐาน (RFB630004/0168) และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มงคลชัยบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับดำเนินงาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aragaw, T.A. and F.M. Bogale, Biomass-based adsorbents for removal of dyes from wastewater: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 2021. 9: p. 558.
- [2] Khatatab, T.A., M.S. Abdelrahman, and M. Rehan, Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020. 27: p. 3803-3818.
- [3] Devi, L.G. and R. Kavitha, A review on non metal ion doped titania for the photocatalytic degradation of organic pollutants under UV/solar light: Role of photogenerated charge carrier dynamics in enhancing the activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2013. 140: p. 559-587.
- [4] Charemtanom, W., et al., Effect of calcination temperature on structure and photocatalytic activity under UV and visible light of nanosheets from low-cost magnetic leucosene mineral. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2017. 25: p. 38-45.
- [5] Simpraditpan, A., et al., Effect of calcination temperature on structural and photocatalyst properties of nanofibers prepared from low-cost natural ilmenite mineral by simple hydrothermal method. *Materials Research Bulletin*, 2013. 48(9): p. 3211-3217.
- [6] Chaisaenrith, P., et al., Development and characterization of a reflection paint with nano-ilmenite material for energy-saving in buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 2024. 20: p. e02894.
- [7] Chaisaenrith, P., P. Taksakulvith, and S. Pavasupree, Effect of nano titanium dioxide in

- intumescent fireproof coating on thermal performance and char morphology. *Materials Today: Proceedings*, 2021. 47: p. 3462-3467.
- [8] Wu, J., et al., Role of bulk nanobubbles in removing organic pollutants in wastewater treatment. *Amb Express*, 2021. 11: p. 1-13.
- [9] Lin, Z., et al., Degradation of Rhodamine B in the photocatalytic reactor containing TiO₂ nanotube arrays coupled with nanobubbles. *Advanced Sensor and Energy Materials*, 2023. 2(2):
- [10] Rojviroon, O. and T. Rojviroon, Photocatalytic process augmented with micro/nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater. *Water Resources and Industry*, 2022. 27: p. 100169.
- [11] Yu, W., et al., Do gas nanobubbles enhance aqueous photocatalysis? Experiment and analysis of mechanism. *Catalysts*, 2021. 11(4):
- [12] Aphairaj, D., et al., Synthesis of anatase TiO₂ nanotubes derived from a natural leucosene mineral by the hydrothermal method. *Ceramics International*, 2014. 40(7): p. 9241-9247.
- [13] Pavasupree, S., et al., Synthesis of titanate, TiO₂ (B), and anatase TiO₂ nanofibers from natural rutile sand. *Journal of solid state chemistry*, 2005. 178(10): p. 3110-3116.
- [14] Suzuki, Y., et al., Natural rutile-derived titanate nanofibers prepared by direct hydrothermal processing. *Journal of Materials Research*, 2005. 20(4): p. 1063-1070.
- [15] Meegoda, J.N., S. Aluthgun Hewage, and J.H. Batagoda, Stability of nanobubbles. *Environmental Engineering Science*, 2018. 35(11): p. 1216-1227.
- [16] Bu, X. and M. Alheshibri, The effect of ultrasound on bulk and surface nanobubbles: A review of the current status. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021. 76: p. 105629.
- [17] Tekile, A., I. Kim, and J.-Y. Lee, Extent and persistence of dissolved oxygen enhancement using nanobubbles. *Environmental Engineering Research*, 2016. 21(4): p. 427-435.
- [18] Özer, D., G. Dursun, and A. Özer, Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. *Journal of hazardous materials*, 2007. 144(1-2): p. 171-179.
- [19] Fan, W., et al., Enhanced photocatalytic water decontamination by micro-nano bubbles: measurements and mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 2021. 55(10): p. 7025-7033.
- [20] Jin, J., et al., Dynamic tracking of bulk nanobubbles from microbubbles shrinkage to collapse. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020. 589: p. 124430.
- [21] Yasui, K., T. Tuziuti, and W. Kanematsu, Mysteries of bulk nanobubbles (ultrafine bubbles); stability and radical formation. *Ultrasonics sonochemistry*, 2018. 48: p. 259-266.



The 9th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2024

สมาคมเครือข่ายรายชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ร่วมกับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ตราฉันทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์, ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์ และ สรพงษ์ ภาวสุปรีย์
ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความเรื่อง
การกำจัดสีย้อมด้วยการระบวการไฟโตะและไลคกของนาโนสัคซินร่วมกับฟองอากาศขนาดเล้ก

การประชุมวิชาการราชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTTC 2024 ครั้งที่ 9

ระหว่างวันที่ 1 – 3 พฤษภาคม 2567

ณ โรงแรมเฮอริเทจ เชียงราย ไฮเทค แอนด์ คอนเวนชัน อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย


(ดร. ณัฐารพล รัชสิริวัชรบุล)

อธิการบดี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชวมงคลพระนคร

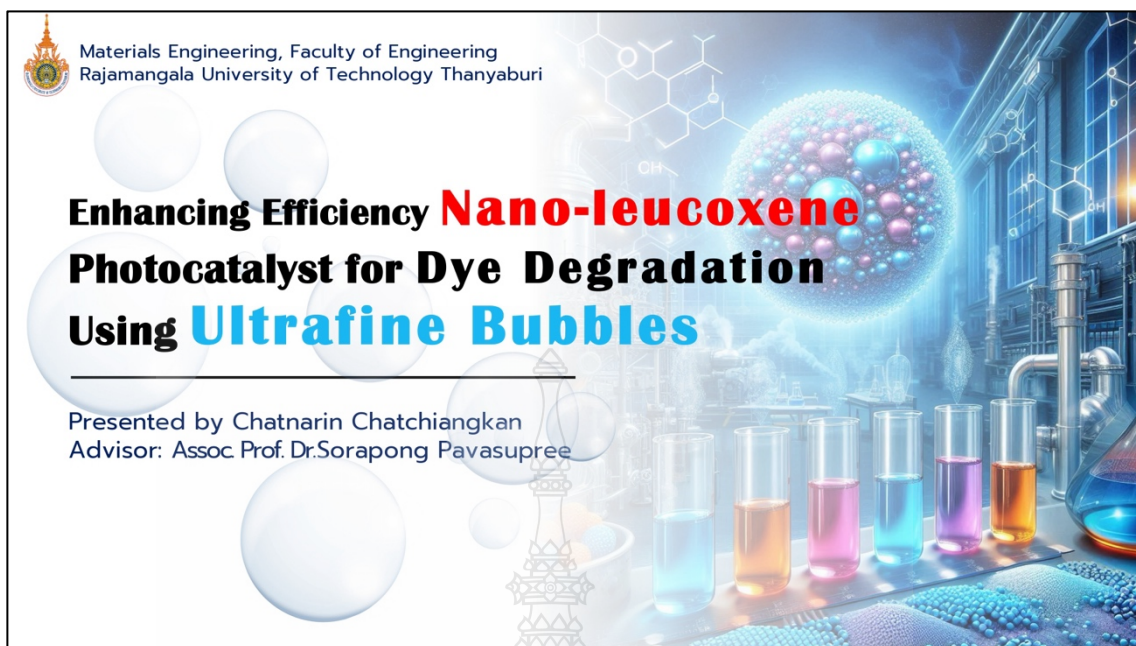


(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันท์ มีมบต์)
นายกสมาคมเครือข่ายรายชวมงคล
ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

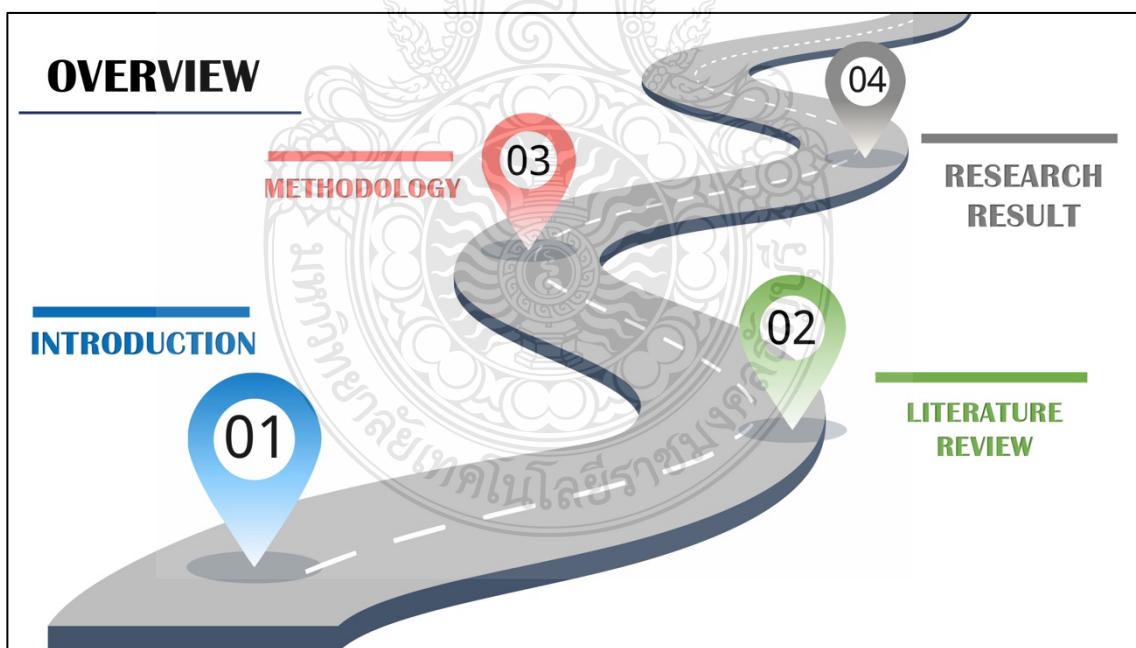
ภาคผนวก ข

การนำเสนอวิทยานิพนธ์





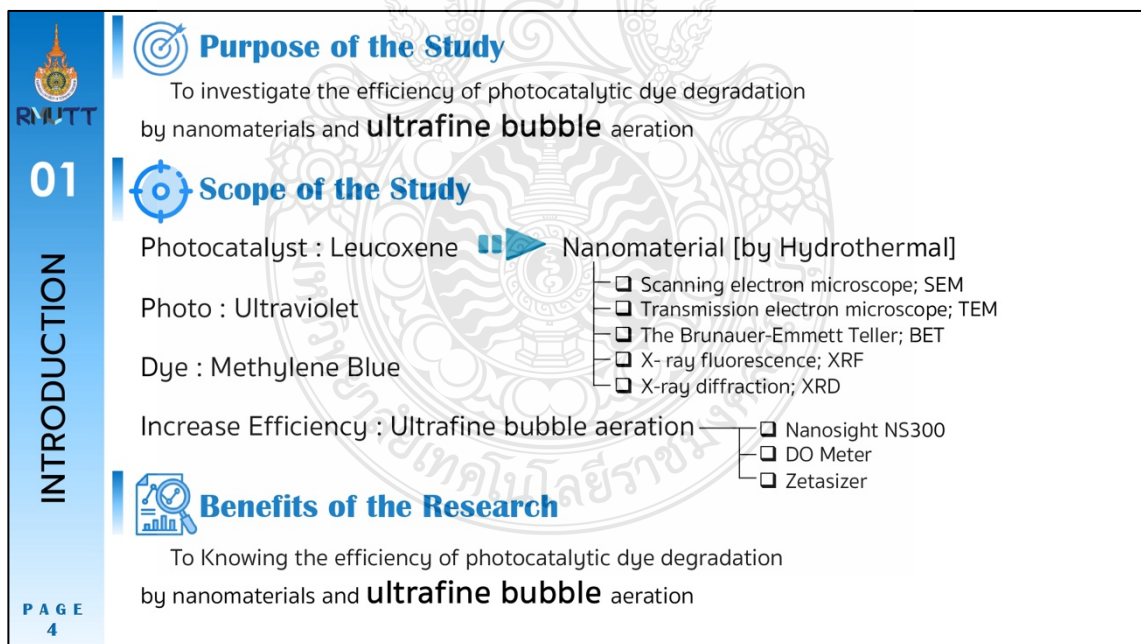
รูปที่ ข.1 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 1



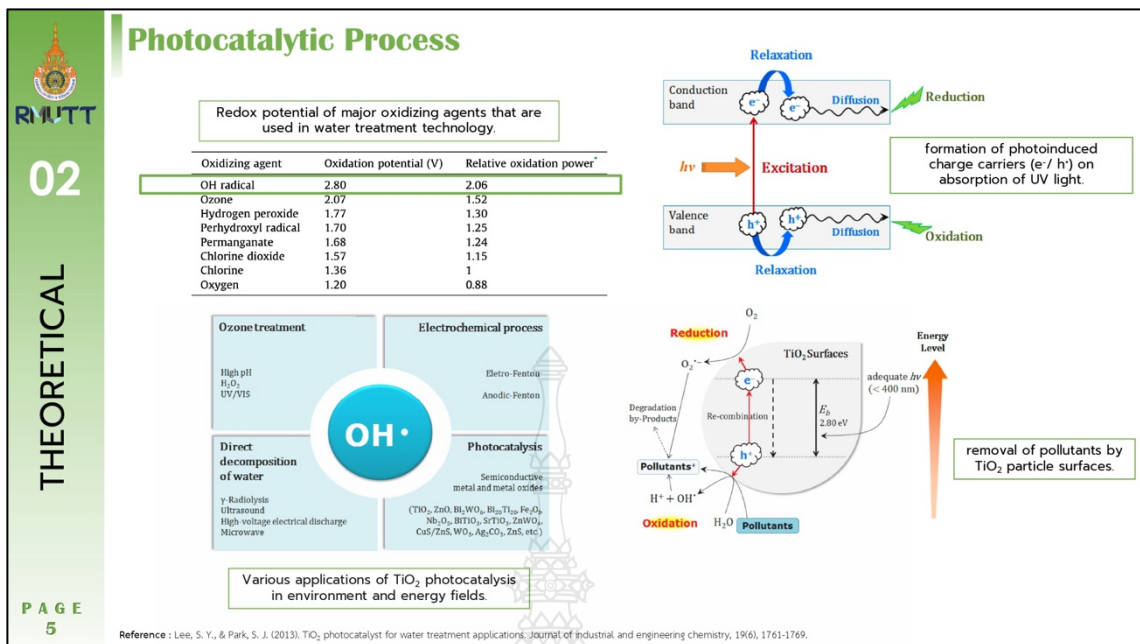
รูปที่ ข.2 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 2



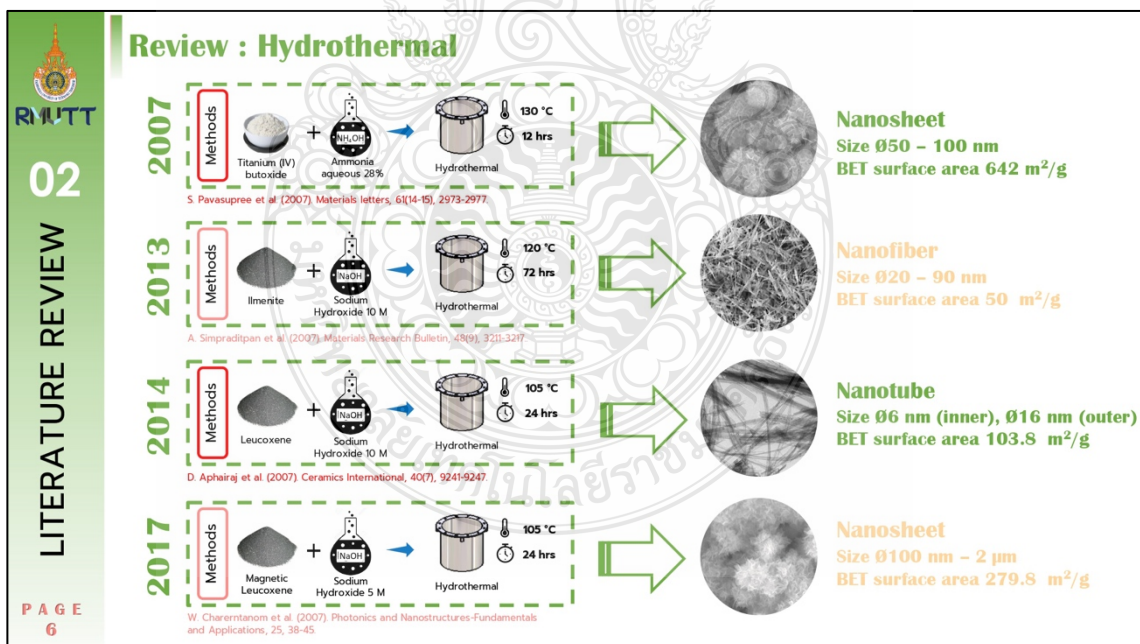
รูปที่ ข.3 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 3



รูปที่ ข.4 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 4



รูปที่ ข.4การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 4



รูปที่ ข.5 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 5

02

LITERATURE REVIEW

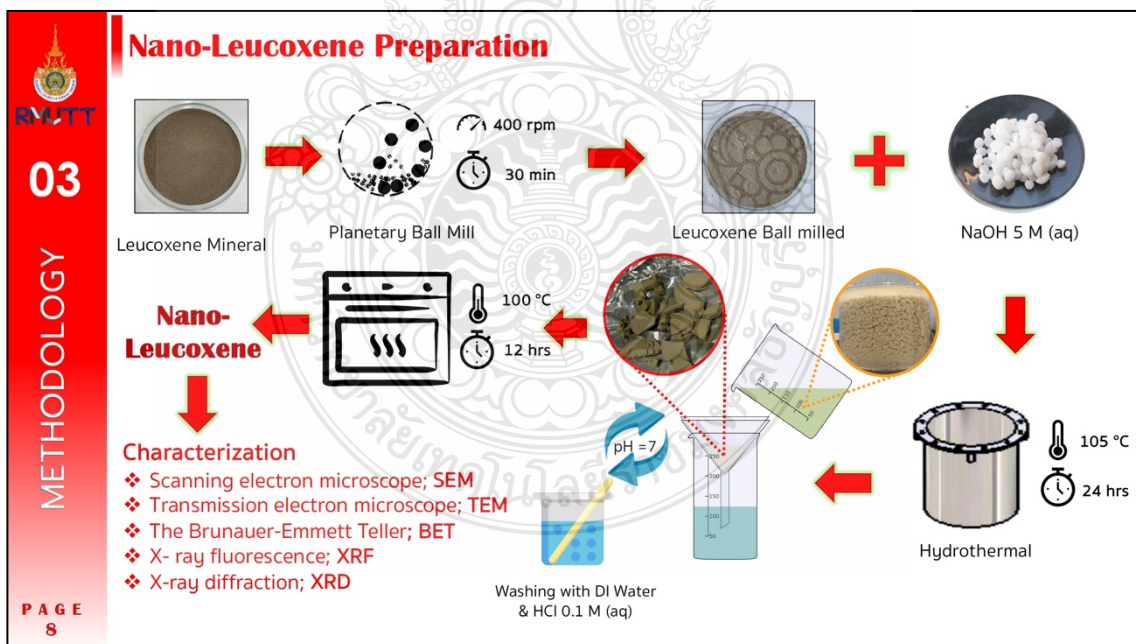
PAGE 7

Review : Photocatalytic Degradation of Dye

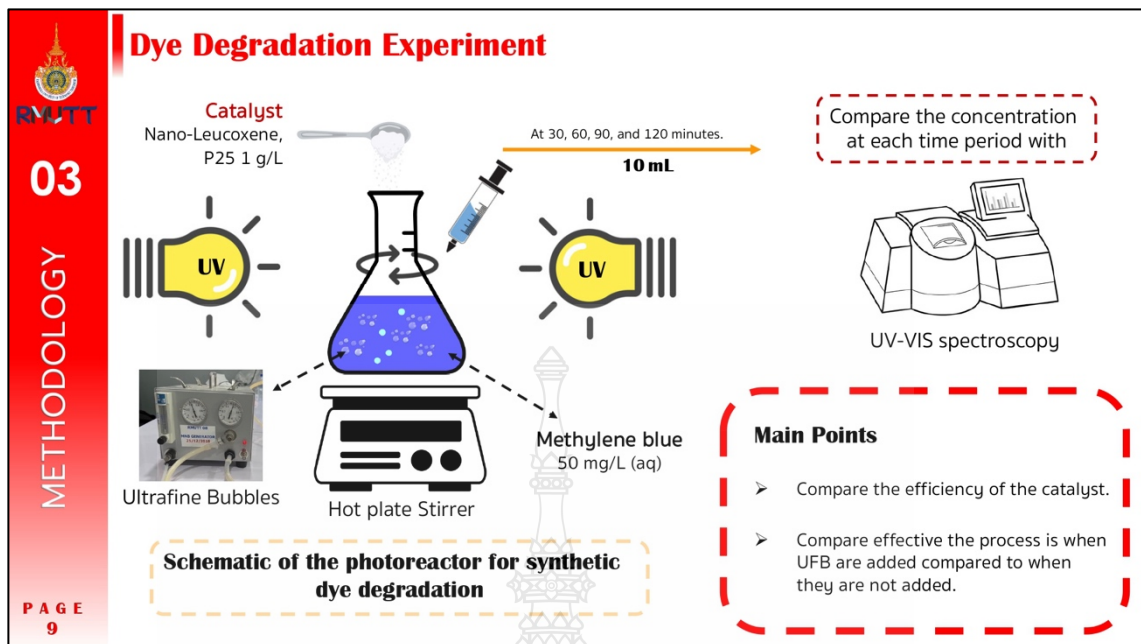
No.	Catalyst	synthetic dyes	How to increase efficiency	result	Reference
1	TiO ₂	Rhodamine B	Addition of H ₂ O ₂ in the photocatalytic process	Increased efficiency of RhB dye degradation by 98% when 1 M H ₂ O ₂ was added.	Harun, N., SHENG, C., SABRI, M., DAGANG, A., & SALLEH, H. (2020).
2	TiO ₂ (P25)	Methylene Blue	Micro/nano bubble aeration	The process with the addition of MNB had a 41-141% higher degradation rate for the Methylene Blue dye compared to the addition of conventional air bubbles.	Fan, W., Li, Y., Wang, C., Duan, Y., Huo, Y., Januszewski, B., ... Elimelech, M. (2021).
3	TiO ₂ (P25)	Methyl Orange	Micro/nano bubble aeration N ₂ , O ₂ , Synthetic air	Increased efficiency of Methyl Orange dye degradation from 58.2 ± 3.5% (N ₂ aeration) to 71.9 ± 0.6% (O ₂ aeration).	Yu, W., Chen, J., Ateia, M., Cates, E. L., & Johnson, M. S. (2021).
4	TiO ₂ Nanopowder Photocatalyst	Indigo Carmine, Reactive Black 5	Micro/nano bubble aeration	Increased efficiency of degradation of indigo carmine, reactive black 5 dye from 84.05–98.20% to 90.64–100% when micro/nano bubbles were added.	Rojviroon, O., & Rojviroon, T. (2022).
5	TiO ₂ Nanotube Arrays	Rhodamine B	Micro/nano bubble aeration	Degraded Rhodamine B dye 95.39% and Methylene Blue 74.23% when micro/nano bubbles were added.	Lin, Z., Dong, C., Mu, W., & Han, X. (2023).

This work : Use Nano Material from natural minerals

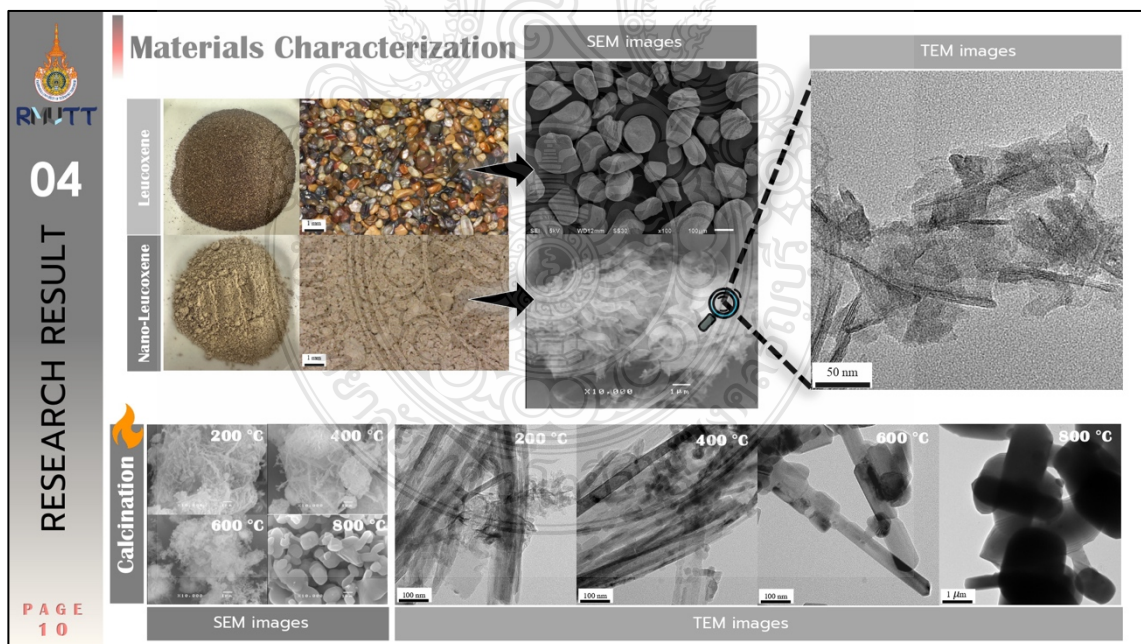
รูปที่ ข.6 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 6



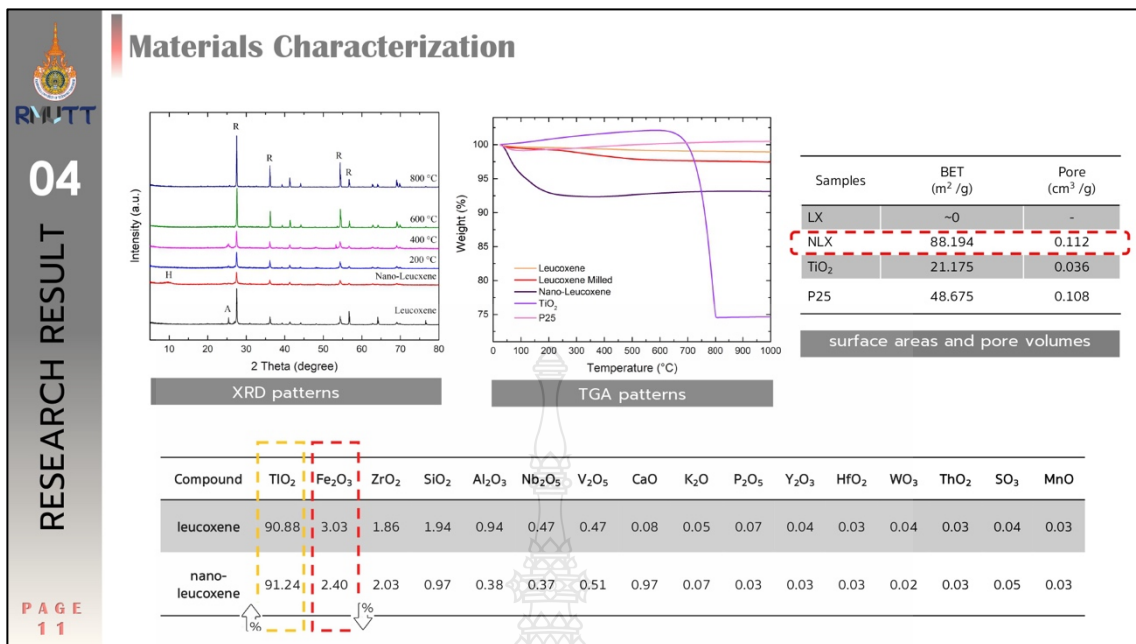
รูปที่ ข.7 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 7



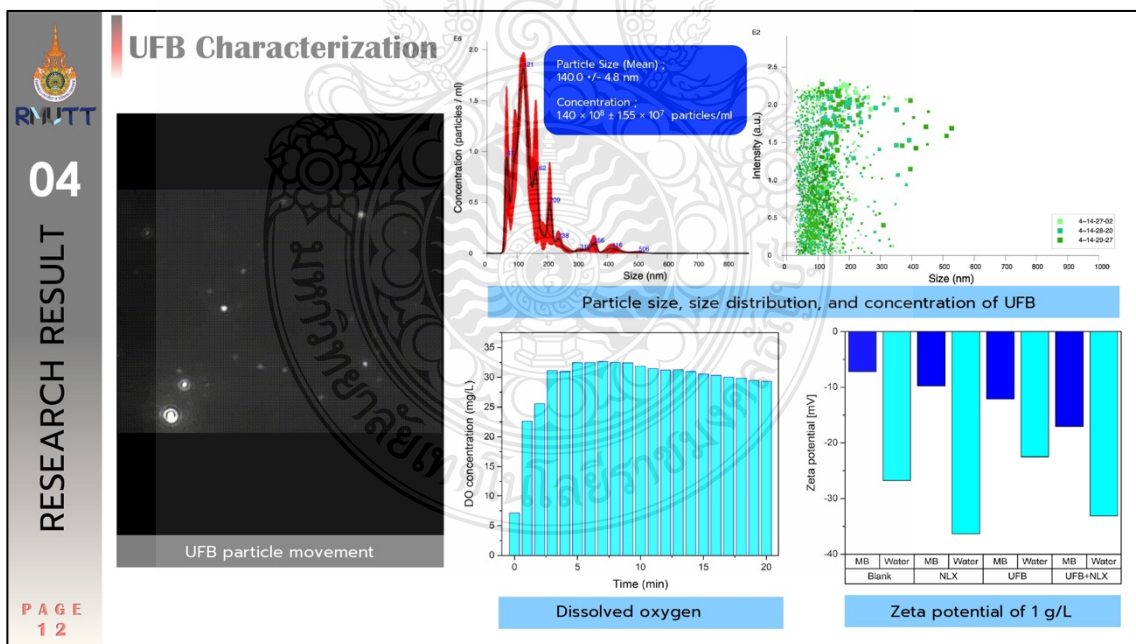
รูปที่ ข.8 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 8



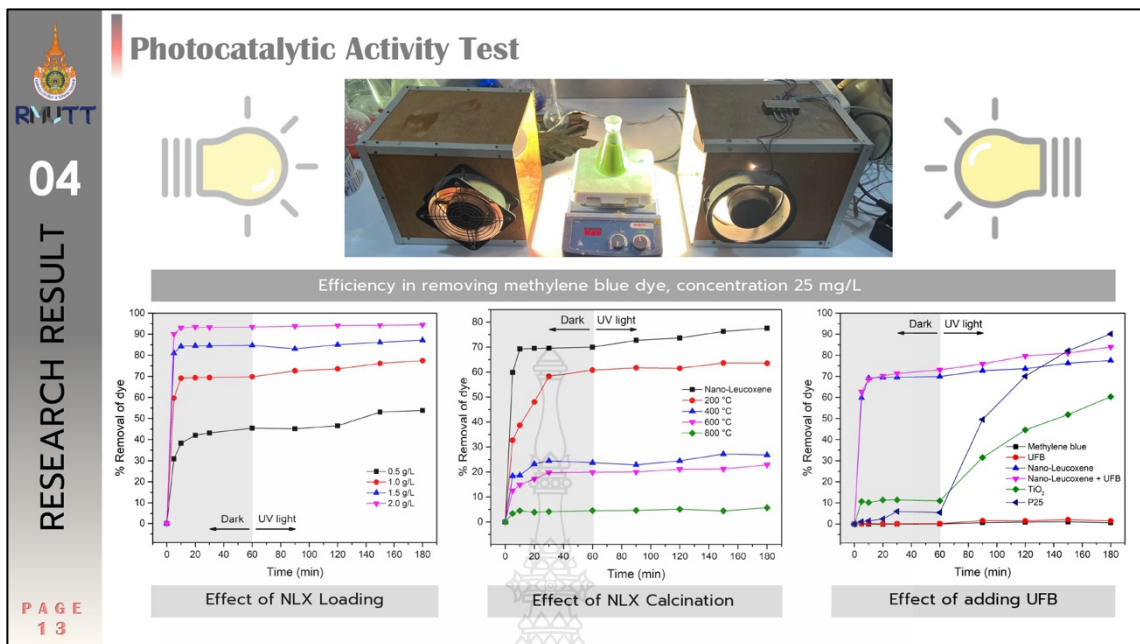
รูปที่ ข.9 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 9



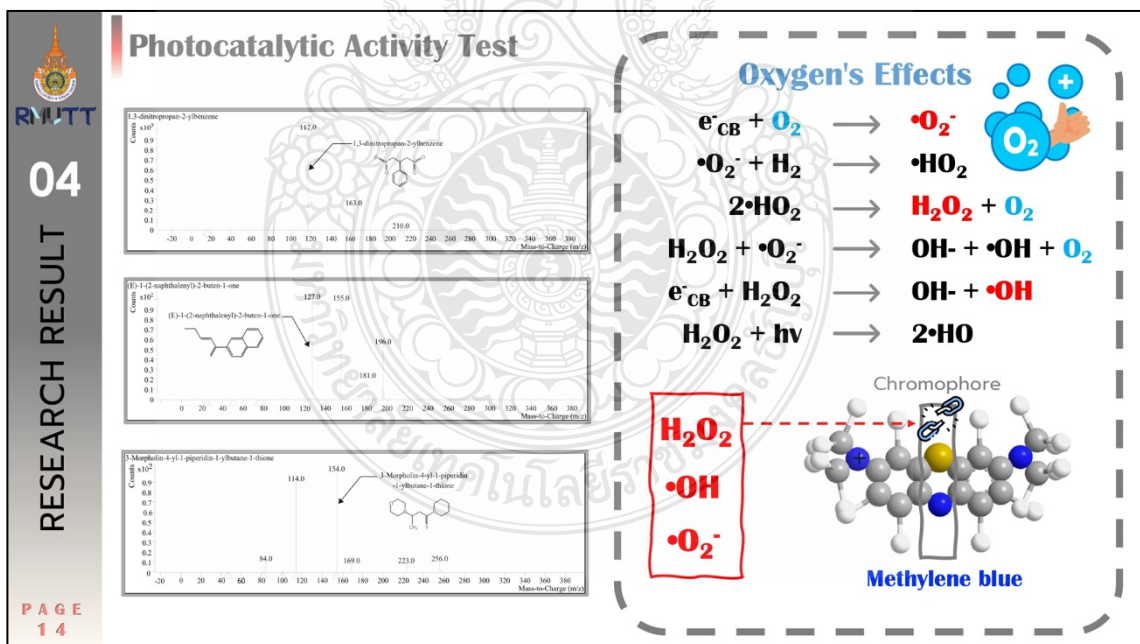
รูปที่ ข.10 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 10



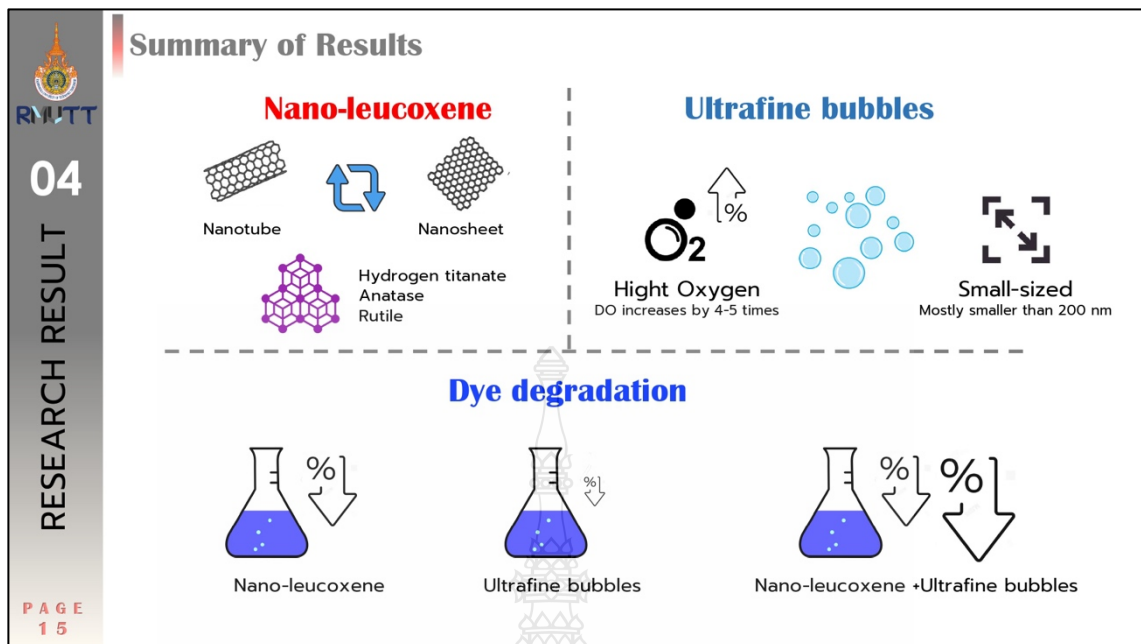
รูปที่ ข.11 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 11



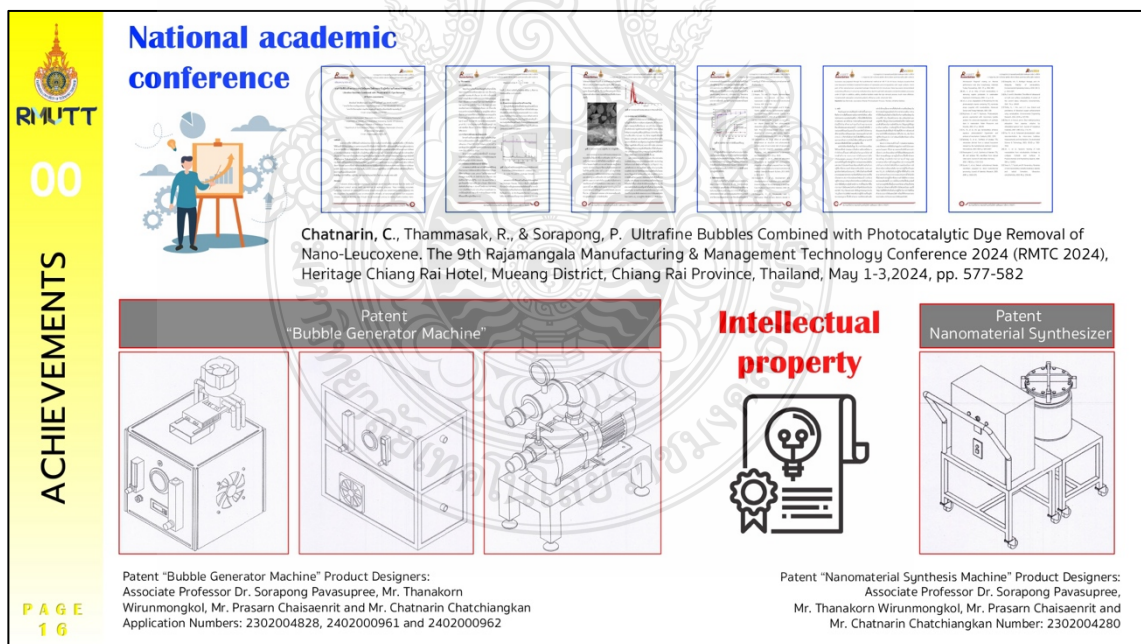
รูปที่ ข.12 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 12



รูปที่ ข.13 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 13



รูปที่ ข.14 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 14



รูปที่ ข.15 การนำเสนอวิทยานิพนธ์หน้าที่ 15

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นายฉัตรนรินทร์ ฉัตรเชียงกาญจน์
วัน เดือน ปีเกิด	7 กุมภาพันธ์ 2540
ที่อยู่	64 ซ.โกสุมรวมใจ 35 แขวงดอนเมือง เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ - พอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	-
เบอร์โทรศัพท์	0616535643
อีเมล	chatnarin_c@mail.rmutt.ac.th

