

การประยุกต์ใช้แผ่นบางนาโนจากแร่ิลเมนต์ของไทยสำหรับ
การลดสีข้อมลิ่งทอภายใต้แสงที่สายตามองเห็น

APPLICTION OF NANOSHEETS FROM THAI ILMENITE
MINERAL FOR DECOLORIZATION OF WASTE WATER
FROM TEXTILE DYING UNDER VISIBLE LIGHT

พรรณพิไล ห่วงกระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประยุกต์ใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทต์ของไทยสำหรับ
การลดสีข้อมลิ่งทอภายใต้แสงที่สายตามองเห็น

พรรณพิไล ห่วงระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์ของไทยสำหรับการลดสีย้อมจากสิ่งทอภายใต้แสงที่สายตามองเห็น
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพรรณพิไล ห่วงกระโทก
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีช์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) เนื่องจากสามารถสลายสารอินทรีย์ได้ งานวิจัยนี้แผ่นบางนาโนถูกเตรียมจากแร่โอลิเมไนท์ของไทย (TiO_2 ประมาณร้อยละ 60.8 โดยน้ำหนัก) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยากโดยใช้ชุดถังปฏิกรณ์ที่ทำการผลิตเองภายในประเทศสำหรับการลดความเข้มสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงที่ตามองเห็น

แผ่นบางนาโนเตรียมได้จากแร่โอลิเมไนท์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ที่อุณหภูมิในการเตรียม $105\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี รูปร่าง ขนาด โครงสร้างผลึกและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี The Brunauer-Emmett-Teller (BET) รวมถึงการทดลองนำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ไปใช้ลดสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงที่ตามองเห็น

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของ TiO_2 ในตัวอย่าง เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60.8 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 65.7 โดยน้ำหนัก โดยแผ่นนาโนที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททานิต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2-5 μm มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $72\text{ m}^2/\text{g}$ แผ่นบางนาโนที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ลดความเข้มของสีย้อมชนิดไครีลีนสีน้ำเงิน ($\lambda_{\text{max}} \sim 608\text{ nm}$) พบว่าการเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงที่สายตามองเห็นของแผ่นบางนาโนสามารถลดความเข้มของสีย้อมได้ร้อยละ 98.67 ในเวลา 120 นาที ซึ่งดีกว่า P-25 ซึ่งเป็นวัสดุนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: แผ่นบางนาโน ไฮโดรเทอร์มอล โอลิเมไนท์

Thesis Title	Application of Nanosheets from Thai Ilmenite Mineral for Decolorization of Dye Waste Water from Textile Dying Under Visible Light
Name-Surname	Miss Punpilai Haungkrathok
Program	Materials Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sorapong Pavasupree, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

The expansion of textile industry causes of water pollution. Waste-water treatment in textile industry use titanium dioxide (TiO_2) as a photocatalyst because TiO_2 can decompose organic compounds. In this study, nanosheets were prepared from low-cost Thai ilmenite mineral ($\text{TiO}_2 \sim 60.8$ wt%) via simple hydrothermal method with a teflon-lined stainless steel autoclave (Thai made) for decolorization of dye waste water from textile dying.

Nanosheets were synthesized by hydrothermal method using Thai ilmenite mineral at 105°C for 24 hours. The composition, shape, size, crystalline structures and specific surface area of the prepared samples were characterized by X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffraction (XRD), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area. The prepared nanosheets were decolorization of dye waste water from textile dying under visible light.

The amount of TiO_2 in the prepared sample increased from 60.8 wt% to 65.7 wt%. Nanosheets presented titanate structure ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) with diameter range of 2-5 μm . The BET specific surface area of the prepared titanate nanosheets was about $72 \text{ m}^2/\text{g}$. The decolorization of direct blue dye ($\lambda_{\text{max}} \sim 608 \text{ nm}$) was monitored. The results from the test under visible light showed that the prepared nanosheets decolorized the waste-water to 98.68 % within 120 min which was higher than those of commercial TiO_2 nanoparticles (P-25).

Keywords: nanosheets, hydrothermal, ilmenite

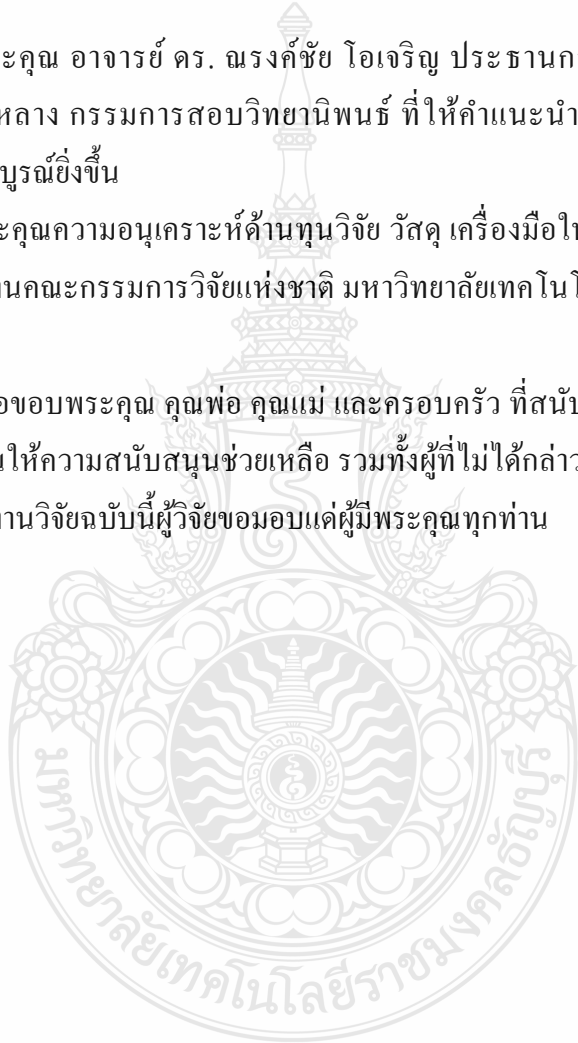
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากหลายๆฝ่าย ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรพงษ์ ภาวสุปรีห์ เป็นอย่างสูงที่ทำให้ทั้งคำแนะนำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จและเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ด้านทุนวิจัย วัสดุ เครื่องมือในการทำวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี บริษัท สิ้นแร่สาคร จำกัด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังทรัพย์ ทุกท่านที่มีส่วนให้ความสนับสนุนช่วยเหลือ รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย สำหรับคุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



พรรณพิไล ห่วงกระโทก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(15)
บทที่ 1 บทนำ.....	18
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	18
1.2 วัตถุประสงค์.....	19
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO ₂).....	40
2.3 แร่อิลเมไนท์ (Ilmenite mineral).....	48
2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process).....	50
2.5 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ.....	54
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	74
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	74
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	75
3.3 วิธีการทดลอง.....	79

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	87
4.1 ผลการสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์.....	87
4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้.....	90
4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะแร่โอลิเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้.....	94
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้.....	94
4.5 การวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโน TiO ₂ เชิงพาณิชย์ (P-25).....	95
4.6 การทดลองใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง.....	96
4.7 การศึกษาการดูดซับและการกำจัดสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงินโดยใช้ แผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25).....	99
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	103
5.1 การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้.....	103
5.2 การทดลองใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง.....	104
บรรณานุกรม.....	105
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ภาพ TEM และ SAED ของแผ่นบางนาโน TiO ₂ ที่สังเคราะห์ได้.....	20
ภาพที่ 2.2 ภาพ XRD pattern ของแผ่นบางนาโน TiO ₂ ที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่อุณหภูมิ 300 - 700 °C.....	21
ภาพที่ 2.3 ภาพ SEM ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ (a) 60 °C, 12 h, (b) 60 °C, 24 h, (c) 80 °C, 12 h, (d) 80 °C, 24 h, (e) 100 °C, 12 h, (f) 100 °C, 24 h, (g) 120 °C, 12 h, and (h) 120 °C, 24 h.....	22
ภาพที่ 2.4 ภาพ XRD pattern ของ (a) สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส ของ TTIP ด้วย 0.1 M KCl และสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ล้างด้วยแอมโมเนียเป็นเวลา 24 h ที่ (b) 60 °C, (c) 80 °C, (d) 100 °C, (e) 120 °C และ (f) สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ล้างด้วยแอมโมเนีย ที่ 120 °C, 12 h และปรับอุณหภูมิที่ 500 °C เป็นเวลา 1 h.....	22
ภาพที่ 2.5 ภาพ XRD pattern ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 300 °C – 800 °C (A: Anatase และ R: Rutile).....	23
ภาพที่ 2.6 ภาพ TEM ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (a) 300 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C, (d) 600 °C, (e) 700 °C and (f) 800 °C.....	24
ภาพที่ 2.7 ผลการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (วัดความเข้มชั้นของ I ₃ ⁻) ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้แผ่นบางนาโนที่ผ่านการเผา และวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25, JRC-01, JRC-03).....	25
ภาพที่ 2.8 ภาพ SEM ของ (a) สารตั้งต้น (b) สารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 70 °C, (c) 90 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C and (f) 150 °C.....	26
ภาพที่ 2.9 ภาพ XRD pattern ของ (a) สารตั้งต้น และ (b) ตัวอย่างสารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 70 °C, (c) 90 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C and (f) 150 °C (A: anatase R: rutile and T: titanate).....	26

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.10 ภาพ SEM ของแผ่นบางนาโน TiO ₂ ที่สังเคราะห์ได้ (A) และ XRD patterns (I) แผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ (II) ที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 400 °C (B).....	27
ภาพที่ 2.11 ภาพ SEM ของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 115 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง...	28
ภาพที่ 2.12 ภาพ XRD pattern ของสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ...	29
ภาพที่ 2.13 ภาพ TEM ของสารตัวอย่างท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลใช้ P-25 ที่อุณหภูมิ 150 °C เวลา 48 ชั่วโมง.....	30
ภาพที่ 2.14 ภาพ XRD pattern ของ สารตั้งต้น (P-25) และท่อนาโนไททานต.....	30
ภาพที่ 2.15 ภาพตารางค่าพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (BET Surface Area).....	31
ภาพที่ 2.16 ภาพ XRD pattern ของแร่ Ilmenite เริ่มต้นและตัวอย่างสังเคราะห์ H = Hydrogen Titanate และ R = Rutile TiO ₂	32
ภาพที่ 2.17 ภาพ SEM ของเส้นใยที่สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	32
ภาพที่ 2.18 ภาพ TEM ของเส้นใยที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า...	33
ภาพที่ 2.19 สเปกตรัม EDS ของตัวอย่างที่สังเคราะห์.....	34
ภาพที่ 2.20 ภาพ FE-SEM ตัวอย่างสังเคราะห์.....	34
ภาพที่ 2.21 ภาพ XRD pattern ของตัวอย่างที่เตรียมเผาที่อุณหภูมิต่างๆ T: Titanate (H ₂ Ti ₃ O ₇), R: Rutile (TiO ₂): Anatase (TiO ₂).....	35
ภาพที่ 2.22 ภาพ XRD pattern ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์จากแร่ Ilmenite และเส้นใยนาโนเผา เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ (a) 100-500 °C และ (b) 600-1000 °C; : TiO ₂ , B: TiO ₂ (B), H: Hydrogen, and R: Rutile TiO ₂	36
ภาพที่ 2.23 ภาพ SEM ของ (a) แร่ Ilmenite และ (b) เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์.....	37
ภาพที่ 2.24 ภาพ TEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า.....	37
ภาพที่ 2.25 แสดง Photodegradation ผลของ 100 mL 20 mg/L Indigo Carmine Employing 1 g ⁻¹ (a) Codoped TiO ₂ (b) Degussa P-25 (c) S-เจือ TiO ₂ , (d) Bi-เจือ TiO ₂ และ (e) บริสุทธิ์ TiO ₂ เป็นโฟโตคะตาลิซิสภายใต้แสงที่มองเห็น นำมาจาก Wang และคณะ.....	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.26 เส้นโค้งอัตราการดูดซับของ B2RL ใน TiO_2 ; ความเข้มข้นเริ่มต้นของ B2RL 94 1 mg/L น้ำหนักของ TiO_2 1 g ; ค่า pH = 5.7 ปริมาณการเริ่มต้นของการ แก้ปัญหาสีข้อม 100 ml.....	39
ภาพที่ 2.27 ผงไททาเนียมไดออกไซด์.....	40
ภาพที่ 2.28 โครงสร้างผลึก TiO_2 (a) อนาเทส (Anatase) (b) รูไทล์ (Rutile) และ (c) บรูคไคท์ (Brookite).....	42
ภาพที่ 2.29 สมบัติในการทำมาสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) (a) ไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถสลายคราบสกปรกต่าง ๆ ได้ทำให้คราบสกปรกหลุดออกจากพื้นผิว วัสดุได้ง่าย (b) เมื่อหยดน้ำตกลงบนผิวไททาเนียมไดออกไซด์ หยดน้ำจะ เปลี่ยนเป็นแผ่นน้ำทำให้สามารถกำจัดคราบสกปรกให้หลุดออกจากผิววัสดุได้ ง่าย.....	47
ภาพที่ 2.30 สมบัติในการเป็นซูเปอร์ไฮโดรฟิลิกของไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อ ไททาเนียมไดออกไซด์ถูกแสงหยดน้ำจะเปลี่ยนเป็นแผ่นน้ำเคลือบผิวกระจก อย่างต่อเนื่องจึงทำให้ไม่เกิดฝ้าบนแผ่นกระจก.....	48
ภาพที่ 2.31 แผนภูมิต้นไม้แสดงถึงก้านความสัมพันธ์ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล.....	51
ภาพที่ 2.32 กระบวนการซัลเฟต.....	52
ภาพที่ 2.33 กระบวนการคลอไรด์.....	53
ภาพที่ 2.34 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น.....	55
ภาพที่ 2.35 (a) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มี พลังงานจำเพาะออกมา.....	56
ภาพที่ 2.26 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน.....	56
ภาพที่ 2.37 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์.....	58

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.38 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปริงส์.....	58
ภาพที่ 2.39 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	59
ภาพที่ 2.40 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม.....	59
ภาพที่ 2.41 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	60
ภาพที่ 2.42 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM.....	62
ภาพที่ 2.43 หลักการทำงานของเครื่อง XRD.....	63
ภาพที่ 2.44 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer).....	65
ภาพที่ 2.45 หลักการทำงานของเครื่องวัดพื้นที่ผิวรุ่น Flow Sorb II 2300.....	66
ภาพที่ 2.46 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง.....	68
ภาพที่ 2.47 แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้น.....	68
ภาพที่ 2.48 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงกับโมเลกุลของสาร.....	69
ภาพที่ 2.49 แสดง Electromagnetic Spectrum.....	70
ภาพที่ 2.50 แสดงโครงสร้างของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	70
ภาพที่ 2.51 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR Spectroscopy.....	72
ภาพที่ 2.52 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานของอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์.....	73
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	74
ภาพที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	75
ภาพที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ.....	76
ภาพที่ 3.4 ชุดกรองสุญญากาศ.....	76
ภาพที่ 3.5 ตู้อบสารเคมี.....	77
ภาพที่ 3.6 ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	77
ภาพที่ 3.7 ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	78
ภาพที่ 3.8 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	78
ภาพที่ 3.9 เครื่อง UV Spectrophotometer.....	79
ภาพที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุแผ่นบางขนาดนาโนจากเรอิลเมไนท์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	80

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.11 การชั่งแร่โอลิเมไนท์บดปริมาณ 16 กรัม.....	81
ภาพที่ 3.12 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 M.....	81
ภาพที่ 3.13 การเตรียมการสังเคราะห์วัสดุนาโน.....	82
ภาพที่ 3.14 การประกอบถังปฏิกรณ์เข้ากับชุดให้ความร้อนและชุดกวนสาร.....	82
ภาพที่ 3.15 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 M.....	83
ภาพที่ 3.16 การล้างตัวอย่างด้วยกรด HCl และน้ำ D.I.....	83
ภาพที่ 3.17 การกรองตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ.....	84
ภาพที่ 3.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic Activit).....	85
ภาพที่ 3.19 ภาพเครื่อง UV Spectrophotometer (Thermal Scientific, Genesys 20) และตู้ที่บ แสง.....	86
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายแร่โอลิเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น.....	87
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแร่โอลิเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้นที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	88
ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของแร่โอลิเมไนท์ที่ผ่านการบดด้วยเครื่อง ballmill ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	88
ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 5 M.....	89
ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายสารตัวอย่างแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้.....	90
ภาพที่ 4.6 ภาพ SEM ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย (a) 10,000 เท่า (b) 15,000 เท่า และ 20,000 เท่า.....	91
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	92
ภาพที่ 4.8 ภาพ XRD Patterns โครงสร้างผลึกของแร่โอลิเมไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ (H = Hydrogen titanate และ R = Rutile TiO ₂).....	93
ภาพที่ 4.9 Uv-Vis absorbance spectra ของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้และวัสดุนาโนTiO ₂ เชิงพาณิชย์ (P-25).....	94

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.10 การดูดกลืนแสงของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO_2 เจริงพาณิชย์ โดยใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (a) UV (b) Visible โดย สีย้อมชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน.....	97
ภาพที่ 4.11 การลดความเข้มสีของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO_2 เจริงพาณิชย์โดยใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (a) Visible (b) UV โดยสีย้อมชนิด ไคเร็กซ์สีน้ำเงิน.....	98
ภาพที่ 4.12 FT-IR spectra ของสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน.....	99
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างสียไคเร็กซ์สีน้ำเงิน.....	100
ภาพที่ 4.14 FT-IR spectra ของ (a)สีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน (ของเหลว) และ (b)ตัวอย่างสีย้อมที่ผ่านการลดความเข้มสีโดยใช้แผ่นบางนาโน ที่เวลา 120 นาที (Visible).....	100
ภาพที่ 4.15 FT-IR spectra ของแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ เจริงพาณิชย์ (P-25).....	101
ภาพที่ 4.16 FT-IR spectra ของ (a) แผ่นบางนาโน (หลังผ่านการกระบวนการลดความเข้มสี) และ (b) วัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ เจริงพาณิชย์ (P-25) (หลังผ่าน กระบวนการลดความเข้มสี).....	102

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางโครงสร้างของไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์.....	42
ตารางที่ 2.2 พลังงานยึดเหนี่ยวในหน่วยอิเล็กตรอน โวลต์ (eV) ของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น....	55
ตารางที่ 2.3 แอ็บซอร์ปชันเอจ (Absorption Edge) และพลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ (keV) ของธาตุ.....	57
ตารางที่ 2.4 ลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์เร่ง 20 kV..	61
ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของสารตัวอย่าง.....	94
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแร่โอลิเมนที่วัดดูบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จาก การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF.....	95



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TiO ₂	ไททาเนียมไดออกไซด์
eV	อิเล็กตรอน โวลท์
UV	อัลตราไวโอเล็ต
Vis	แสง Visible
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
XRF	X-ray fluorescence
SEM	Scanning Electron Microscopy
TEM	Transmission Electron Microscopy
XRD	X-ray Diffraction
BET	The Brunauer-Emmett-Teller
SAED	Selected - Area Electron Diffraction
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
P-25	อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ P-25
JRC-01	อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ JRC-01
JRC-03	อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ JRC-03
°C	องศาเซลเซียส
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
cm ³ /g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
H	Hydrogen titanate
R	Rutile TiO ₂
A	Anatase TiO ₂
ACA	Acetylacetone
TTIP	Titanium Tetra Isopropoxide
H ₂	ไฮโดรเจน
KCl	โพแทสเซียมคลอไรด์
ml	มิลลิลิตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

h.	ชั่วโมง
M	โมลาร์
H ₂ O	น้ำ
H ₂ Ti ₃ O ₇	ไททานเนต
DETA	Diethylenetriamine
IPA	Isopropyl Alcohol
1-D	นาโนแบบหนึ่งมิติ
EDS	Electronic Documents System
FeTiO ₃	แร่ Ilmenite
MgTiO	แร่ไททิลด์
MnTiO	แร่ไพโรไฟไนต์
Fe ₂ O ₃	Red Iron Oxide
Co	Cobalt
S	กำมะถัน หรือ ซัลเฟอร์
Bi	Bismuth
Ti	Titanium
O	Oxygen
B2RL	Direct Fast Blue
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
NECTEC	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
MTEC	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
NANOTEC	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
Mg	Magnesium
Mn	Manganese
SiO ₂	Silicon dioxide
Al ₂ O ₃	Aluminum oxide
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

HNO ₃	กรดไนตริก
H ₂ SO ₄	กรดซัลฟูริก
HCOOH	กรดฟอร์มิก
W	Tungsten
Mo	Molybdenum
Rh	Rhodium
HCl	กรดไฮโดรคลอริก
KOH	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
I	ความเข้มรังสี
i	กระแสไฟฟ้า
V	ศักย์ไฟฟ้า
Z	เลขอะตอมของธาตุ
MCA	Multichannel Analyzer
kV	กิโลโวลต์
LaB ₆	Lanthanum Hexaboride Crystal
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
JCPDs	Joint Committee on Powder Diffraction Standard
BCC	Body Center Cubic
FCC	Face Center Cubic
NMR	Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy
IR	ช่วงอินฟราเรด
P	ความดันของแก๊ส
P ₀	ความดันอิมิตัวของแก๊ส
<i>I</i>	Intensity of Transmitted Light
<i>I</i> ₀	Intensity of Incident Light
B	ความหนาของเซลล์ใส่ตัวอย่าง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของไทย โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น นับเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การย้อมสี และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อม ส่งผลให้เกิดปัญหาหมอกควันน้ำเป็นอย่างมาก การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี, การดูดซับ, การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และการเร่งปฏิกิริยาใช้แสงร่วมโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น [1]

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่ง ที่มีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ที่กว้างประมาณ 3.2 eV (ตอบสนองแสงในช่วง UV) เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเนื่องมาจากการที่ตัวมันมีสมบัติพิเศษในหลาย ๆ ด้าน อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น วัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง วัสดุบำบัดน้ำเสีย วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ เป็นต้น [2] ในการสังเคราะห์วัสดุ TiO_2 สามารถทำการสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น วิธีโซล-เจล (Sol-gel), วิธีอิเล็กโทรเดโพสิชัน (Electrodeposition), วิธีอิเล็กโทรสปินนิง (Electrospinning) และวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นต้น [3], [4] จากกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้น เป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และใช้อุณหภูมิในการเตรียมไม่สูงมาก มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำ การเกิดปฏิกิริยาทำในระบบปิด [5], [6], [7], และ [8] และตัวอย่างที่เตรียมได้มีรูปร่างที่มีความพิเศษคือ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เช่น ท่อนาโน เส้นใยนาโน และแผ่นบางนาโน [6], [9], และ [10] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนะการเตรียมวัสดุแผ่นบางนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจากแร่โอลิเมนไทท์ของไทย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการลดสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทดลองนำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสำหรับลดความเข้มของสีย้อมจากสิ่งทอ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เตรียมแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์ของไทย โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

1.3.2 ศึกษาสมบัติต่างๆของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ เช่น ขนาด รูปร่าง และ โครงสร้างผลึก

1.3.2 ศึกษาการนำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สำหรับลดความเข้มของสีย้อมจากสิ่งทอเปรียบเทียบกับวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์ของไทยที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงที่สายตามองเห็นที่สามารถผลิตได้เองในประเทศสำหรับลดความเข้มของสีย้อมจากสิ่งทอ

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.5.3 เตรียมวัสดุแผ่นบางนาโนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.5.4 ทำการศึกษาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF, รูปร่าง ขนาดและ โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง SEM, TEM, XRD และเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET

1.5.5 ทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของวัสดุนาโนที่เตรียมได้

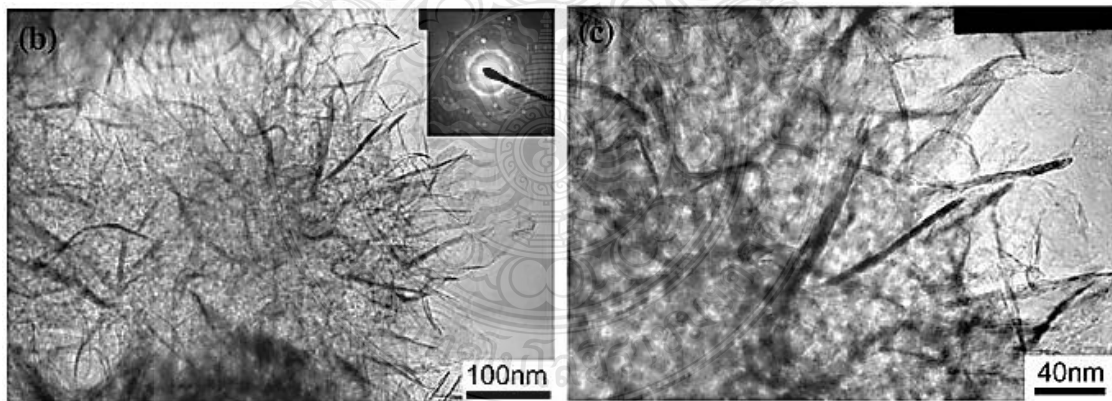
1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

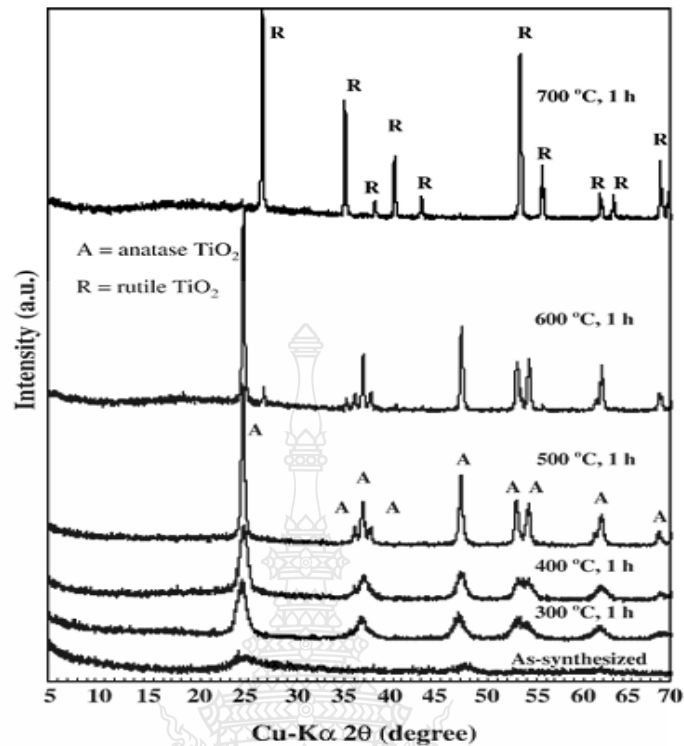
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sorapong Pavasupree และคณะ [11] ได้ศึกษาการสังเคราะห์แผ่นบางนาโน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ในการสังเคราะห์และวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้คือ Titanium (IV) Butoxide (Aldrich) กับ Acetylacetone (ACA) และ Distilled Water 40 ml ในสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) 30 ml ใช้สภาวะการสังเคราะห์ที่ 130 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า แผ่นบางนาโนมีการจัดเรียงรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายดอกไม้ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 nm ถึง 2 μm แผ่นบางนาโนมีลักษณะเป็นแผ่นโค้งเล็กน้อยกว้างประมาณ 50 - 100 nm และมีความหนาของแผ่นในนาโนเมตร ผลการทดสอบ XRD พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส จากการวัด BET พบมีพื้นที่ผิวประมาณ 642 m^2/g มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 3 - 4 nm และมีปริมาตร รูพรุน 0.774 cm^3/g แผ่นบางนาโนเมื่อผ่านการเผาให้ความร้อน 300 - 500 °C จะเปลี่ยนเป็น Nanorods และ Nanoparticles ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส โดยที่ Nanorods มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 15 nm Nanoparticles มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 10 nm

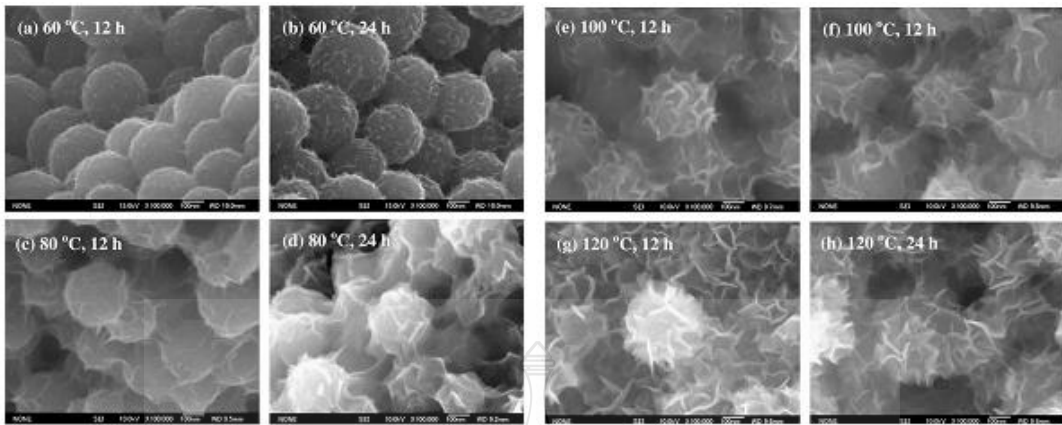


ภาพที่ 2.1 ภาพ TEM และ SAED ของแผ่นบางนาโน TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ [11]

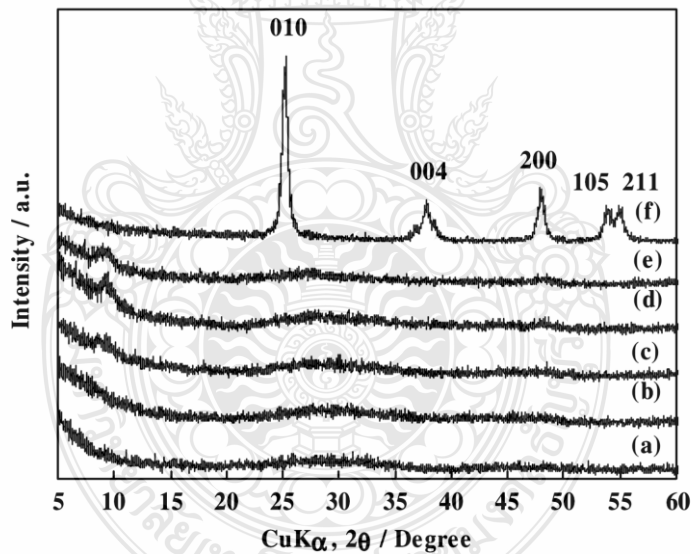


ภาพที่ 2.2 ภาพ XRD pattern ของแผ่นบางนาโน TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่อุณหภูมิ 300 - 700 °C [11]

Jaturong Jitputti และคณะ [12] ได้ศึกษาการสังเคราะห์แผ่นบางนาโน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ด้วยอุณหภูมิต่ำ ในการสังเคราะห์และวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้คือ Titanium Tetra Isopropoxide (TTIP, $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$, 97%, Aldrich) ในเอทานอล โดยใช้ 28% สารละลาย Ammonia 20 ml และ Distilled Water 40 ml ใช้สภาวะการสังเคราะห์ที่ 60, 80, 100, 120 °C เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมงจากการศึกษาพบว่า แผ่นบางนาโนมีการจัดเรียงรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายดอกไม้ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 - 450 nm จากการวัด BET พบมีพื้นที่ผิวประมาณ $350.7 \text{ m}^2/\text{g}$ เมื่อผ่านการเผาให้ความร้อนที่ 500 °C มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส แผ่นบางนาโนแสดงการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของการแยก H_2 จากน้ำที่ดี และแผ่นบางนาโนที่ผ่านการเผาให้ความร้อนที่ 500 °C เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ดีกว่า ไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (ST-01)

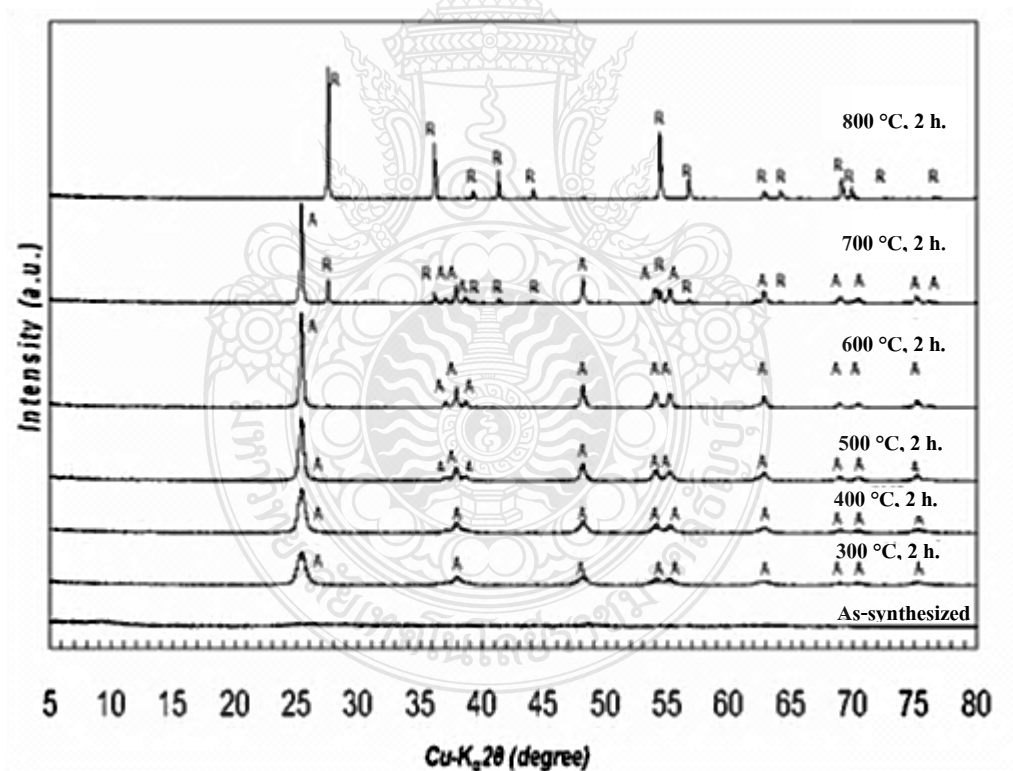


ภาพที่ 2.3 ภาพ SEM ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ (a) 60 °C, 12 h., (b) 60 °C, 24 h., (c) 80 °C, 12 h., (d) 80 °C, 24 h., (e) 100 °C, 12 h., (f) 100 °C, 24 h., (g) 120 °C, 12 h., and (h) 120 °C, 24 h. [12]

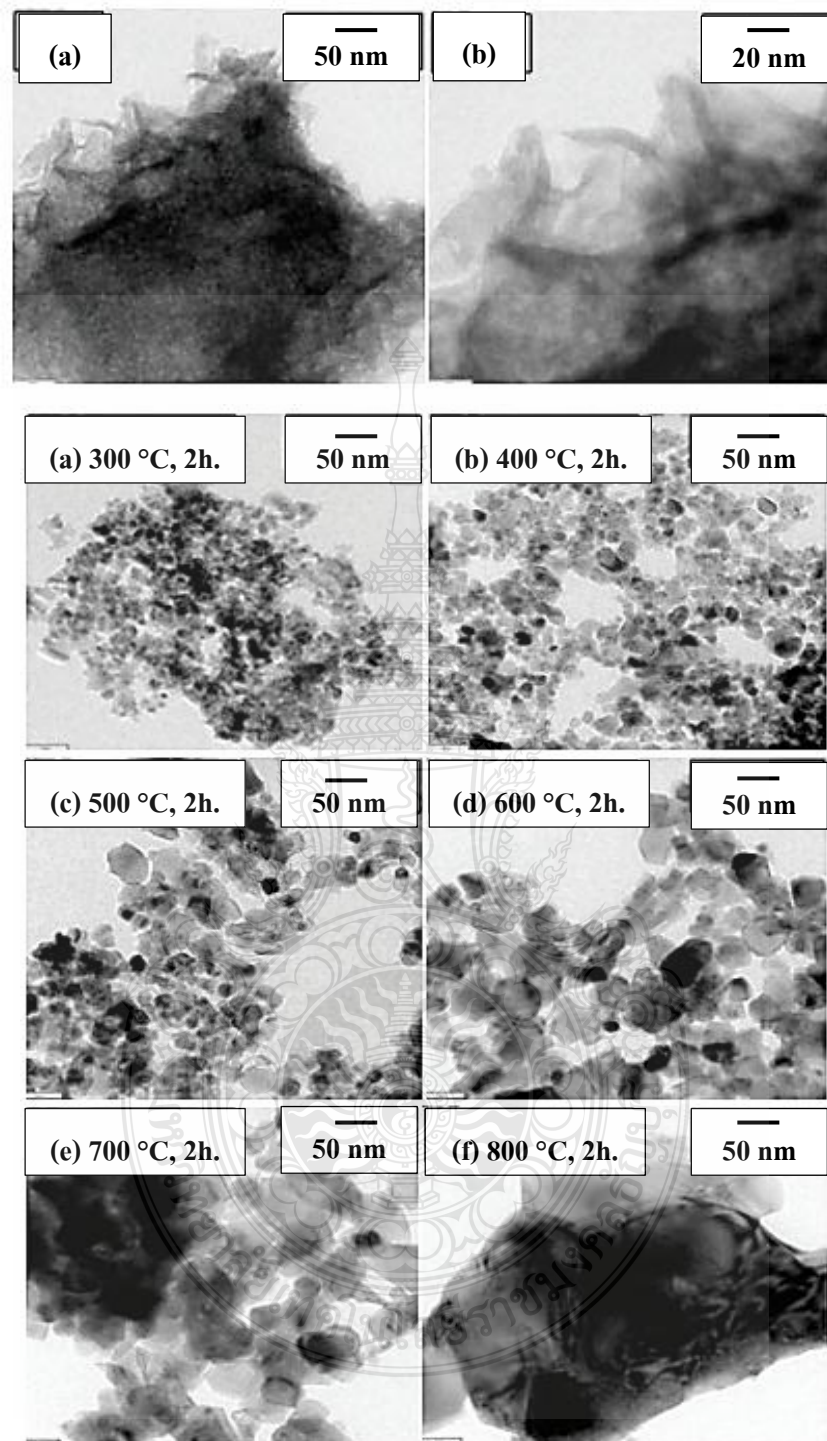


ภาพที่ 2.4 ภาพ XRD pattern ของ (a) สารตัวอย่าง ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสของ TTIP ด้วย 0.1 M KCl และสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ล้างด้วยแอมโมเนียเป็นเวลา 24 h. ที่ (b) 60 °C, (c) 80 °C, (d) 100 °C, (e) 120 °C และ (f) สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ล้างด้วยแอมโมเนีย ที่ 120 °C, 12 h. และปรับอุณหภูมิที่ 500 °C เป็นเวลา 1 h. [12]

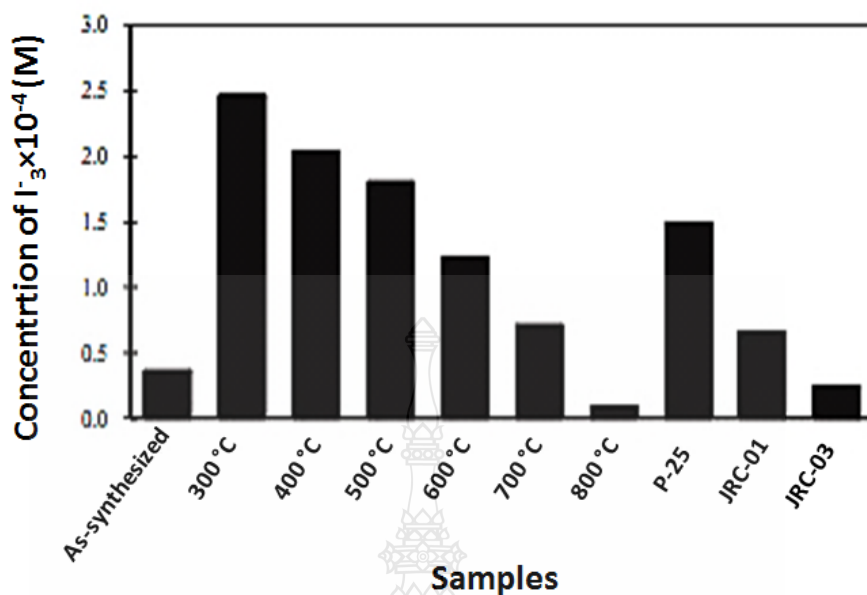
Athapon Simpraditpan และคณะ [13] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นบางนาโน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีรูพรุน โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเทฟรอนที่ผลิตขึ้นเองในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีประเทศไทย ในการสังเคราะห์และวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้คือ Titanium (IV) Butoxide กับ Acetyacetone (ACA) และ Distilled Water 80 ml ในสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) จากผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่ผิวประมาณ 360.28 m²/g มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน 3-5 nm และมีปริมาตรรูพรุน 0.275 cm³/g เมื่อเผาให้อุณหภูมิแผ่นบางนาโน ที่ 300 – 600 °C พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส และมีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทสเพิ่มขึ้น และพบว่าแผ่นบางนาโนที่ผ่านการเผาให้ความร้อนมีสมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีกว่าแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้และไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25, JRC-01, JRC-03) [13]



ภาพที่ 2.5 ภาพ XRD pattern ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 300 °C – 800 °C (A: Anatase และ R: Rutile) [13]

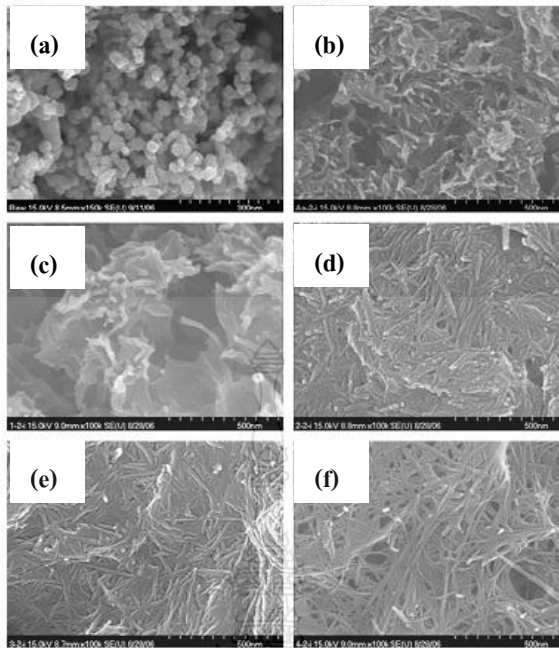


ภาพที่ 2.6 ภาพ TEM ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ และแผ่นบางนาโนที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (a) 300 °C, (b) 400 °C, (c) 500 °C, (d) 600 °C, (e) 700 °C and (f) 800 °C [13]

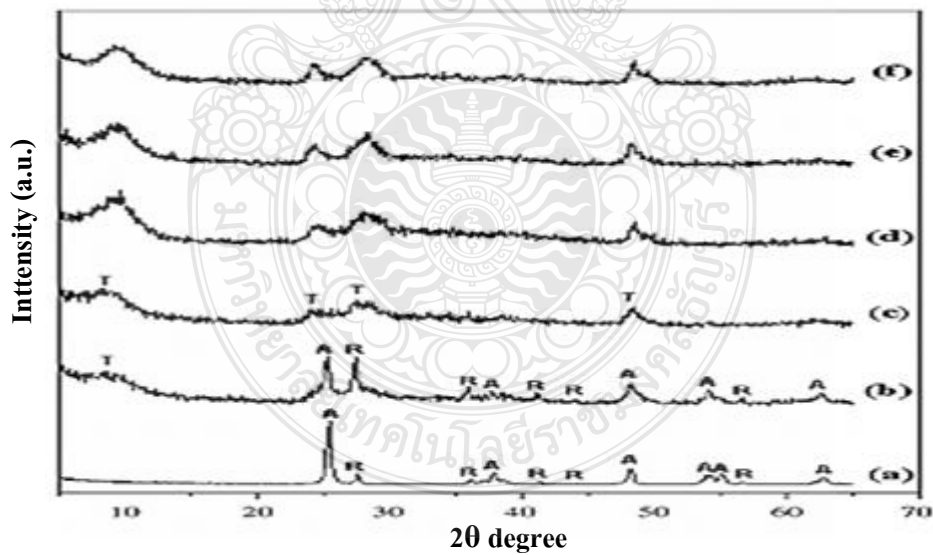


ภาพที่ 2.7 ผลการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (วัดความเข้มข้นของ I_3^-) ของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้แผ่นบางนาโนที่ผ่านการเผา และวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25, JRC-01, JRC-03) [13]

Hyung-Kee Seo และคณะ [14] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของท่อนาโนไททานเนตสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการสังเคราะห์ โดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25 Degussa, Germany) เป็นสารตั้งต้นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M ด้วยชุดตั้งปฏิกิริยาที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเทฟลอน โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 70 - 150 °C เวลา 48 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น รูปร่างของสารตัวอย่างจะเปลี่ยนจากแผ่นบางนาโนเป็นท่อนาโน ที่อุณหภูมิ 110 °C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเป็นกุญแจสำคัญในการกำหนดอัตราการเกิดท่อนาโน ผลของ X-ray Diffraction สนับสนุน ถึงการเปลี่ยนแปลง เฟส และความเป็นผลึก ของสารที่สังเคราะห์ได้ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C พบการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส ทั้งหมด การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C พบการลดลงของ Peak H_2O (531.01 eV) และ -OH แต่ Ti - O มีการเพิ่มขึ้นมาจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้พันธะทางเคมีของ H_2O และ -OH ย้ายออกจากไททานเนต และเปลี่ยนเป็นพันธะของ ไททานเนตของไททานี

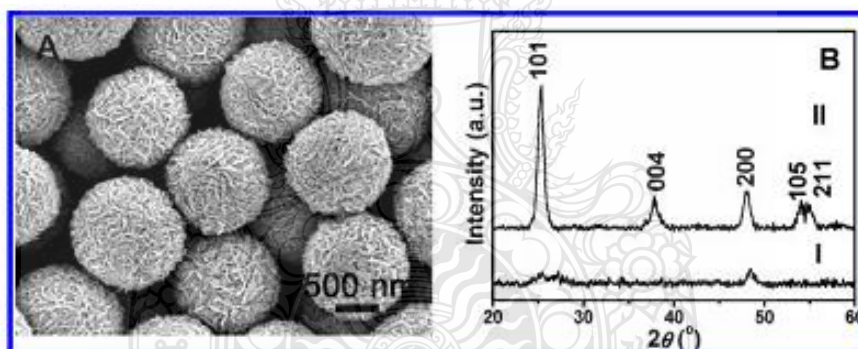


ภาพที่ 2.8 ภาพ SEM ของ (a) สารตั้งต้น (b) สารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 70 °C, (c) 90 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C and (f) 150 °C [14]



ภาพที่ 2.9 ภาพ XRD pattern ของ (a) สารตั้งต้น และ (b) ตัวอย่างสารที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 70 °C, (c) 90 °C, (d) 110 °C, (e) 130 °C and (f) 150 °C (A: anatase R: rutile and T: titanate) [14]

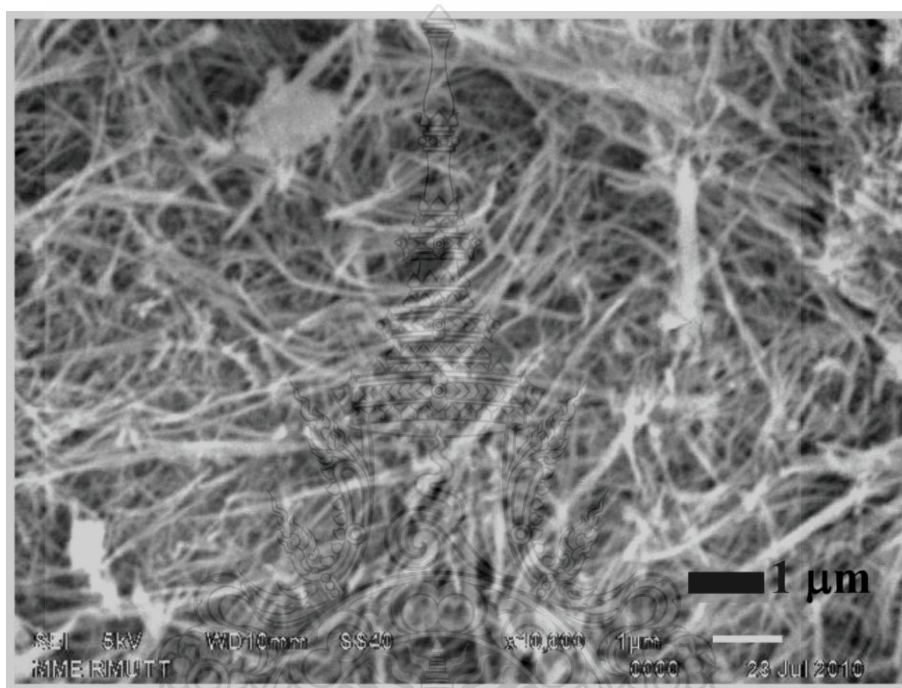
Jun Song Chen และคณะ [15] ได้ศึกษาการสังเคราะห์แผ่นบางนาโนเพื่อนำไปใช้ในแบตเตอรี่ลิเทียมโดยใช้ Titanium (IV) Isopropoxide 1.5 ml เป็นสารตั้งต้น Diethylenetriamine (DETA; 99%, Sigma-Aldrich) 0.03 mL ใสลงใน Isopropyl Alcohol (IPA) 42 ml เป็นตัวทำละลายลงในถังปฏิกรณ์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเทฟลอน โดยใช้อุณหภูมิ 200 °C เวลา 24 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า แผ่นบางนาโนที่ได้ที่โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส มีความหนาประมาณ 3 nm มีความกว้างในช่วง 100 - 900 nm และประมาณ 100% อยู่ในระนาบ 001 ซึ่งจะมีรูพรุนขนาดนาโน ในทั้งสามมิติและมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 170 m²/g จากโครงสร้างของแผ่นบางนาโนทำให้การส่งผ่านสั้น ส่งผลให้การรับและการปลดปล่อยของแบตเตอรี่ลิเทียมมีความสามารถในการจัดเก็บพลังงานเคมีไฟฟ้ามีความหนาแน่นในการจัดเก็บสูง จากผลดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าของลิเทียมสูง ยังส่งผลให้มีความจุและอัตราการแลกเปลี่ยนที่ดีมาก นอกจากจะใช้เป็น High-Power Lithium Ionbattery Electrodes ยังสามารถนำไปใช้เป็น Photocatalysis and Dye-Sensitized Solar Cells



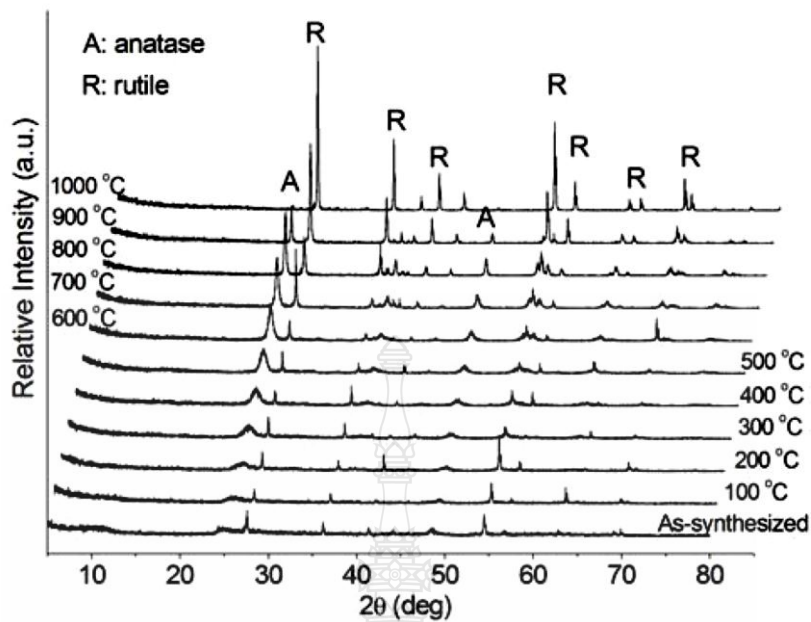
ภาพที่ 2.10 ภาพ SEM ของแผ่นบางนาโน TiO₂ ที่สังเคราะห์ได้ (A) และ XRD patterns (I) แผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ (II) ที่เผาที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 400 °C (B) [15]

D. Aphairaj และคณะ [16] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ผลของอุณหภูมิการเผาต่อโครงสร้างของผงไททานเนียมไดออกไซด์โดยใช้ 16 กรัม ของแร่ลูโคซีนของไทยเป็นสารตั้งต้นใน สารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ 10 M ปริมาตร 100 ml ด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเทฟลอน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่ 115 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่ารูปร่างของสารตัวอย่างที่ได้เป็นท่อนาโนและเส้นใยนาโน ท่อนาโนไททานเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 - 20 nm เส้นใยนาโน ไททานเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ประมาณ 20 – 50 nm ผลการทดสอบ XRD พบว่าสารตัวอย่างก่อนการเผามีโครงสร้างผลึกผสมแบบไททานิต และรูไทล์ ไททานิตมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น อนาเทส ที่อุณหภูมิการเผาที่ 300 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นความเป็นผลึกแบบอนาเทส เพิ่มขึ้น เมื่อให้อุณหภูมิการเผาเป็น 700 – 900 °C โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิการเผาที่ 1,000 °C จะพบโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์อย่างเดียว

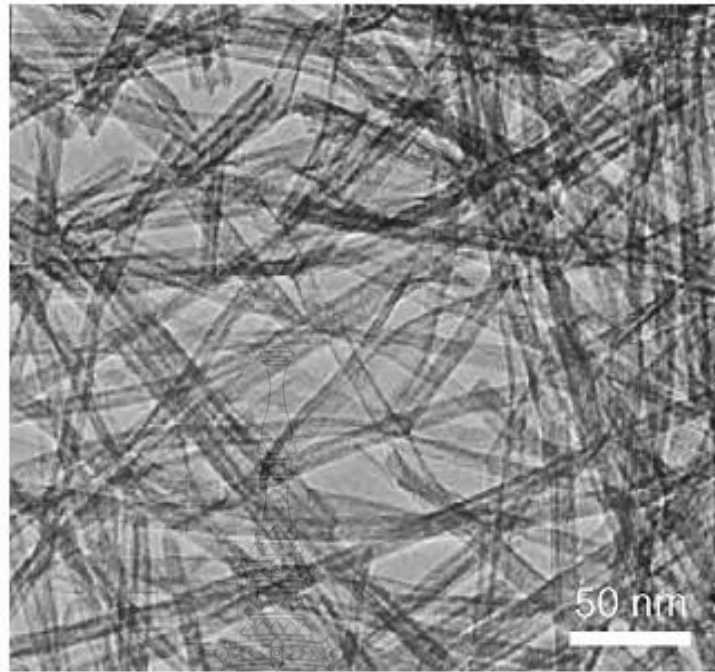


ภาพที่ 2.11 ภาพ SEM ของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 115 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [16]

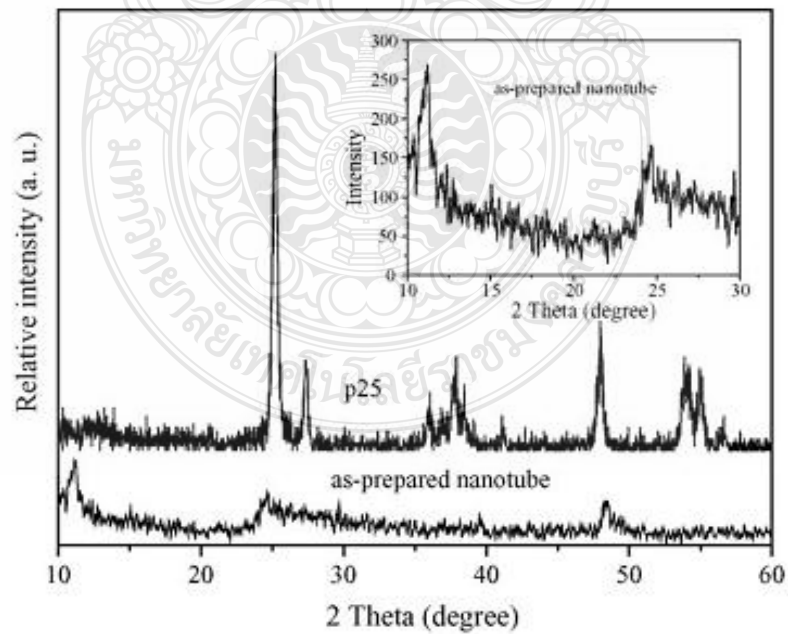


ภาพที่ 2.12 ภาพ XRD pattern ของสารตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [16]

Jianguo Yu และคณะ [17] ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจากเส้นใยนาโนไททานेटที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ 1.5 กรัมของไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25 Degussa, Germany) เป็นสารตั้งต้น ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M ปริมาตร 140 mL ด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเทฟลอน ที่อุณหภูมิ 150 °C เวลา 48 ชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า สารตัวอย่างที่เตรียมได้เป็นท่อนาโนไททานेट มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 – 12 nm มีความยาวในหลักร้อยนาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะของท่อนาโนประมาณ 355.7 m²/g มีปริมาตรรูพรุน 1.54 cm³/g เมื่อนำไปปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน 200 °C เป็นเวลา 1, 3, 7, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่ามีรูปร่างเป็นเส้นใยนาโนขนาด 8.1 – 27.3 nm มีพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยนาโนประมาณ 108.2 m²/g มีปริมาตรรูพรุน 0.44 cm³/g มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25 Degussa, Germany) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 60.0 m²/g มีปริมาตรรูพรุน 0.06 cm³/g ผลการศึกษาสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงพบว่า เส้นใยนาโนไททานेटที่มีรูพรุน มีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสูงกว่าท่อนาโนไททานेट และไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) เมื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของท่อไททานेट เปรียบเทียบกับไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า มีขนาดของผลึกที่เล็กกว่าและมีปริมาตรของรูพรุนที่มากกว่า



ภาพที่ 2.13 ภาพ TEM ของสารตัวอย่างท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลใช้ P-25 ที่อุณหภูมิ 150 °C เวลา 48 ชั่วโมง [17]



ภาพที่ 2.14 ภาพ XRD pattern ของ สารตั้งต้น (P-25) และท่อนาโนไททาเนต [17]

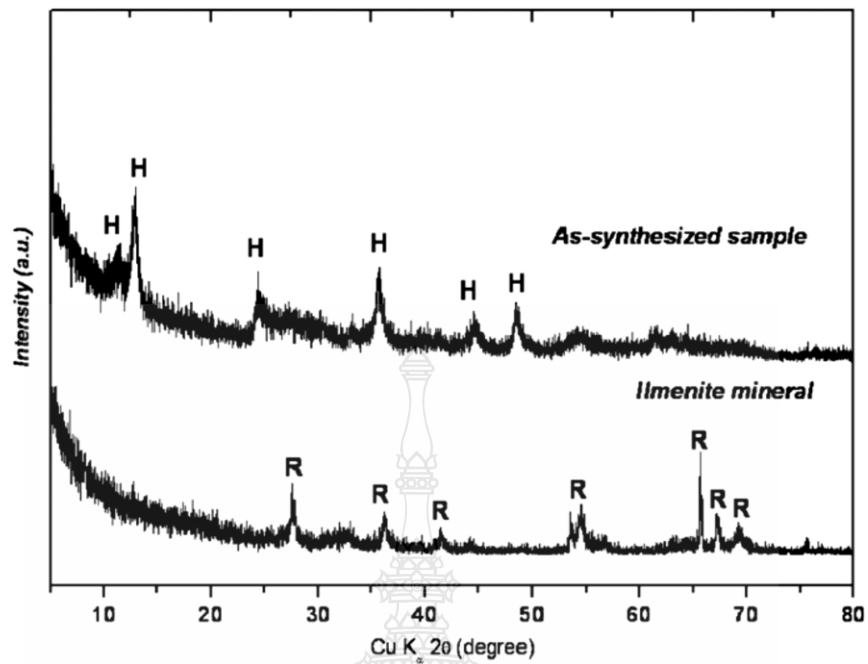
Samples	S_{BET} (m^2/g) ^a	Pore volume (cm^3/g) ^b	Average pore size (nm) ^b
P25	60.0	0.06	3.8
Nanotubes	355.7	1.54	17.3
1 h	235.4	0.73	12.4
7 h	108.2	0.44	16.2
24 h	90.2	0.42	18.5

^a The BET specific surface area was determined by multipoint BET method using the adsorption data in the relative pressure (P/P_0) range of 0.05–0.3.

^b Pore volume and average pore size were determined by nitrogen adsorption volume at the relative pressure of 0.994.

ภาพที่ 2.15 ภาพตารางค่าพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (BET Surface Area) [17]

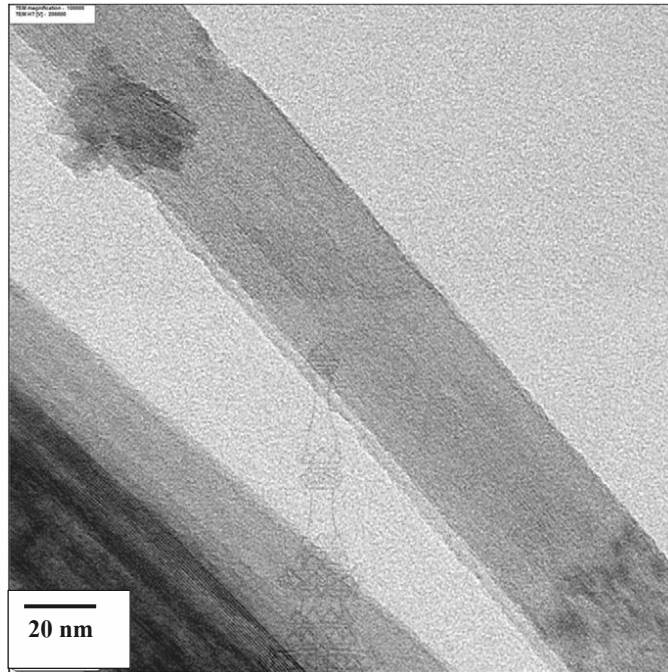
Athapon Simpraditpan และคณะ [18] พบว่าเส้นใยนาโนไททานตถูกสังเคราะห์ที่วิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้แร่ Ilmenite เป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยสารตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM) and The Brunauer–Emmett–Teller Analysis (BET) พบว่าโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์แสดงให้เห็นถึงรูปแบบเลเยอร์ไททานตที่มีโครงสร้างผลึกไททานต ($\text{H}_2\text{Ti}_x\text{O}_{2x+1}$) เส้นใยนาโนที่เตรียมมีความยาวในช่วง 2 - 7 μm มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 20 - 90 nm เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50 \text{ m}^2/\text{g}$ วิธีการสังเคราะห์นี้จะได้เป็นเส้นใยนาโนแบบหนึ่งมิติ (1-D) จากแร่ธรรมชาติต้นทุนต่ำ



ภาพที่ 2.16 ภาพ XRD pattern ของแร่ Ilmenite เริ่มต้นและตัวอย่างสังเคราะห์ H = Hydrogen Titanate และ R = Rutile TiO_2 [18]

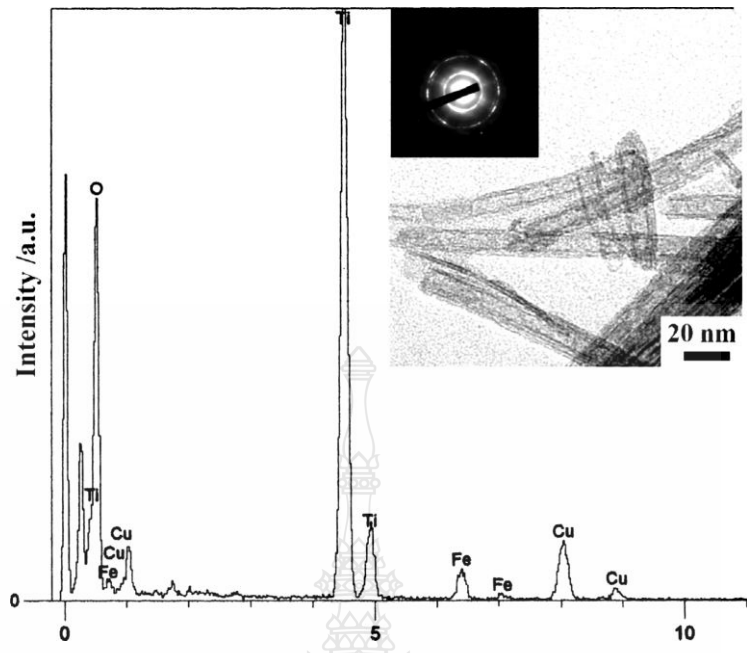


ภาพที่ 2.17 ภาพ SEM ของเส้นใยที่สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า [18]



ภาพที่ 2.18 ภาพ TEM ของเส้นใยที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า [18]

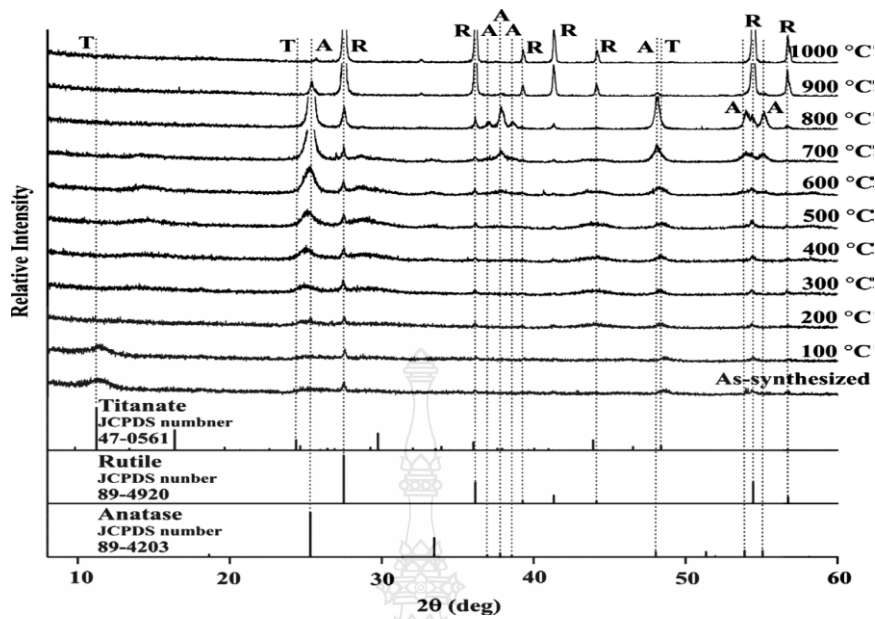
Deaw Aphairaj และคณะ [19] จากงานวิจัยพบว่า ท่อนาโนแอนาเทส TiO_2 ที่สังเคราะห์จากแร่ Leucosene โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ $100 - 1000^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่ารูปแบบ XRD ของตัวอย่างที่สังเคราะห์เป็นไททานเนต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) เมื่อนำตัวอย่างที่สังเคราะห์มาทำการเผาที่ 400°C แสดงถึงแอนาเทส TiO_2 ท่อนาโนมีเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในและด้านนอก 6 nm และ 16 nm ตามลำดับและมีความยาวอยู่ในช่วง 20 - 100 nm พื้นที่ผิวจำเพาะของท่อนาโนแอนาเทส TiO_2 $82.98 \text{ m}^2/\text{g}$ จากการศึกษาการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของท่อนาโนแอนาเทส TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พาณิชย์ (JRC-01)



ภาพที่ 2.19 สเปกตรัม EDS ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ [19]



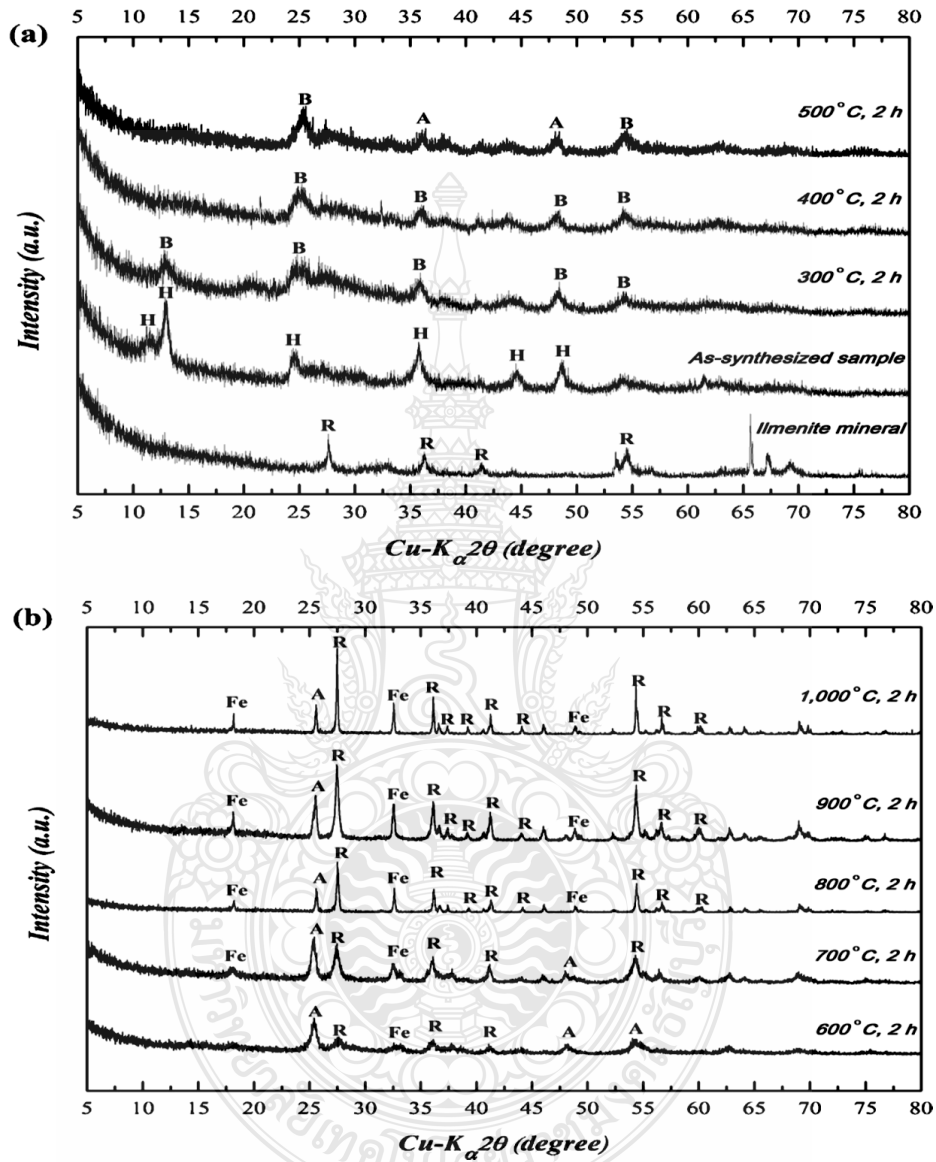
ภาพที่ 2.20 ภาพ FE-SEM ตัวอย่างสังเคราะห์ [19]



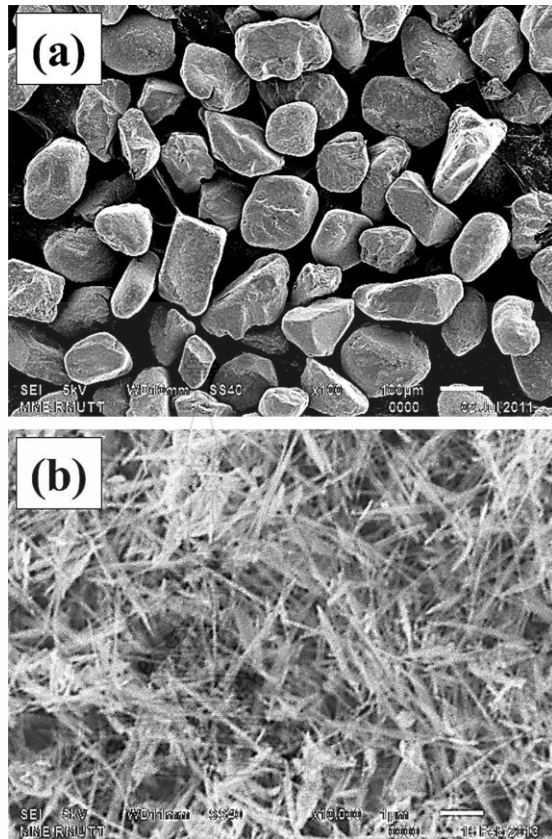
ภาพที่ 2.21 ภาพ XRD pattern ของตัวอย่างที่เตรียมเผาที่อุณหภูมิต่างๆ T: Titanate ($H_2Ti_3O_7$), R: Rutile (TiO_2): Anatase (TiO_2) [19]

Athapon Simpraditpan และคณะ [20] เส้นใยนาโนไททานตถูกสังเคราะห์โดยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ที่ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง) โดยใช้แร่ Ilmenite ($FeTiO_3$) เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใยนาโนอยู่ที่ 20 - 90 nm และมีความยาวเส้นใยนาโนที่ 2 - 7 μm นำตัวอย่างที่สังเคราะห์มาทำการเผาที่ 300 - 400 $^{\circ}\text{C}$ พบว่าแสดงเฟสเป็น TiO_2 (B) ในขณะที่เส้นใยนาโนเผาที่ 500 $^{\circ}\text{C}$ พบโครงสร้างผลึก 2 เฟส นั่นคือ TiO_2 (B) และอนาเทส ส่วนเส้นใยนาโนเผาที่อุณหภูมิสูง 600 - 1000 $^{\circ}\text{C}$ พบว่ามีส่วนผสมของ โครงสร้างผลึก 3 เฟส ได้แก่ อนาเทส, รูไทล์ และ Fe_2O_3 เฟสรูไทล์เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา เส้นใยนาโนเผาที่ 300 - 700 $^{\circ}\text{C}$ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นเส้นใยนาโน เมื่อนำไปเผาที่ 800 - 1000 $^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น Submicron Rod การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผาช่วงต้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของเฟส อนาเทส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างผลึกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปยังฟอร์มที่เสถียรที่สุดคือ เฟสรูไทล์ ขนาดผลึกของตัวอย่างที่เตรียมไว้เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแสดงถึงการดูดกลืนแสงในช่วง Visible ของตัวอย่างที่เตรียมแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของเฟสผลึกและขนาดผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นช่องว่างแถบพลังงานของตัวอย่างที่เตรียมแคบลงเนื่องจากเพิ่มอุณหภูมิในการเผา นอกจากนี้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของเส้นใยนาโนเผาที่ 400 $^{\circ}\text{C}$

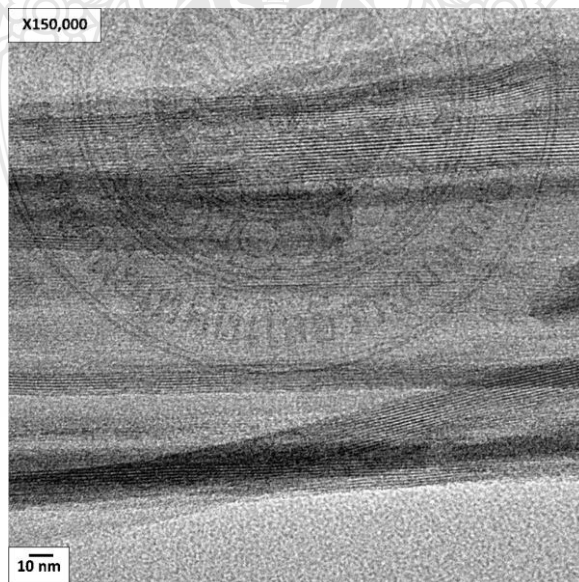
เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีค่าสูงกว่าพองอนุภาคนาโน TiO₂ ในเชิงพาณิชย์ (P-25, JRC-01 และ JRC-03)



ภาพที่ 2.22 ภาพ XRD pattern ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์จากแร่ Ilmenite และเส้นใยนาโนเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ (a) 100 - 500 °C และ (b) 600 - 1000 °C; : Anatase TiO₂, B: TiO₂ (B), H: Hydrogen Titanate, and R: Rutile TiO₂ [20]

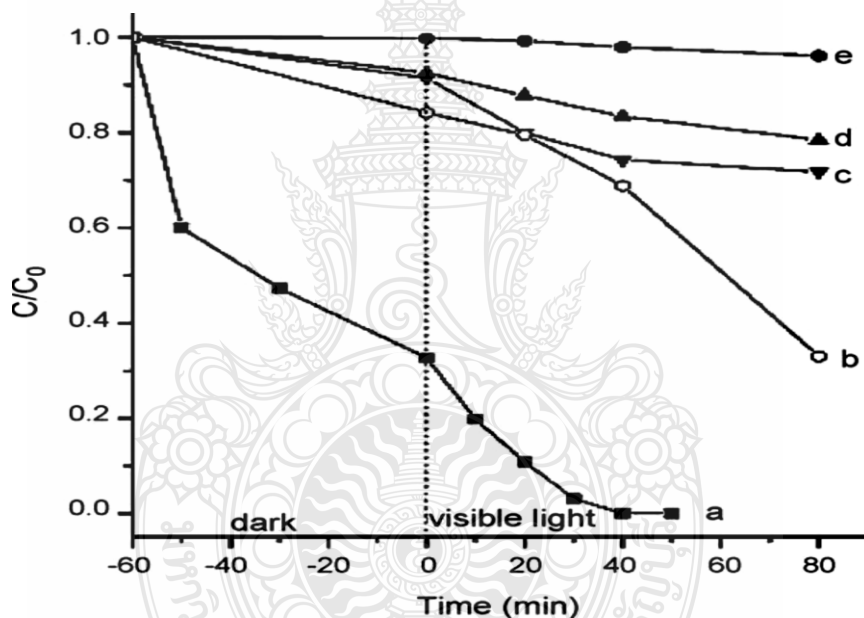


ภาพที่ 2.23 ภาพ SEM ของ (a)แร่ Ilmenite และ (b) เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ [20]



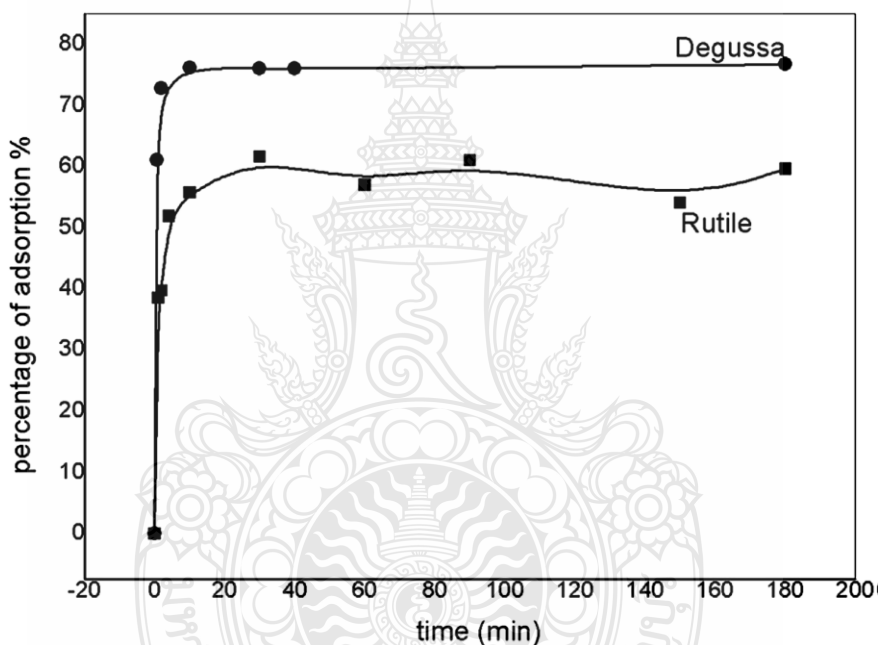
ภาพที่ 2.24 ภาพ TEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า [20]

Fang Han และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาสีย้อม Organic ซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มที่ใหญ่ที่สุดของการเกิดมลพิษทางน้ำที่ถูกปล่อยจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระบวนการทางอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากความเป็นพิษของสีย้อมและการมองเห็นบริเวณผิวน้ำ ดังนั้นการกำจัดและลดสีย้อม Organic จึงได้รับความสนใจมาก จากความหลากหลายของพัฒนาที่ต่างกันของไทเทเนียมไดออกไซด์ในด้านการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ที่ดูเหมือนจะเป็นเทคโนโลยีที่มีแนวโน้มมากที่สุดในการกำจัดและลดสีย้อม Organic โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงระบบการเร่งปฏิกิริยาของ TiO_2 มุ่งเป้าไปที่ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาแสงของ TiO_2 แร่ธาตุประกอบของสีย้อม Organic การใช้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงที่มองเห็นหรือในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ ความเสถียรภาพของ TiO_2 ในส่วนการรีไซเคิลและการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง



ภาพที่ 2.25 แสดง Photodegradation ผลของ 100 ml 20 mg/L Indigo Carmine Employing 1 g^{-1} (a) Co doped TiO_2 (b) Degussa P-25 (c) S-เจือ TiO_2 , (d) Bi-เจือ TiO_2 และ (e) บริสุทธิ์ TiO_2 เป็นโฟโตคะตาไลต์ภายใต้แสงที่มองเห็นนำมาจาก Wang และคณะ [21]

Doaa El-Mekki และคณะ [22] ในการศึกษาการกำจัดสีของเมทิลีนบลู (Direct Fast Blue B2RL) ด้วย Rutile TiO_2 โดยผ่านการดูดซับ UV และการกำจัดโดยใช้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เปรียบเทียบกับที่ Degussa P-25 TiO_2 โดยศึกษาพารามิเตอร์ผลต่อการดูดซับ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงพื้นที่พื้นผิวจำเพาะ ขนาดอนุภาค Zeta Potential Band Gap รวมทั้งผลกระทบของค่า pH ผลในการกำจัดโดยใช้การเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง รูปแบบที่แตกต่างกันของ B2RL ใน TiO_2 ทั้งสองประเภท การลดลงของ B2RL มีค่าดังนี้ $\text{pH } 12 > \text{ค่า pH } 5.7 \text{ (เป็นกลาง)} > \text{pH } 2$ ในขณะที่ D เพื่อมีค่า $\text{pH } 5.7 > \text{pH } 12 > \text{pH } 2$ จากอัตราการดูดซับ B2RL ของ rutile TiO_2 และ Degussa P-25 TiO_2 พบว่า Degussa P-25 TiO_2 มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี



ภาพที่ 2.26 เส้นโค้งอัตราการดูดซับของ B2RL ใน TiO_2 ; ความเข้มข้นเริ่มต้นของ B2RL 941 mg/L น้ำหนักของ TiO_2 1 g; ค่า pH = 5.7 ปริมาณการเริ่มต้นของการแก้ปัญหาสีของ 100 ml [22]

2.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide : TiO_2)

ในปัจจุบันวัสดุนาโนและนาโนเทคโนโลยีมีความเจริญก้าวหน้าและมีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรม ในชีวิตประจำวันเทคโนโลยีดังกล่าวมีผลทำให้ได้วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งเมื่อวัสดุมีขนาดยิ่งเล็กลงเท่าใดก็จะส่งผลให้สัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคยิ่งมากขึ้นเท่านั้น และมีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ คือ มีสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น ในระดับไมโครเมตรหรือไมครอน สมบัติดังกล่าวเป็นที่ต้องการของภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการนวัตกรรมในการผลิตสินค้าที่กลุ่มผู้บริโภคต้องการในปัจจุบัน วัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) แสดงดังภาพที่ 2.27 ซึ่งที่ผ่านมานิยมนำมาใช้เป็นเม็ดสีสำหรับอุตสาหกรรมสี หมึกพิมพ์ พลาสติก กระจก สายใยสังเคราะห์ ยาง เกรยอน เซรามิกส์ เครื่องสำอาง ส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น และมีการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานมากขึ้นเมื่อมีความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยีเช่นปัจจุบัน [23], [24]

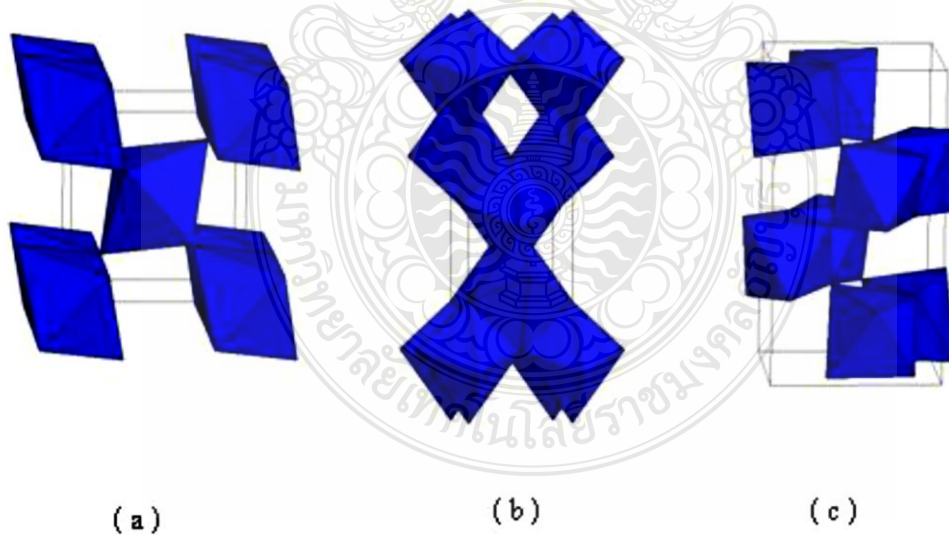


ภาพที่ 2.27 ผงไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n (n-Type Semiconductor) เนื่องจากขาดออกซิเจน (Oxygen Deficiency) โครงสร้างผลึกของ TiO_2 จำแนกได้ 3 แบบ คือ โครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) แบบรูไทล์ (Rutile) และแบบบรูคไคท์ (Brookite) ไททาเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติแต่ได้มาจากอิลเมนไนท์ (Ilmenite) ซึ่งเป็นแร่สีดำชนิดหนึ่งเป็นพวกไอรอนไททาเนต (Iron Titanate, FeTiO_3) หรือแร่ลูโคซีน (Leucoxene) สารประกอบประเภทไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน [25] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไททาเนียมไดออกไซด์จะไม่มีประสิทธิภาพสมบูรณ์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่หากออกไซด์ของโลหะอัลคาไลด์อื่นๆ เช่น โซเดียมโพแทสเซียมรวมอยู่ด้วย จะทำให้วัสดุผสมที่ได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่ว่องไว (Active Site) เกิดขึ้นจากตำหนิ (Defect) ในโครงสร้างของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อมีออกไซด์ชนิดอื่นปะปนอยู่ด้วยลักษณะโดยทั่วไปมีสีขาวทึบแสง เกิดเองตามธรรมชาติมี 2 รูปแบบ ใหญ่ๆ ได้แก่ รูไทล์ (Rutile) และอนาเทส (Anatase) โดยรูไทล์มีค่าดัชนีหักเหความหนาแน่นสูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทส ทั้ง 2 รูปแบบ มีไททาเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ผสมอยู่กับสารปนเปื้อน จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ศึกษาการนำผลึกมาใช้ในการทดลองโฟโตคะไลซิสเพียง 2 รูป คือ รูไทล์ และอนาเทส ซึ่งรูไทล์ไม่เหมาะสมที่จะมาเป็นตัวคะตะลิสเพราะเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลสูงและมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่า อนาเทส ในปัจจุบันจึงนิยมใช้อนาเทสมากกว่าแบบอื่น ไททาเนียมไดออกไซด์มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.2 eV จึงจำเป็นต้องใช้แสง UV เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งแสงที่ใช้ต้องมีความยาวคลื่นให้พลังงานมากกว่าพลังงานแถบช่องว่าง ได้แก่ แสงที่มีความยาวคลื่น 400 nm หรือน้อยกว่า [25] สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงโครงสร้าง ของอนาเทสและรูไทล์ ไททาเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 และ โครงสร้างผลึกของทั้งสามแบบ แสดงดังภาพที่ 2.28

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์ [26]

สมบัติ	อนาเทส (Anatase)	รูไทล์ (Rutile)
Molecular Weight (g/mol)	79.88	79.88
Melting Point ($^{\circ}\text{C}$)	1825	1825
Boiling Point ($^{\circ}\text{C}$)	2500-3000	2500-3000
Light Absorption (nm)	<390	<415
Mohr's Hardness	5.5	6.5-7.0
Refractive Index	2.55	2.75
Dielectric Constant	31	114
Crystal Structure	Tetragonal	Tetragonal
Lattice Constant (\AA)	a = 3.78, c = 9.52	a = 4.59, c = 2.96
Density (g/cm^3)	3.79	4.13
Ti-O Bond Length (\AA)	1.94 (4), 1.97 (2)	1.95 (4), 1.98 (2)



ภาพที่ 2.28 โครงสร้างผลึก TiO_2 (a) อนาเทส (Anatase) (b) รูไทล์ (Rutile) และ (c) บรูคไคท์ (Brookite) [28]

จากภาพที่ 2.28 โครงสร้างไททานเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) บรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) และ รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) โครงสร้างผลึกอนาเทส รูไทล์ และ บรูคไคท์ สามารถแสดงในรูปของ TiO_2 ที่เป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือ ออกตะฮีดรอล (Octahedral) ทั้งสามโครงสร้างมีความแตกต่างกันเนื่องจากการบิดตัวของแต่ละ ออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกัน และจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอลซึ่งเกิดจาก (001) Planes โครงสร้างของรูไทล์เกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอลที่ (001) Planes ส่วนโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล

2.2.1 สมบัติเฉพาะตัวของไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) [25]

2.2.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysts)

ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติในการถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysts) เมื่อได้รับแสง UV ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 nm โดยกลไกในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดขึ้นจากการที่ e^- ของไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ได้รับพลังงานจากแสงจะมีพลังงานสูงขึ้น และย้ายจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า และ โฮล (h^+) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับสารต่างๆ ที่สัมผัสกับอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากสมบัติของปฏิกิริยามีความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิตจึงนำมาผลิตเป็นเสื้อผ้านาโนเคลือบอนุภาค TiO_2 เมื่อกำจัดเชื้อโรค และกลิ่นอับ

2.2.1.2 ค่าความหนืด

อนุภาคของไททานเนียมไดออกไซด์ที่แพร่กระจายสู่พอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นสามารถเปรียบเทียบได้ว่าเป็นสารแขวนลอยโดยความหนืดของสารแขวนลอยขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่นความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวปริมาตรบางส่วน ปฏิกิริยาระหว่าง TiO_2 และพอลิเมอร์ รูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาค เป็นต้น ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม Volumic Fraction จนกระทั่งถึงขีดจำกัดค่าหนึ่งที่วัสดุไม่สามารถไหลได้อีก ความเข้มข้นของ Filler สูงทำให้อนุภาคเข้าใกล้กันและกันมากขึ้น ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการชนกันสูงขึ้นภายใต้การเฉือน และทำให้เกิดการไหลไปรวมกัน สำหรับ Volumic Fraction ที่สูงมาก ๆ กลุ่มของการรวมตัวจะเริ่ม

สัมผัสกันและกันมากขึ้นเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่าย 3 มิติขึ้น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และวัสดุไม่ไหลได้อีก (มีพฤติกรรมเป็นของแข็ง)

2.2.1.3 ความทึบแสงและความขาว (Opacity and Whiteness)

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ให้เกิดการกระจายตัวของแสงที่มองเห็นออกไป โดยการกระจายของแสงนี้เป็นไปได้เพราะว่าผงสีขาวของ TiO_2 สามารถทำให้แสงเลี้ยวเบนออกไปได้โดยเมื่อแสงผ่านระหว่างหรือใกล้อนุภาคของผงสีขาวบางส่วนก็อาจจะถูกจับเอาไว้ แสงส่วนที่เหลือก็หักเหสะท้อนกระจายออกไป

จากความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของสีวัดได้โดยการแพร่กระจายของ TiO_2 ไปสู่เม็ดสีเข้มข้นตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยพบว่าตัวอย่างที่เติม TiO_2 จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวแข็งที่สุด

2.2.1.4 ความทึบแสงและความแข็งแรงของสี

ความทึบแสงและความแข็งแรงของสีที่เพิ่มขึ้นเมื่อให้เวลาในการกระจายมากขึ้นโดยการรวมตัวกันของผงสีก็ค่อยๆลดลงด้วยวิธีการใช้วัดการแพร่กระจายเป็นความสัมพันธ์แบบตรงกับคุณสมบัติที่ต้องการตัวอย่างเช่น การรวมตัวกันของอนุภาคหลายๆขนาดที่เกาะกลุ่มกันสามารถวัดได้โดยการใช้ Screenpack Test ความทึบแสงและความแข็งแรงของสีจะเป็นของคุณภาพการแพร่กระจาย

2.2.1.5 การแพร่กระจายของ TiO_2

ค่าของไททาเนียมไดออกไซด์จะดีที่สุดที่นำไปใช้ต่อเมื่อมีการแพร่กระจายที่ดีของอนุภาคของผงสีมักติดกันในระหว่างการผลิตและจัดเก็บผลก็คือเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากขึ้น มีหลากหลายเทคนิคที่สามารถใช้เพื่อลดเกาะตัวกันเหล่านี้เพื่อให้ได้ขนาดที่ ได้รับ ได้ราคาเหมาะสม

2.2.1.6 ความสามารถในการทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

ปฏิกิริยาทางแสงตามธรรมชาติของ TiO_2 อาจมีสาเหตุจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เป็นสารอินทรีย์เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์และสภาพแวดล้อม ผลที่ตามมาคือสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพ และการสูญเสียชั้นพื้นผิวที่เป็นสีขาวไป (เกิดการสูญเสียของ TiO_2 และเรซินที่แยกตัวออกมาซึ่งสามารถถูกลบออกจากผิวหน้าได้)

การปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมของชิ้นส่วนพลาสติกที่ใช้งานภายนอกทำได้โดยการเคลือบด้วยสารอินทรีย์อย่างอลูมิเนียม หรือซิลิกา บนผิวของ TiO_2 ซึ่งเป็นตัวกั้นระหว่าง TiO_2 และ เรซินให้เกิดการเสื่อมสภาพทางเคมีของแสงให้น้อยที่สุด และ TiO_2 ประเภทที่เคลือบผิวนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง

2.2.2 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน [29]

2.2.2.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของมันด้วย ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิวหรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายเซลล์ก็ถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านยับยั้งหรือต่อต้านการติดเชื้อ ไททาเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่า คลอรีน 3 เท่า และมากกว่า ไอโซน 1.5 เท่า

2.2.2.2 ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากไททาเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของ สารอินทรีย์ ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตัวอย่างเช่น กลิ่นบุหรี่ กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอรั่มอดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูรีน กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจาก ควันเกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงก๊าซอันตราย ด้วยสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

2.2.2.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควันบุหรี่ รวมถึงสารระเหยต่างๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่างๆ ที่เกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทั้งทางตรง และทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง บริเวณที่มีมลภาวะสูงไททาเนียมไดออกไซด์ จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

2.2.2.4 สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำ และคราบต่างๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติ การทำความสะอาดตัวเอง

ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทำด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสง จะทำให้ผนังมีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไททาเนียมไดออกไซด์ทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

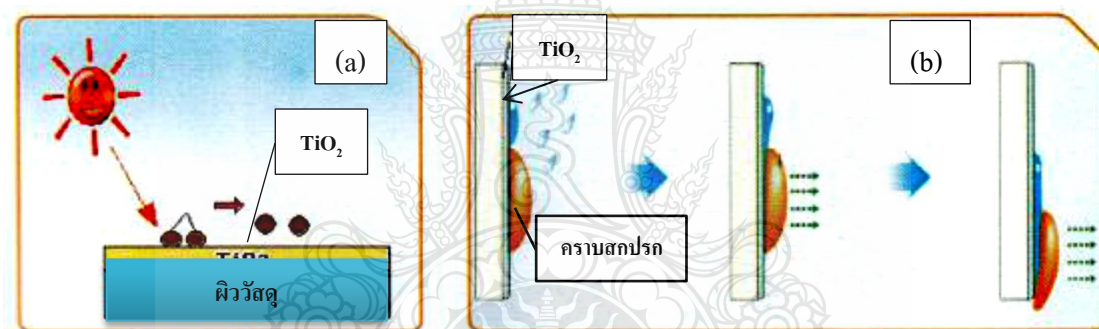
2.2.2.5 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

สารเร่งปฏิกิริยาดำแสง (ไททาเนียมไดออกไซด์) ร่วมกับรังสีอุลตราไวโอเลต สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมถึงมีสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูง ในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในขั้นตอนที่สองของ การบำบัดน้ำเสีย โครงการต้นแบบแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงนั้นมี ประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรีย *Escherichia Coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานของไททาเนียมไดออกไซด์ [30]

การนำอนุภาคหยาบของไททาเนียมไดออกไซด์ (อนุภาคขนาดใหญ่กว่า 200 nm) ถูก นำมาใช้งานส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้เป็นตัวให้สีขาว (White Pigment) แต่การลดขนาดของอนุภาค ไททาเนียมไดออกไซด์ลงมาเป็นอนุภาคในระดับนาโน (อนุภาคขนาดเล็กกว่า 100 nm) ทำให้การนำ ไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้นำมาใช้ประโยชน์มีความหลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะทางด้าน โฟโตแคทาไลซิส (Photocatalysis) เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลซิสขึ้นได้มากขึ้นเมื่อขนาด อนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์เล็กลง เช่น ใช้ในการรักษาสิ่งแวดล้อมของอากาศและน้ำ (Air and Water Purification) ใช้ในการกำจัดกลิ่นเหม็น กลิ่นไม่พึงประสงค์ (Deodorization) ใช้ใน การยัดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยสารละลายสารระเหยง่าย เช่น เอทิลีน ที่มีผลต่อการเน่าเสียของ ผลิตผลสด เช่น ผักและผลไม้สด นอกจากนี้ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการทำ ความสะอาดตนเอง (Self-Cleaning) (ภาพที่ 2.29) และสมบัติในการเป็นซูเปอร์ไฮโดรฟิลิก (Superhydrophilic) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง จึงนิยมนำไปใช้ในการเคลือบผิววัสดุและป้องกันการ เกิดฝ้าและหยดน้ำบริเวณบนแผ่นกระจก (Antifog) (ภาพที่ 2.30) สมบัติที่นำสนใจอีกอย่างของ ไททาเนียมไดออกไซด์คือสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคบนพื้นผิวด้วยตนเอง (Self-Disinfecting) ทำให้

ไททาเนียมไดออกไซด์นิยมนำมาใช้ในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สำหรับโรงพยาบาล ในอุตสาหกรรมอาหาร และในชีวิตประจำวัน เช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม สุขภัณฑ์ในห้องน้ำ เป็นต้น และเนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติที่เด่นในด้านการกันแสงและดูดกลืนแสงยูวีได้ดี ทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในเครื่องสำอางและครีมกันแดดเพื่อป้องกันผิวจากแสงยูวี ใช้ในการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันอันตรายจากแสงแดด เช่น ใช้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพหรือเสียหายของพลาสติกที่ใช้กลางแจ้ง โคมแสงแดดมาก ใช้เคลือบผิวขวดแก้ว เช่น ขวดเบียร์ ขวดไวน์ เพื่อป้องกันการเกิดเสื่อมสภาพของเครื่องดื่มภายในขวด ใช้ในการทำฟิล์มกันแสง ฟิล์มพลาสติกใสกันแสง ฟิล์มบางเคลือบกระจกอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อีก เช่น ใช้ในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบสีย้อมร่วมกับฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ (Dye-Sensitized Oxide Solar Cell) หรือใช้เป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) ในการวัดความเข้มข้นของก๊าซ เป็นต้น



ภาพที่ 2.29 สมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) (a)ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถสลายคราบสกปรกต่าง ๆ ได้ทำให้คราบสกปรกหลุดออกจากพื้นผิววัสดุได้ง่าย (b) เมื่อหยดน้ำตกลงบนผิวไททาเนียมไดออกไซด์ หยดน้ำจะเปลี่ยนเป็นแผ่นน้ำทำให้สามารถกำจัดคราบสกปรกให้หลุดออกจากผิววัสดุได้ง่าย [30]

ในประเทศไทยหน่วยงานระดับมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยของรัฐหลายแห่ง เช่น จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ฯลฯ มีความสนใจในการสังเคราะห์และนำไททาเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์ในการรักษาสภาพ

สิ่งแวดล้อมของอากาศและน้ำ บำบัดน้ำเสีย ใช้ในการผลิตพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ประโยชน์
ในทางการเกษตรและยืดอายุในการเก็บรักษาอาหาร และใช้ในผลิตภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน เช่น
เครื่องปรับอากาศ สุขภัณฑ์ห้องน้ำ เครื่องกรองอากาศ กระจกทำความสะอาดตัวเอง กระจกกันแสง
ชุดนักเรียน ภาชนะบรรจุอาหาร และครีมกันแดด เป็นต้น



ภาพที่ 2.30 สมบัติในการเป็นซูเปอร์ไฮโดรฟิลิกของไททานเนียมไดออกไซด์ เมื่อ
ไททานเนียมไดออกไซด์ถูกแสงหยดน้ำจะเปลี่ยนเป็นแผ่นน้ำเคลือบผิวกระจกอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ไม่
เกิดฝ้าบนแผ่นกระจก [30]

2.3 แร่อิลเมไนท์ (Ilmenite mineral) [31], [32]

ชื่อแร่ อิลเมไนท์ มาจากชื่อภูเขาอิลเมน (Ilmen) ในประเทศรัสเซีย แร่ประเภทเดียวกับ
อิลเมไนต์ คือแร่ไกคิลไคต์ (Geikielite : $MgTiO$) ซึ่งมาจากชื่อของ Archibald Geikie เป็นนักธรณีวิทยา
ชาวอังกฤษ กับแร่โพโรฟานไนต์ (Porophanite : $MnTiO$) มาจากภาษากรีกว่า Pyro หมายถึง Fire (ไฟ)
และ Phane หมายถึง Appear คือ เป็นแร่ที่มีสีทองราวกับไฟ อิลเมไนท์ เป็นแร่ที่มีความวาวคล้ายโลหะ
หรือกึ่งโลหะสีดำแบบเหล็ก (Iron-Black หรือ Steel-Gray) ซึ่งมีผลึกของโลหะไททานเนียมออกไซด์
(Titanium Oxide) ทำให้มีสมบัติทางแม่เหล็กโดยธรรมชาติ รูปผลึกระบบเฮกซะโกนาลผลึกมักจะเป็
นแผ่นหนาหรือเป็นชั้น ผลึก มักจะใกล้เคียงกับฮีมาไทต์ อาจพบเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนๆ กัน ปกติจะมีเนื้อ
สมานแน่น หรือเป็นมวลเมล็ดเท่าเม็ดทราย แข็ง 5.5 - 6 ถ.พ. 4.7 ความวาวคล้ายโลหะหรือกึ่งโลหะ
สีดำ แบบเหล็ก สีผงละเอียดดำหรือแดงน้ำตาล อาจมีคุณสมบัติแม่เหล็กได้สูง โดยไม่ต้องเผาให้ร้อน

เนื้ออับแสง (Opaque) สูตรเคมี Fe มี FeTiO_3 36.8% Ti 31.6% และ O 31.6% อัตราส่วน ระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์กับเหล็กแปรเปลี่ยนได้มาก ถ้ามีเหล็กออกไซด์ มากไปอาจเป็นเพราะมีฮีมาไทต์เป็นมลทิน แมกนีเซียมและ แมงกานีสอาจพบในอิลเมไนท์ เนื่องจากสามารถแทนที่เหล็กในแร่นี้ได้

มักเป็นผลึกแบนๆ มากและบางครั้งอาจเห็นหกเหลี่ยมได้ อิลเมไนท์ต่างจากฮีมาไทต์ตรงสีผงละเอียด และต่างจากแมกนีไทต์ตรงที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กอ่อนกว่า แต่ในกรณีที่แมกนีไทต์เกิดขึ้นอยู่ด้วยกัน ก็จำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยละลายผงป่นในกรดเกลือแล้วใส่ดีบุกได้ตะกอนสีม่วงอินเมไทต์ไม่หลอมตัว ถ้าเขามีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก เกิดเป็นตัวเคลือบในลักษณะเป็นชั้นหรือรูปเลนส์ในหินไนส์และ หินแปรชนิดอื่นๆ ได้พบในสายแร่หรือมวลสารที่เป็นผลการแยกตัวของหินหนืด มีส่วนสัมพันธ์กับแมกนีไทต์และเป็นแร่ไม่สำคัญ ในหินอัคนี ปนอยู่ในทรายร่วมกับแมกนีไทต์ รูไทล์ เซอร์คอน แลโมนาไซต์พบเสมอ ในแหล่งแร่ดีบุก

2.3.1 แหล่งที่พบแร่อิลเมไนท์

ในประเทศไทย ขนาดเล็กเท่าเม็ดทรายพบในแหล่งดีบุกต่างๆ ไป เช่นที่ จังหวัดกาญจนบุรี ประจวบคีรีขันธ์ พังงา ภูเก็ต ระนอง ตะกั่วป่า ฯลฯ สีคล้ายดีบุกจนทำให้เข้าใจผิดกันมาก พวกเขาเหมืองแร่ดีบุก มักเรียกว่า จี้แร่ (อามัง) ชนิดที่เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนๆ กัน พบในแหล่งพลอยที่จันทบุรี และตราด ต่างประเทศ พบมากที่ Kragero และ แหล่งอื่นๆ ในนอร์เวย์ ฟินแลนด์ ในลักษณะเป็นผลึกพบที่ Miask ในภูเขาอิลเมน สหพันธรัฐเซีย อินเดีย บราซิล มีการทำเหมืองจากทรายชายฝั่งเป็นปริมาณมาก

2.3.2 ประโยชน์ของแร่อิลเมไนท์

เป็นต้นกำเนิดให้ไททานเนียมไดออกไซด์ สารประกอบไททานเนียมออกไซด์นำมาใช้เป็นแม่สีเป็นจำนวนมากแทนแม่สีเก่าซึ่งเป็นสารประกอบตะกั่ว เนื่องจากมีสมบัติพิเศษ สามารถเป็นวัสดุในการสร้างเครื่องบินทั้งส่วน ที่เป็นโครงสร้างและเครื่องยนต์ อิลเมไนท์ไม่สามารถจะใช้เหมือนสินแร่เหล็กได้เพราะถลุงยาก แต่ของผสมอิลเมไนท์ แมกนีไทต์และอิลเมไนท์-ฮีมาไทต์ นำมาแยก ก็ได้ทั้งไททานเนียมไดออกไซด์และเหล็ก

2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Process) [33]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลถือเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่สำคัญสำหรับกระบวนการผลิตวัสดุขั้นสูง ซึ่งสามารถแปรรูปวัสดุเป็นวัสดุนาโนได้โดยง่ายและสามารถนำไปใช้ได้ในงานหลากหลายด้าน เช่น เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์, ตัวเร่งปฏิกิริยา, เซรามิกส์, เวชภัณฑ์ และอีกมากมาย

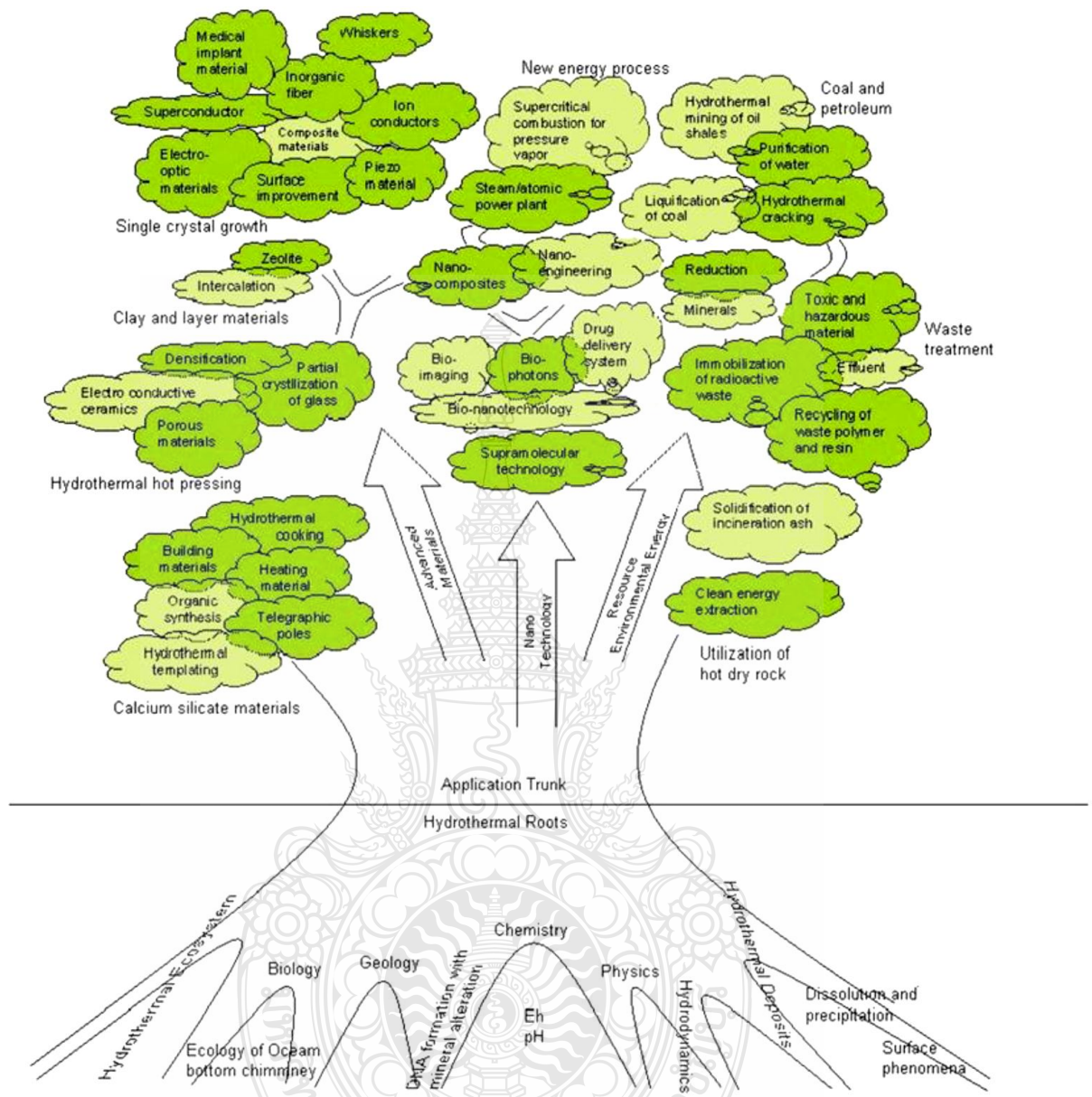
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไม่เพียงแต่จะช่วยให้กระบวนการผลิตมีการกระจายตัวที่แคบลงและมีความเป็นเนื้อเดียวกันในอนุภาคนาโนที่สูงแล้ว แต่ยังเป็นหนึ่งในเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการนาโนไฮบริดและนาโนคอมโพสิตอีกด้วย โดยหลักการที่สำคัญของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คือ การสังเคราะห์ผลึกสารประกอบด้วยสารละลายภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง

2.4.1 บทอธิบายทั่วไป

คำว่า “ไฮโดรเทอร์มอล” ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยนักธรณีวิทยาชาวอังกฤษที่ชื่อว่า เซอร์โรเจอร์ริค เมอร์ซัน เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันเพิ่มสูงขึ้นหลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของชั้นหินและแร่ธาตุต่างๆ คำว่า “ไฮโดร” แปลว่า น้ำ และคำว่า “เทอร์โม” แปลว่า ความร้อน ดังนั้นสามารถจำกัดความหมายของไฮโดรเทอร์มอล ได้ว่าเป็นปฏิกิริยาเคมีใดๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (ในน้ำหรือตัวทำละลายที่ไม่ใช่น้ำ) เหนืออุณหภูมิห้องและความดันสูงกว่า 1 บรรยากาศในระบบปิด

ในปัจจุบันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในเทคโนโลยีด้านต่างๆ มากมาย เช่น กระบวนการสังเคราะห์ กระบวนการเตรียมผลึกพิเศษหรือผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ กระบวนการแปรรูป กระบวนการเผา กระบวนการสลาย กระบวนการปรับความเสถียรของโครงสร้าง กระบวนการดึงน้ำออก กระบวนการแยก กระบวนการทรีทเมนต์ กระบวนการสมมูลเฟส กระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการไมโครเวฟ กระบวนการเคมีเชิงกล กระบวนการโซโนเคมี กระบวนการบีบอัดความร้อน กระบวนการกรอง และ กระบวนการกักคร่อน เป็นต้น

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นมีข้อดีมากมาย เช่น สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและสม่ำเสมอ ผลึกมีความสมมาตร ส่วนผสมอยู่ในช่วงเมตะสเตเบิล มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ สามารถใช้อุณหภูมิในการเผาที่ไม่สูงมากนัก เป็นกระบวนการผลิตที่ใช้เพียงขั้นตอนเดียว ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ใช้พลังงานต่ำ และเวลาในการทำปฏิกิริยานั้นก็รวดเร็วไม่นานมากนัก เป็นต้น



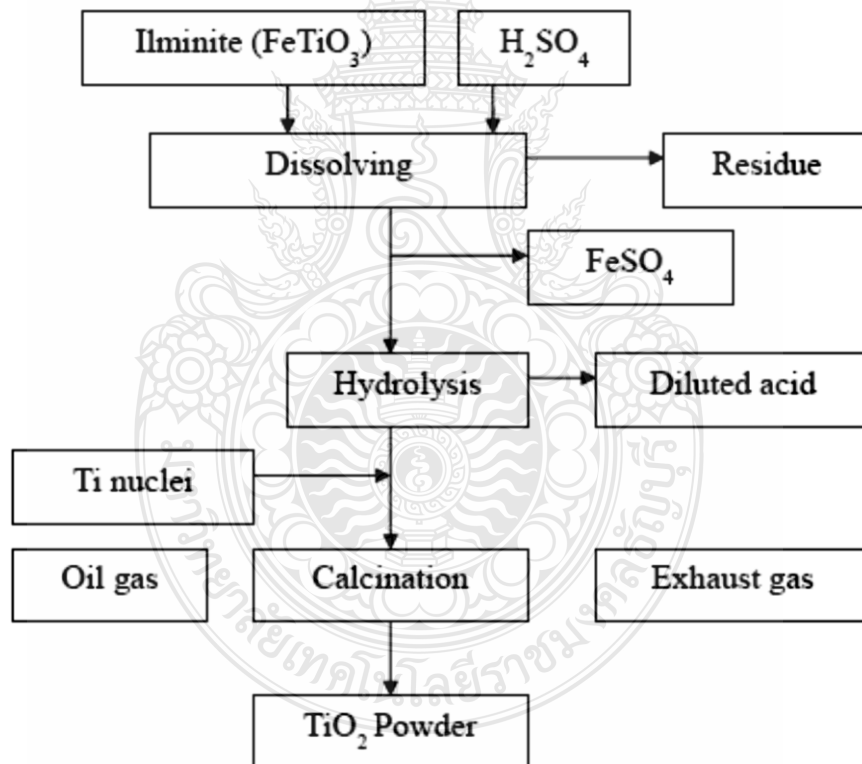
ภาพที่ 2.31 แผนภูมิต้นไม้แสดงกิ่งก้านความสัมพันธ์ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [33]

ในศตวรรษที่ 21 นั้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลได้พัฒนาและถูกนำมาใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย ซึ่งครอบคลุมไปในหลากหลายสาขา นอกจากกระบวนการต่างๆ ที่นำเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น ไมโครเวฟ อัลตราโซนิก เมคานิคัล และปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แล้วเทคนิคนี้ยังสามารถดัดแปลงขั้นตอนต่าง ๆ ลงมาได้มากถึง 3 - 4 ขั้นตอน ทำให้เทคนิคนี้มีค่ามหาศาลทางเศรษฐกิจ จากความต้องการที่มากขึ้นสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างระดับนาโน เทคนิคนี้จึงเป็นที่ต้องการ

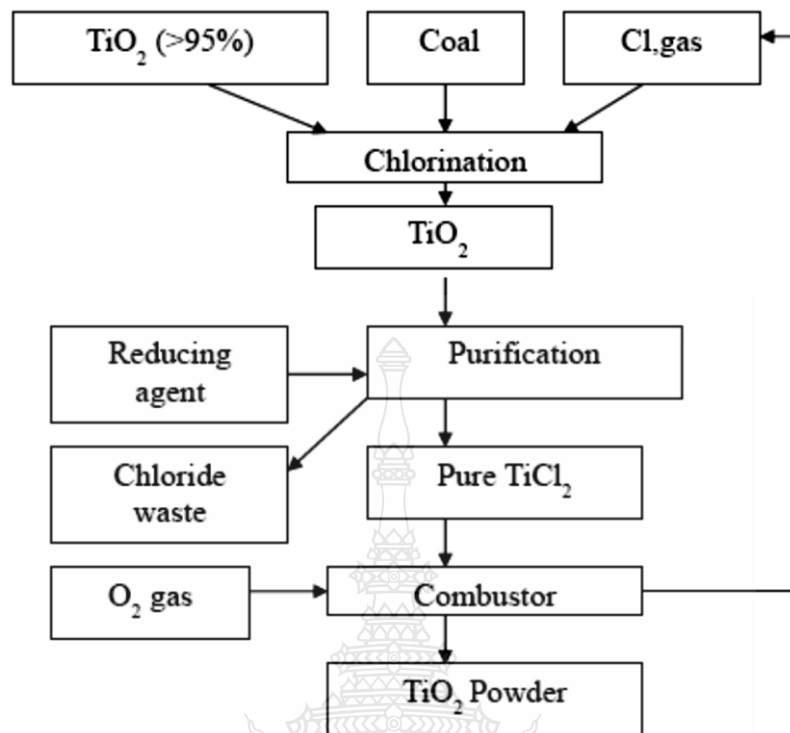
อย่างมากในเทคโนโลยีด้านต่างๆ เช่น ธรณี ฟิสิกส์ ชีววิทยา นาโนเทคโนโลยี และวัสดุศาสตร์ เป็นต้น ซึ่งใช้ศาสตร์ต่างๆ มาเกี่ยวข้องกันสำหรับกระบวนการที่ว่านี้

2.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลกับไททาเนียมไดออกไซด์ [34]

วัสดุไททาเนียมไดออกไซด์นั้นถือเป็นผงสีขาวเชิงพาณิชย์ เนื่องจากในตัวมันมีความสามารถในการกระเจิงแสงได้มาก, ไม่มีพิษ และเฉื่อยต่อสารเคมี มีกระบวนการมากมายในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยทั่วไปนั้นในระดับอุตสาหกรรมใช้กระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีที่เรียกว่า “กระบวนการซัลเฟต” และ “กระบวนการคลอไรด์” ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากมาก อีกทั้งยังต้องใช้วัสดุและเครื่องมือที่ทนทานมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1400 °C และยังต้องทนต่อการกัดกร่อนของคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย



ภาพที่ 2.32 กระบวนการซัลเฟต [34]



ภาพที่ 2.33 กระบวนการคลอรีน [34]

ข้อดีของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ [34]

1. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีผลึกที่เป็นเนื้อเดียวสูงและสามารถสังเคราะห์ได้โดยตรงที่อุณหภูมิไม่เกิน 250 °C เมื่อเทียบกับกระบวนการเผาแล้วกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถลดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคลงได้และมีความสม่ำเสมอของเฟสในผลึก
2. การเปลี่ยนแปลงสภาวะในการสังเคราะห์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เช่น อุณหภูมิ, ค่าความเป็นกรด-ด่าง, ความเข้มข้น และสัดส่วนโมลาร์ เป็นต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้าง, รูปร่าง และสัดส่วนของผลึกแตกต่างกันไป
3. ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
4. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นเรียบง่ายและสามารถควบคุมสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาได้โดยง่าย เช่น หม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave)

นักวิจัยจำนวนมากศึกษาเกี่ยวกับรายละเอียดของกระบวนการสังเคราะห์และอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, ระยะเวลาในการทดลอง, ความดัน, ชนิดของสารละลายและค่าความเป็นกรด-ด่าง

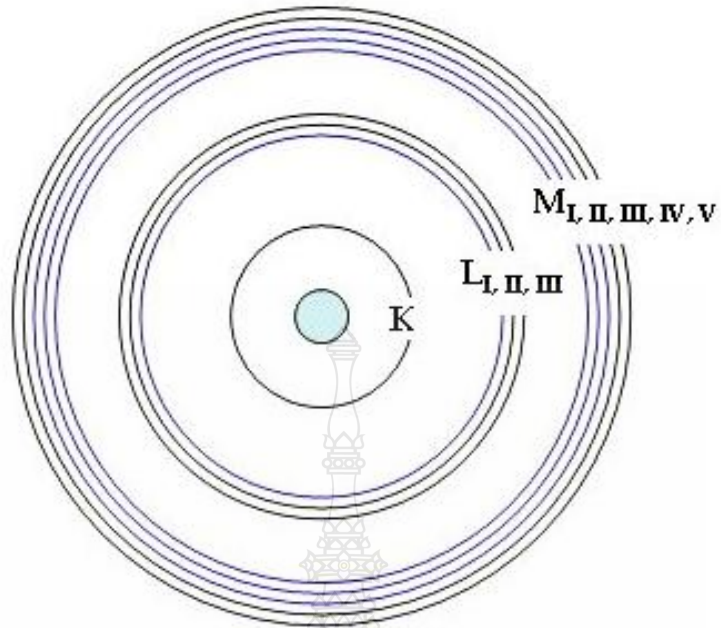
โดยทั่วไปการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์จะทำในหม้อหนึ่งความดันขนาดเล็กๆ สถานะในการสังเคราะห์อนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์จะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 200 °C ความดันน้อยกว่า 100 บาร์ ซึ่งอุณหภูมิและสภาวะดังกล่าวเหมาะในการใช้กับหม้อหนึ่งความดันชนิดเทพลอน ซึ่งจะช่วยให้ได้อนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียว ทั้งนี้ขนาดของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์นั้นเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งต้องการการกระจายตัวของขนาดที่แคบเพื่อนำไปใช้ในวัสดุงานต่างๆ โดยปัจจัยนี้จะมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนในช่องว่างอิเล็กตรอน ซึ่งถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กแล้วก็จะมีส่วนที่ผิวจำเพาะสูงทำให้ได้เปรียบในเรื่องนี้

2.5 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

2.5.1 เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) [35], [36]

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และการคายพลังงานออกมาในรูปแบบของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ

อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (Shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (Energy Level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ L_I, L_{II}, L_{III} และ $M_I, M_{II}, M_{III}, M_{IV}, M_V$ ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้ นิวเคลียสจะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น ดังตารางที่ 2.15 เมื่อยิงรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนหรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ ชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอมทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (Characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ

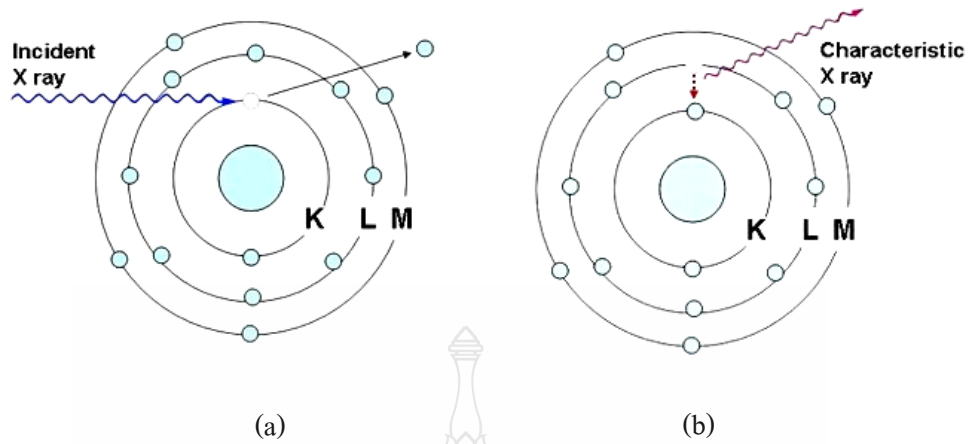


ภาพที่ 2.34 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น [36]

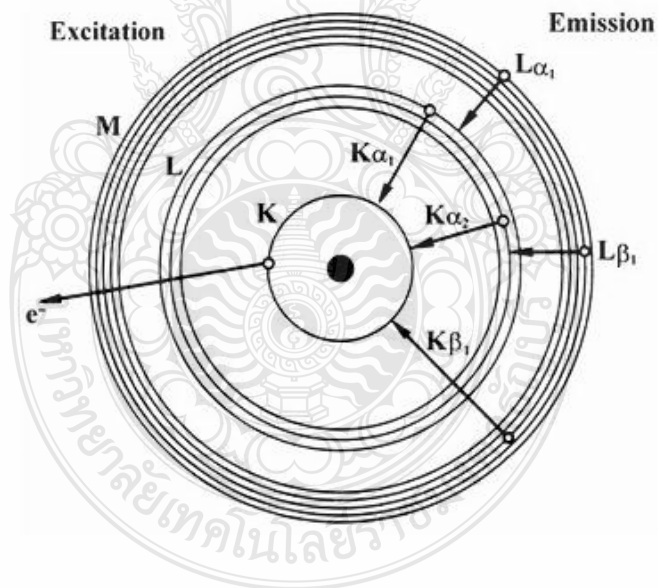
ตารางที่ 2.2 พลังงานยึดเหนี่ยวในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น [36]

ธาตุ	Z	KI	LI	LII	LIII	MI	MII	MIII
C	6	284.2						
Al	13	1559.6	117.8	72.95	72.55			
Si	14	1839	149.7	99.82	99.42			
K	19	3608.4	378.6	297.3	294.6	34.8	18.3	18.3
Ca	20	4038.5	438.4	349.7	346.2	44.3	25.4	25.4
Cu	29	8979	1096.7	952.3	932.7	122.5	77.3	75.1
Zn	30	9659	1196.2	1044.9	1021.8	139.8	91.4	88.6

รังสีเอกซ์จำเพาะ (Characteristic X-ray) ที่เกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นที่สูงกว่า ลงไปแทนที่ว่างในชั้น K เรียกว่า K radiation หรือ K X-ray และเรียกว่า L Radiation หรือ L X-ray ถ้าเป็นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอน ลงไปแทนที่ว่างในชั้น L โดยส่วนใหญ่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากวงโคจรเป็นอิเล็กตรอนในชั้น K ทำให้รังสีเอกซ์จำเพาะที่คายออกมา มีความเข้มของ K X-ray มากกว่า L X-ray



ภาพที่ 2.35 (a) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร (b) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา [36]



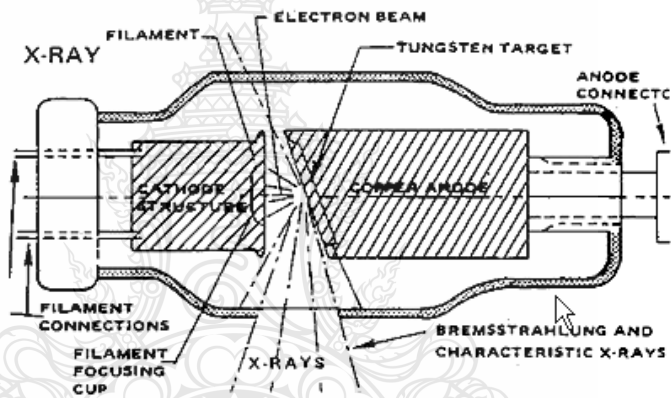
ภาพที่ 2.36 สัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์จำเพาะจากการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน [36]

การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่คายออกมา ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ Absorption Edge ของอิเล็กตรอนในชั้น K และชั้น L และค่าของพลังงานรังสีเอกซ์จำเพาะของแต่ละธาตุ

ตารางที่ 2.3 แอปซอร์บชันเอจ (Absorption Edge) และพลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ (keV) ของธาตุ

Element	Z	Kabs	K α 1	K β 1	L-IIIabs	L α 1	L β 1
F	9	0.687	0.677				
Na	11	1.072	1.041	1.067			
Mg	12	1.305	1.253	1.295			
Al	13	1.559	1.486	1.553			
Si	14	1.838	1.740	1.829			
P	15	2.142	2.013	2.136			
S	16	2.472	2.307	2.464			
Cl	17	2.822	2.622				
Ar	18	3.202	2.957	3.190			
K	19	3.607	3.313	3.589			
Ca	20	4.038	3.691	4.012	0.346	0.341	0.345
Sc	21	4.496	4.090	4.460	0.403	0.395	0.400
Ti	22	4.965	4.510	4.931	0.454	0.452	0.458
V	23	5.465	4.951	5.426	0.513	0.511	0.519
Cr	24	5.989	5.414	5.946	0.574	0.573	0.583
Mn	25	6.540	5.898	6.489	0.641	0.637	0.649
Fe	26	7.112	6.403	7.057	0.709	0.705	0.718
Co	27	7.709	6.929	7.648	0.779	0.776	0.791
Ni	28	8.333	7.477	8.263	0.855	0.851	0.869
Cu	29	8.979	8.046	8.904	0.932	0.930	0.950
Zn	30	9.659	8.637	9.570	1.021	1.012	1.034

การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยทั่วไป ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงจากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) หรือไอโซโทปรังสี (Radioisotope) ที่ให้รังสีเอกซ์ หลอดรังสีเอกซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (Filament) ที่เป็นแคโทด (Cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (Anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (High Voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W, Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป ทำให้เกิดความร้อนที่แคโทดและมีอิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (Target) และปล่อยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง หรือเบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung) ออกมา โดยมีความเข้ม (I) แปรผันตามกระแสไฟฟ้า (i) ศักย์ไฟฟ้า (V) และเลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำแอโนด

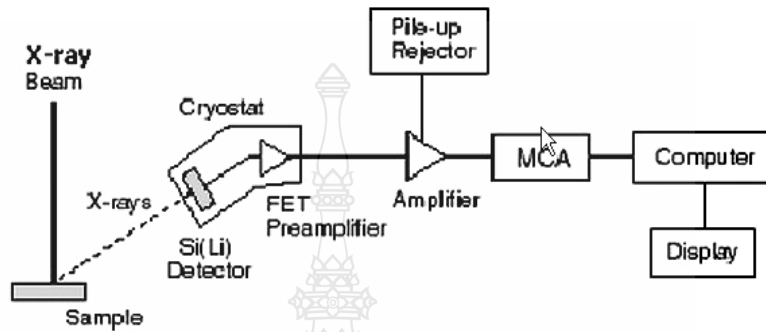


ภาพที่ 2.37 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ [36]



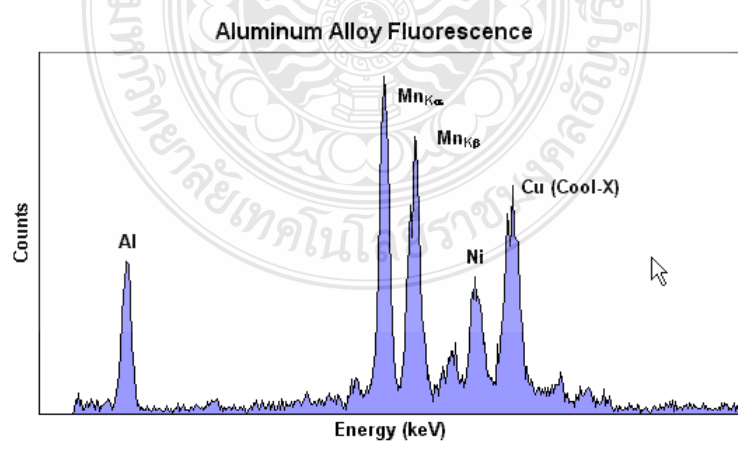
ภาพที่ 2.38 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปรังสี [36]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์โดยทั่วไป ประกอบด้วยหัววัดรังสี (Detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (Preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (Amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (Multichannel Analyzer) หรือ MCA ประกอบกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 2.39



ภาพที่ 2.39 การจัดต่อประกอบอุปกรณ์การวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [36]

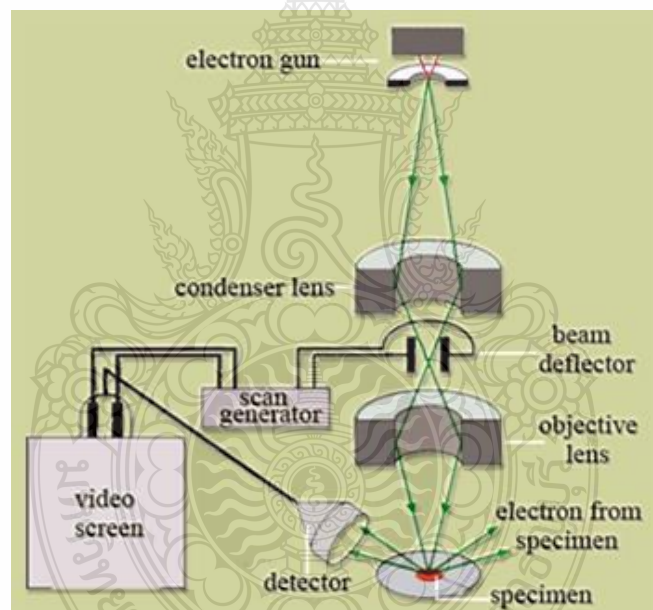
รังสีเอกซ์พลังงานสูงจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไอโซโทปหรือหลอดรังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบตัวอย่าง ทำให้ธาตุที่อยู่ภายในตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์จำเพาะของแต่ละธาตุออกมาซึ่งแสดงผลการวัดเป็นแถบพลังงาน หรือสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2.40 ตำแหน่งที่แสดงผลการวัดรังสีเอกซ์ของแต่ละธาตุ เรียกว่า โฟโตพีค (Photopeak) ซึ่งมีพื้นที่ของพีค (Peak Area) เป็นค่านับวัด (Count) ของรังสีเอกซ์ ที่มีค่าแปรผันตามปริมาณธาตุในตัวอย่าง



ภาพที่ 2.40 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จำเพาะของธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียม [36]

2.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) [37]

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM แสดงดังภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM [37]

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) สำหรับทั้ง SEM และ TEM ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมากโดยตัววัสดุที่นำมาสร้างเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนต้องมีเสถียรภาพและภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดเล็กๆ ในปัจจุบันสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนได้เป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ ลวดทังสเตน (Tungsten Filament) ฟิล์ม LaB₆ (Lanthanum Hexaboride Crystal) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบโคลด์

ฟิลด์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) และแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบช็อตฟิลด์ อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source)

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบลวดทั้งสแตน เป็นที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศที่พิเศษมากนัก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนผลึก LaB_6 สามารถให้ “ความสว่าง (Brightness)” สูงกว่าลวดทั้งสแตนประมาณ 10 เท่า มีอายุยาวนานกว่า แต่มีราคาสูงกว่า และต้องการสภาพสุญญากาศที่พิเศษกว่าด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบโคลด์ฟิลด์ อิมิชชัน สามารถให้ความสว่างสูงมากเพราะใช้หลักการการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (Quantum Tunneling) ในขณะที่แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบลวดทั้งสแตนและแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนผลึก LaB_6 ใช้ในการเทอร์มิออนิก อิมิชชัน (Thermionic Emission) ซึ่งในการใช้งานให้ความร้อนกับลวด และใช้ความต่างศักย์ดึงให้อิเล็กตรอนออกมาจากบริเวณปลายแหลมส่วนแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบช็อตฟิลด์ อิมิชชัน ใช้หลักการฟิลด์ อิมิชชันเช่นเดียวกัน แตกต่างจากแบบโคลด์ฟิลด์ อิมิชชัน ตรงที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800 K และทำการเคลือบ ZnO บนระนาบผิวก (100) ของทั้งสแตน ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบต่างๆ

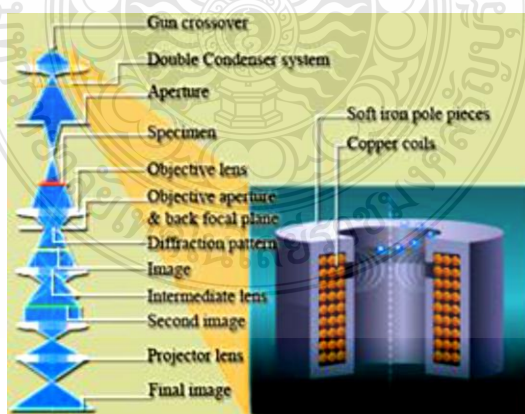
ตารางที่ 2.4 ลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบต่าง ๆ ที่ความต่างศักย์เร่ง 20 kV [38]

Source	Normalized Brightness ($\text{A}/\text{cm}^2\text{-sr}$)	Lifetime (h)	Source size (nm)	Energy spread E (eV)	Beam Current Stability
Tungsten	10^4	200	15,000	1.5-2.5	1%
LaB_6	10^5	1000	5,000	1.3-2.5	1%
Cold FE, W(31o)	2×10^7	2000	2.5 nm	0.3-0.7	5%
Shottky FE, ZrO/W (100)	10^7	2000	2.5 nm	0.5-0.7	1%

2.5.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบผ่าน (Transmission Electron Microscopy) [39]

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษ เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนั่นเอง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 nm)

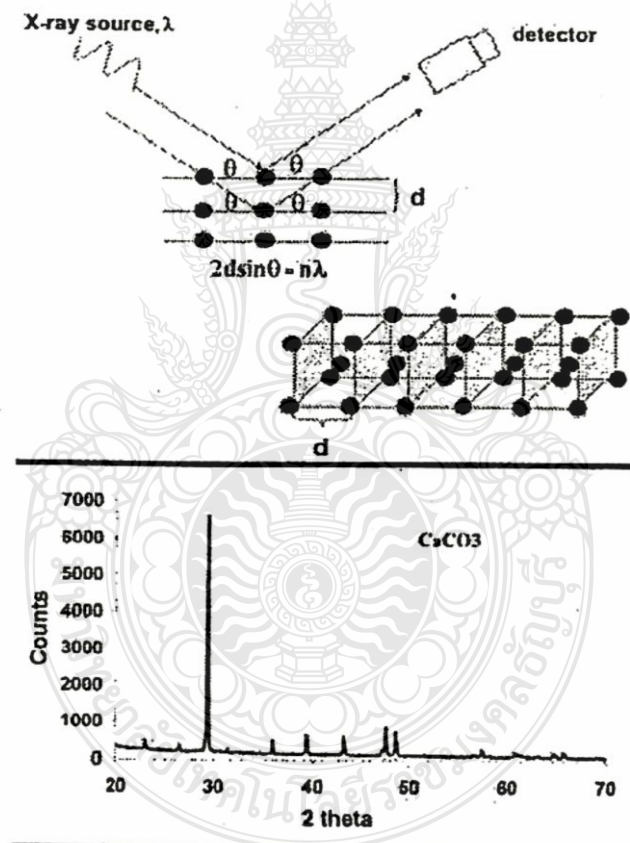
หลักการทำงานของเครื่อง TEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่จะศึกษา (Specimen) ไปซึ่งตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก (บ่อยครั้งที่พบว่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 nm) จากนั้นจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไป และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอรับ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายเกิดการ สร้างภาพขึ้นมาได้ ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM แสดงดังภาพที่ 2.42



ภาพที่ 2.42 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง TEM [39]

2.5.4 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) [40]

เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ จากหลักการเบื้องต้นในปี ค.ศ. 1912 นาย W. L. Bragg ได้นำมาทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นในปี 1948 และพัฒนามาเรื่อยๆจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วอย่างแม่นยำยิ่งขึ้น หลักการทำงานของเครื่อง XRD แสดงดังภาพที่ 2.43



ภาพที่ 2.43 หลักการทำงานของเครื่อง XRD [40]

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและแร่ ทำให้นักวิทยาศาสตร์กลุ่มนี้ สามารถแยกแยะประเภท และชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติ ว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบ โครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วยขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD Pattern) เฉพาะตัวเปรียบ เช่นเดียวกับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เหล็ก สูตรทางเคมีคือ Fe แต่มีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ เช่น Body Center Cubic (BCC), Face Center Cubic (FCC) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าเหล็กตัวอย่างมีโครงสร้างแบบใด

2.5.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer) [41]

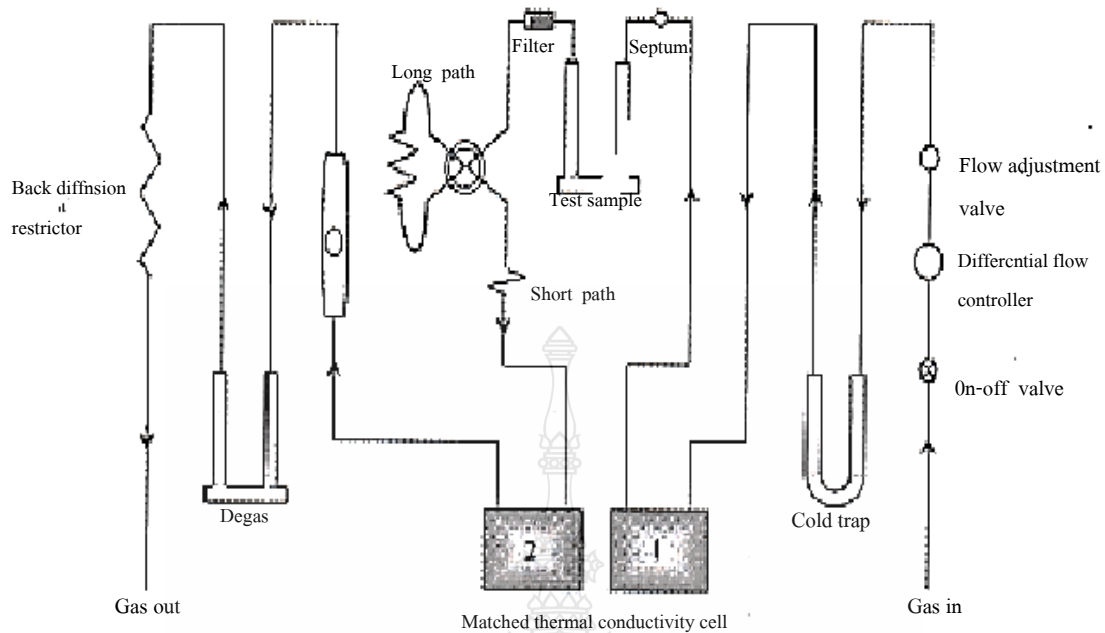
พื้นที่ผิว (Surface Area) ของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำสารนั้น ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือตามที่มีมาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีที่กล่าวในที่นี้อาศัยการวัดจากปริมาตรแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับ (Adsorb) บนผิวของสาร แล้วนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ของสารต่อไป



ภาพที่ 2.44 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer) [41]

บรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E., BET) ได้ศึกษาการดูดซับ (Adsorption) ก๊าซไนโตรเจนบนผิวของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) พบว่าก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) และในขณะเดียวกันก๊าซไนโตรเจนส่วนที่เหลือเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น

การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก๊าซในขณะที่ก๊าซมีการเคลื่อนที่ (Dynamic Analysis) โดยก๊าซที่เป็นตัวดูดซับ (ก๊าซไนโตรเจน) ถูกผสมกับก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) (ก๊าซฮีเลียม) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมและในการตรวจวัดหาปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารจะอาศัยความแตกต่างของสมบัติด้านการนำความร้อนของก๊าซแต่ละชนิด ทั้งนี้เพราะปริมาณการนำความร้อนของก๊าซแปรผันโดยตรงกับปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน (Thermal Conductivity Cell, TCD) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้



ภาพที่ 2.45 หลักการทำงานของเครื่องวัดพื้นที่ผิวรุ่น Flow Sorb II 2300 [41]

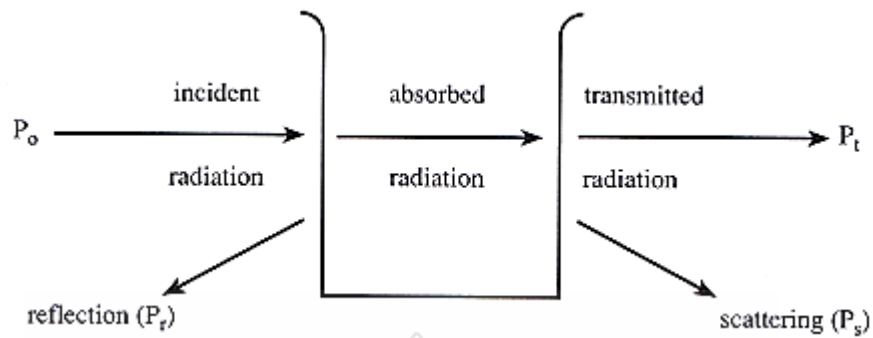
จากภาพที่ 2.45 ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซฮีเลียมถูกผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมตามที่ต้องการโดยเครื่องควบคุมการไหลของก๊าซ ก๊าซผสมที่ได้ไหลผ่านโคลแทร์พ (Cold Trap) ที่หล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว เพื่อให้สิ่งปนเปื้อนหรือก๊าซอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการควบแน่นอยู่ในหลอดแก้วโคลแทร์พนี้ ส่วนก๊าซที่ผ่านเข้าไปในระบบเป็นก๊าซไนโตรเจนและก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์เท่านั้น ซึ่งก๊าซผสมนี้ถูกส่งผ่านไปยังขั้วเซลล์นำความร้อนด้านขวา (1) ผ่านหลอดใส่สารตัวอย่าง (2) หลังจากนั้นผ่านตัววัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow Meter) แล้วไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก ณ อุณหภูมิห้อง โดยที่ก๊าซไนโตรเจนยังไม่มี การดูดซับบนผิวของสารตัวอย่าง เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนมีอุณหภูมิไม่ต่ำพอที่จะถูกดูดซับบนผิวของสารหรือมีน้อยมากจนทำให้ไม่สามารถวัดความแตกต่างของปริมาณการนำความร้อนระหว่างเซลล์นำความร้อนทั้งสองได้ ดังนั้นปริมาณการนำความร้อนของก๊าซไนโตรเจนในเซลล์นำความร้อนด้านขวา จึงเท่ากับเซลล์นำความร้อนด้านซ้าย และถือว่าเป็น “สภาวะเส้นฐาน” (Base Line) เมื่อเริ่มทำการวิเคราะห์ใช้ก๊าซไนโตรเจนเหลวหล่อหลอดใส่สารตัวอย่างซึ่งขณะนี้สารตัวอย่างจะอยู่ภายใต้ อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (ประมาณ 77 K หรือ -196°C) ก๊าซไนโตรเจนในก๊าซผสมควบแน่นแล้วถูกดูดซับลงบนผิวของสารตัวอย่าง โดยที่ก๊าซฮีเลียมไม่มีการควบแน่น ทำให้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ไหลผ่านมายังเซลล์นำความร้อนด้านซ้ายน้อยกว่าเซลล์นำความร้อนด้านขวา จนกระทั่งก๊าซไนโตรเจนถูกดูดซับครอบคลุมทั่วผิวของสาร

ตัวอย่างแล้ว ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่เซลล์นำความร้อนด้านซ้าย จึงกลับสู่สถานะเสถียร ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า “การดูดซับ” หลังจากนั้นทำการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันผลการวัดปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารตัวอย่าง โดยนำภาชนะบรรจุไนโตรเจนเหลวออกจากหลอดใส่สารตัวอย่าง เพื่อให้อุณหภูมิของสารตัวอย่างสูงขึ้นและกลับสู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วในขณะเดียวกัน ก๊าซไนโตรเจนที่ควบแน่นและถูกดูดซับอยู่บนผิวของสารตัวอย่างก็จะกลับคืนสู่สถานะก๊าซอย่างรวดเร็วเช่นกัน ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนส่วนนี้จะไหลผ่านไปยังเซลล์นำความร้อนด้านซ้าย ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณการนำความร้อนระหว่างเซลล์นำความร้อนทั้งสองอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อเวลาผ่านไปสัญญาณก็กลับสู่สถานะเสถียรดังเดิม ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า “การคาย” (Desorption) สัญญาณที่ได้จากขั้นตอนการคายนี้มีความคมชัดกว่าสัญญาณในขั้นตอนของการดูดซับ ดังนั้นจึงมักนำข้อมูลจากขั้นตอนการคายนี้ไปประมวลผลเพื่อหาปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารตัวอย่าง

2.5.6 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทสโคปี (Ultraviolet-Visible Spectroscopy) [42]

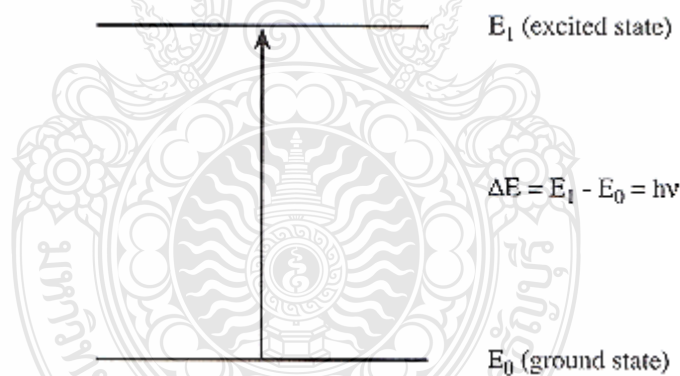
การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 nm ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่ได้แก่พวกสารอินทรีย์ (Organic Compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic Compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความเที่ยงและแม่นยำ และมีสภาพไวสูง (Sensitivity) โดยอาจทำการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้แต่ในกรณีที่น่าจะใช้พิสูจน์ว่าสารตัวอย่างนั้นเป็นสารอะไรมีโครงสร้างอย่างไร อาจต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้าช่วยด้วยเพื่อให้เกิดความแน่ใจเช่น ใช้เทคนิคทาง IR หรือ NMR Spectroscopy เป็นต้น

เทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (ความยาวคลื่น 100 - 380 nm) และช่วงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 380 - 700 nm) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์ โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสง เริ่มจากเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็สามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ (ดังภาพที่ 2.46) ข้อมูลที่ได้จากช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และช่วงที่ตามองเห็น (Visible) นั้นอาจใช้ในการช่วยยืนยันข้อมูลที่ได้จากช่วงอินฟราเรด (Infrared, IR) หรือข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่น ที่ต่างกันแต่ไม่สามารถใช้ระบุชนิดของสารได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นเทคนิคนี้ในการใช้เกือบทั้งหมดถูกใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ในการหาปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่างต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลาย



ภาพที่ 2.46 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง [42]

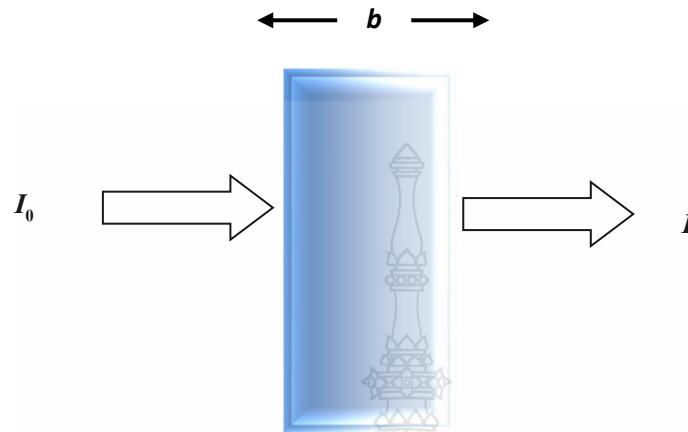
ถ้าให้แสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือ เกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า Absorption Spectrum พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ดังแสดงในภาพที่ 2.47



ภาพที่ 2.47 แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้น [42]

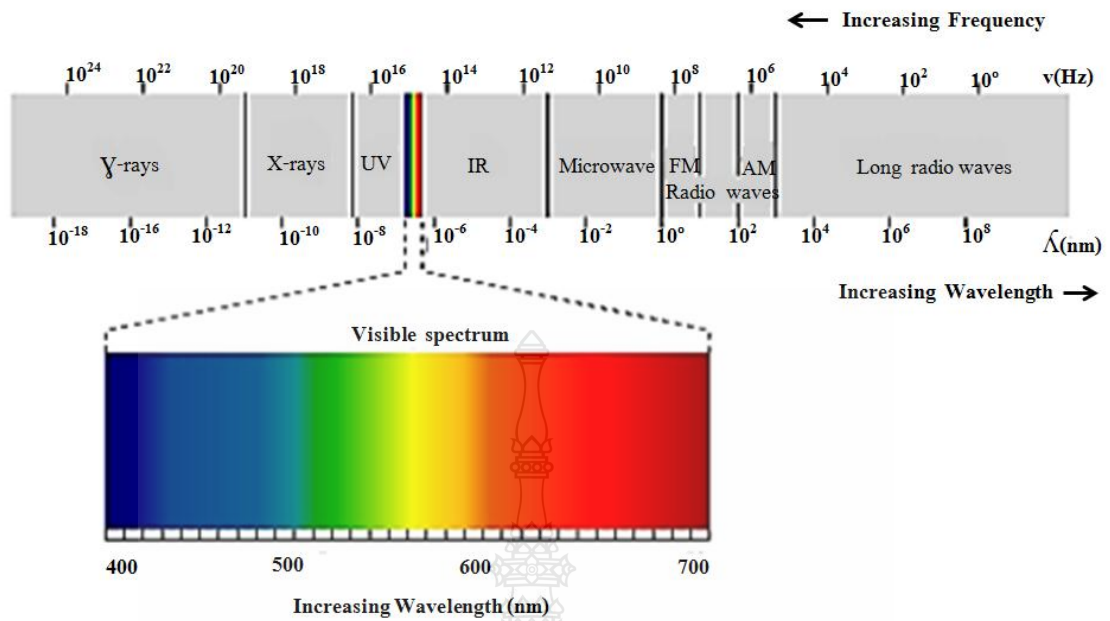
การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ เบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กฎของเบียร์ ซึ่งมีใจความดังนี้ “สัดส่วนของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน จะเป็น Exponential Function ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดกลืนรังสีและความยาวของเส้นทางที่รังสีผ่านสารตัวอย่าง” หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านลำแสงที่มีความเข้ม I_0 ไปยังเนื้อสารที่มีความหนา b cm โฟตอนของคลื่นแสงเกิดอันตรกิริยา

กับอะตอมหรือโมเลกุลของสาร (ดังภาพที่ 2.48) ทำให้ความเข้มของคลื่นแสงลดลงจาก I_0 เป็น I (I เป็นพลังงานของคลื่นแสงที่เหลือออกมา)



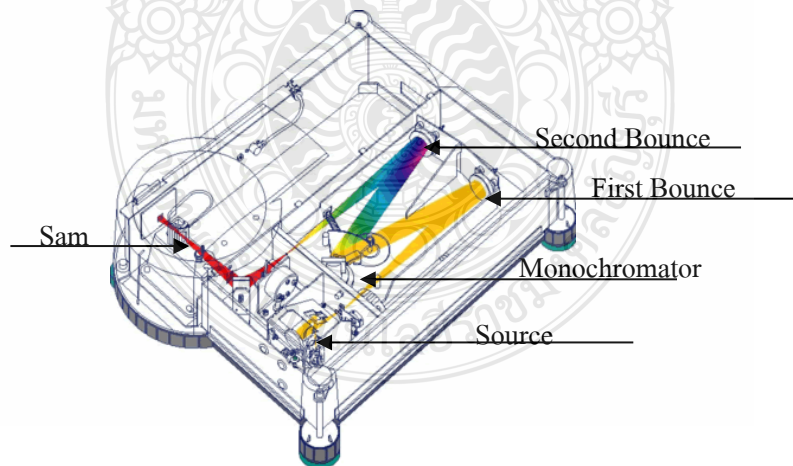
ภาพที่ 2.48 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงกับโมเลกุลของสาร [42]

UV-VIS Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้เลื่อนระดับชั้นพลังงานจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น (Electronic Transition) เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์การกระตุ้นของอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งจึงเรียก UV-VIS Spectroscopy ว่า Electronic Spectroscopy ปกติช่วง UV มีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดยเครื่อง UV Spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200-380 nm ซึ่งเรียกว่า “Near-Ultraviolet Region” ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm อากาศดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ จึงต้องวัดสเปกตรัมภายใต้สุญญากาศเราจึงเรียกความยาวคลื่นของ UV ในช่วงนี้ว่า “Vacuum-Ultraviolet Region” ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเรียกว่า “Visible Region” เป็นสเปกตรัมในช่วงประมาณ 380 - 780 nm ซึ่งปรากฏเป็นสีต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.49



ภาพที่ 2.49 แสดง Electromagnetic Spectrum [42]

UV-VIS Spectrophotometer มีอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอยู่หลายอย่างดัง
แสดงในภาพที่ 2.50



ภาพที่ 2.50 แสดงโครงสร้างของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer [42]

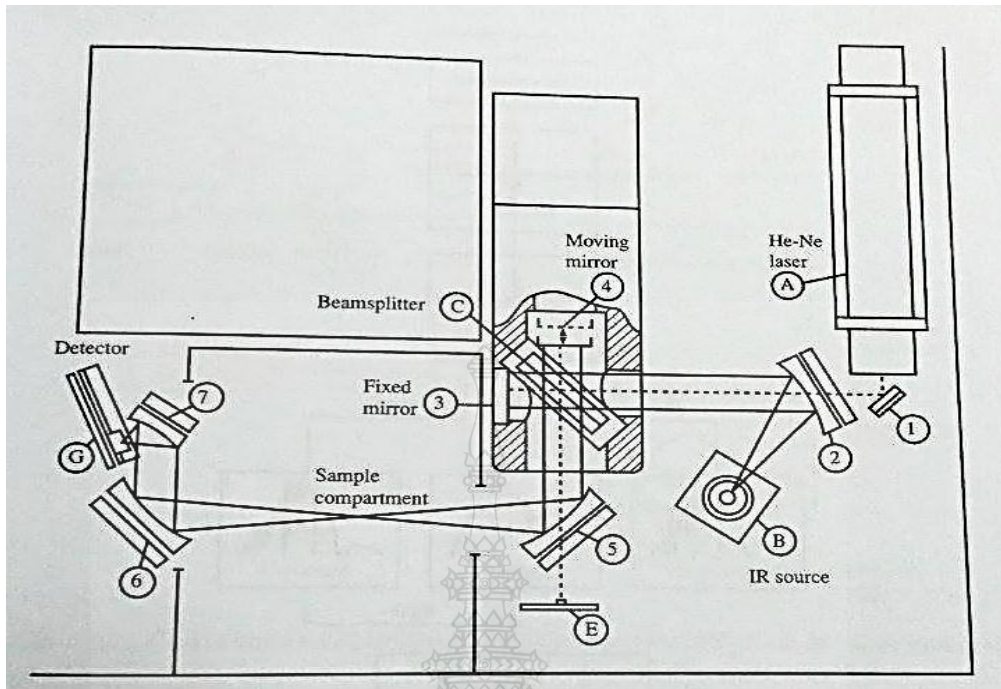
2.5.6 เครื่องฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) [42]

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกสารประกอบประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสม ตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

Infrared (IR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopic ทั่วๆ ไปที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และ เคมีอนินทรีย์ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะทางเคมี หรืออาจเรียกได้ว่าเป็น ลายพิมพ์ตัวโมเลกุล

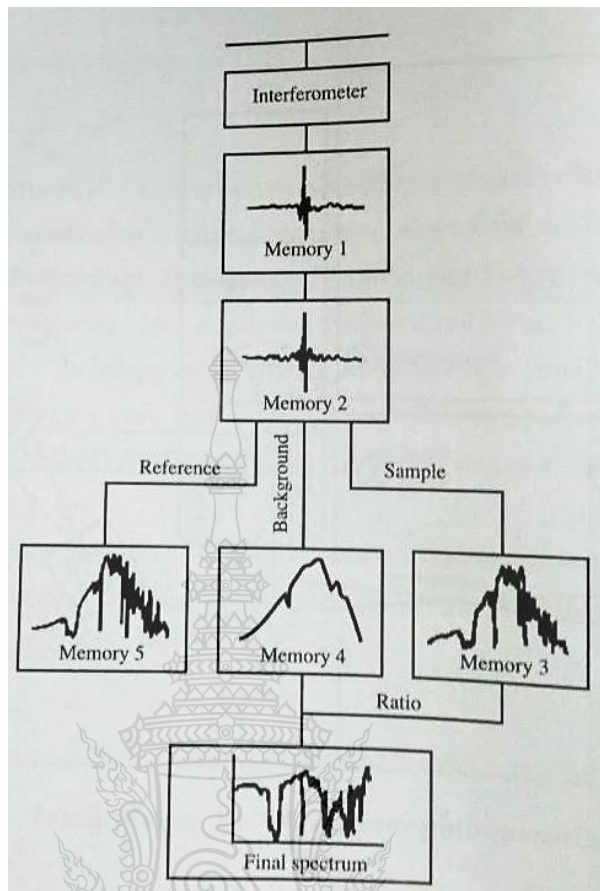
ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกต ได้มีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยมีค่าลดลง เพราะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด

หลักการทำงานของเครื่อง FTIR Spectroscopy มีส่วนประกอบที่สำคัญดังแสดงในภาพที่ 2.51 เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่ จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด (B) ถูกส่งผ่านเข้าไปยังอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ ลำแสงถูกแบ่งเป็นสองส่วนที่ Beamsplitter (C) ลำแสงครึ่งหนึ่งผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ (3) และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ (4) เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาอยู่ที่ Beamsplitter จะเกิดการสอดแทรกแบบเสริมกันหรือหักล้างกันของแต่ละความยาวคลื่นซึ่งจะขึ้นกับค่าของ Retardation และเมื่อแสงผ่านสารตัวอย่าง ไปยังตัววัดสัญญาณ (G) ที่อ่านทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงการแสกนของกระจก โดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่โดยสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณ (E) ที่เกิดจากหลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่เรียกกันว่า Internal Reference Lasers (A)



ภาพที่ 2.51 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR Spectroscopy [42]

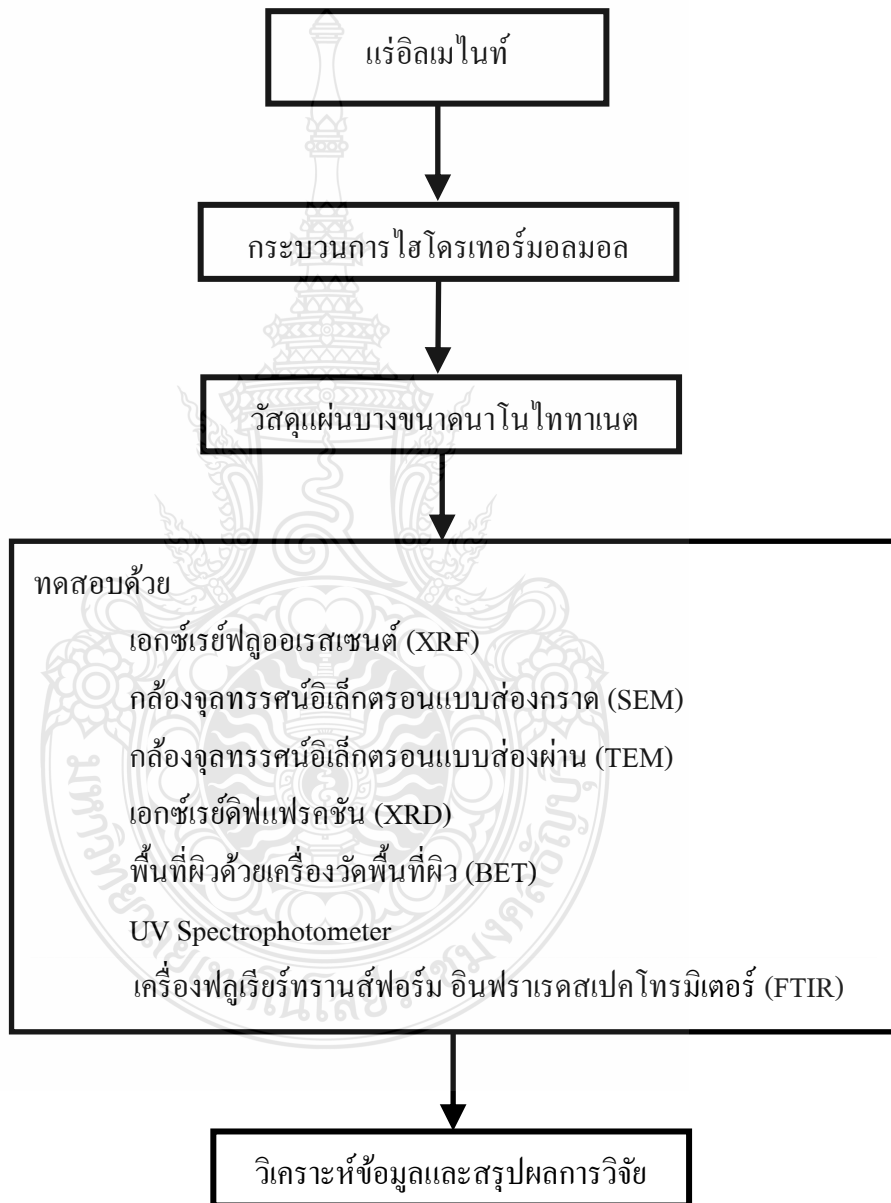
สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณ (G) อ่านได้จะอยู่ในรูปของอินเทอร์เฟอโรแกรมถูกเก็บไว้ใน (Memory 1) ดังแสดงในภาพที่ 2.52 ข้อมูลใน Memory 1 จะถูกนำไปเฉลี่ยรวมกับข้อมูลที่ได้จากการสแกนในครั้งที่ 2 และเก็บใน Memory 2 จะเกิดทำนองเดียวกันจนครบจำนวนสแกนที่เลือกไว้จะได้ข้อมูลเฉลี่ยรวมของสารตัวอย่างและถูกเปลี่ยนเป็นข้อมูลความถี่โดยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเมชันได้ Single Beam Spectrum ของตัวอย่างเก็บใน Memory 3 เมื่อนำไปทำอัตราส่วนกับข้อมูล Single Beam Spectrum ของ Background ใน Memory 4 จะได้ Double Beam Spectrum ของสเปกตรัมสารตัวอย่าง ส่วน Memory 5 จะเป็นกรณีที่ต้องใช้การหักลบสเปกตรัม



ภาพที่ 2.52 แสดงไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานของอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ [42]

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

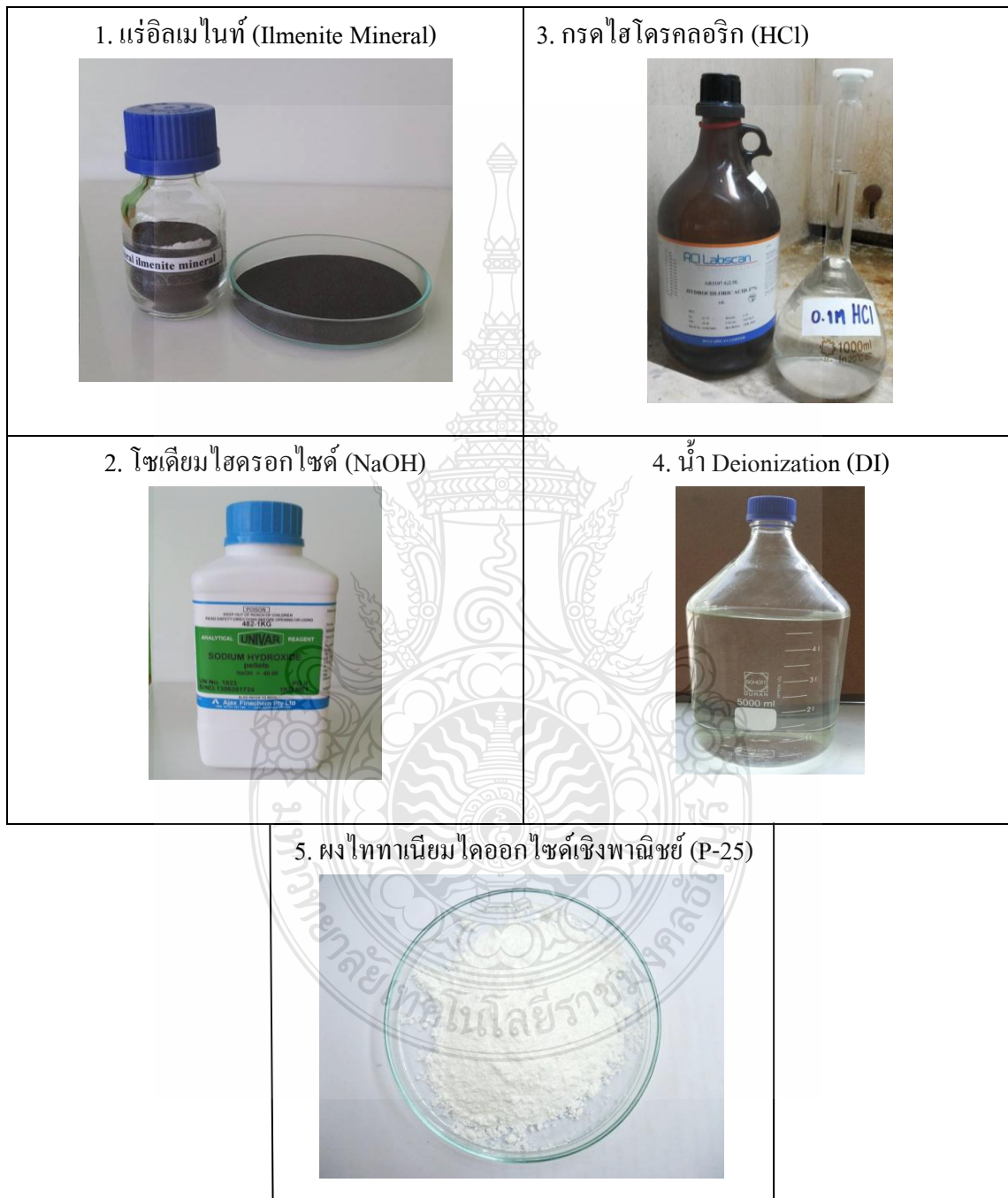
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมี



ภาพที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 เครื่องมือ อุปกรณ์

3.2.2.1 ถังปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ ออกแบบและสร้างโดยภาควิศวกรรมวัสดุ
และโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



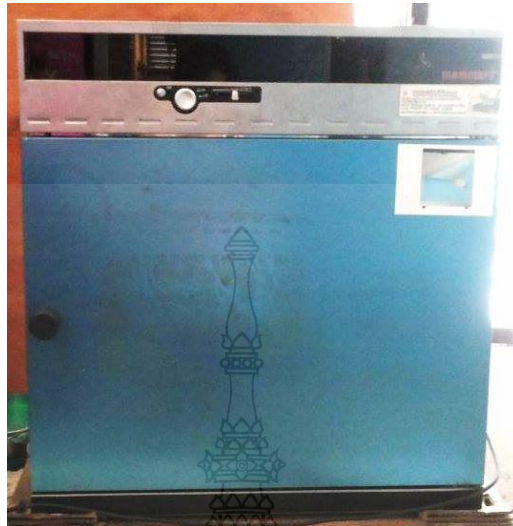
ภาพที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ

3.2.2.2 ชุดกรองสุญญากาศ



ภาพที่ 3.4 ชุดกรองสุญญากาศ

3.2.2.3 ตู้อบสารเคมี



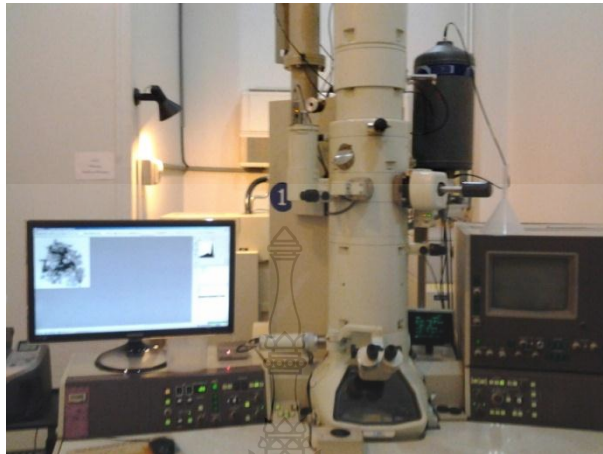
ภาพที่ 3.5 ตู้อบสารเคมี

3.2.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JEOL, JSM-6510)



ภาพที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM) (JEOL, JEM-2010)



ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.2.2.6 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (PANalytical, X'Pert PRO MPD)



ภาพที่ 3.8 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

3.2.2.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET (The Brunauer-Emmett-Teller)

(Rubotherm, BELSORP-Mini)

3.2.2.8 เครื่อง UV Spectrophotometer (Thermal Scientific, Genesys 20)



ภาพที่ 3.9 เครื่อง UV Spectrophotometer

3.2.2.9 แหล่งกำเนิดแสง UV, Fluorescent

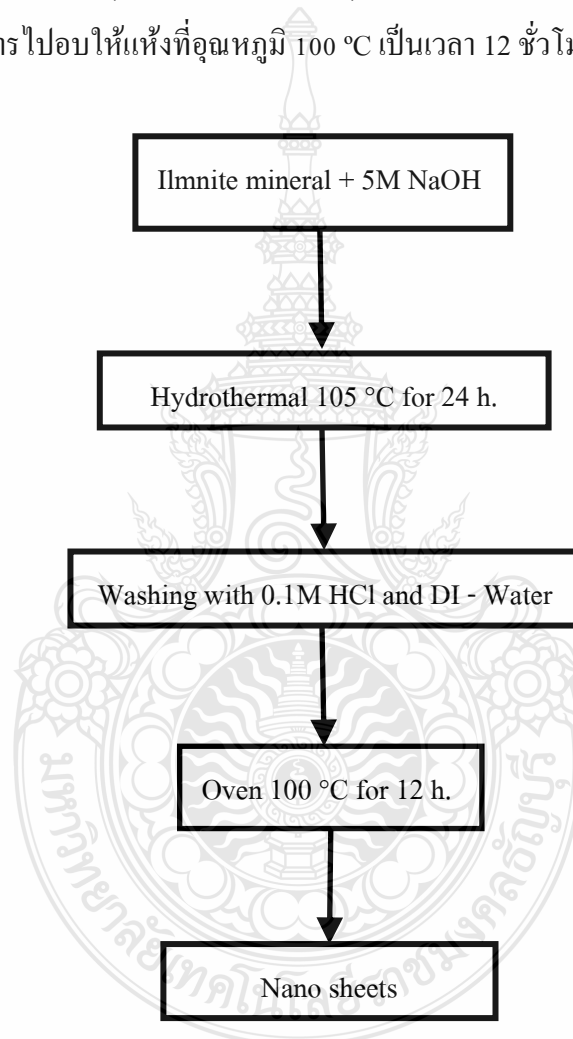
3.2.2.10 ฟิล์มป้องกันแสง UV

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์วัสดุแผ่นบางนาโนจากวัสดุราคาถูก (แร่โอลิเมนไทท์) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

การสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทท์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่มีพื้นฐานคล้ายกับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนจากแร่รูไทล์ โดยแร่โอลิเมนไทท์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 100-250 μm ปริมาณ 16 g ผสมลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 M ปริมาตร 1000 ml จากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที หลังจาก

กวนสารเสร็จแล้วจึงนำสารละลายไปใส่ในชุดถังปฏิกรณ์ ที่ทำด้วยสแตนเลสที่เคลือบด้วยเทฟลอนอยู่ ภายในที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะการกวนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Bar) หลังจากสังเคราะห์เสร็จสิ้นแล้วจึงปล่อยให้ตัวถังปฏิกรณ์ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำสารออกไปล้างกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M และน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water: DI) กระทั่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7 หรือเป็นกลาง แล้วจึงนำสารไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



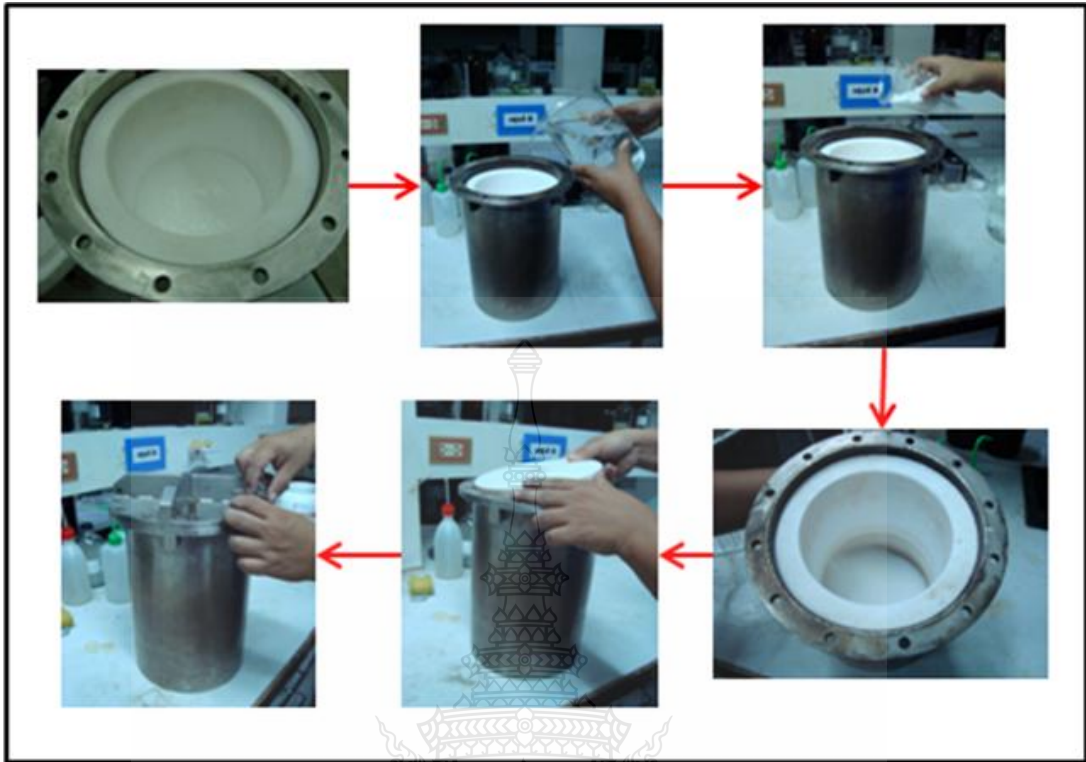
ภาพที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุแผ่นบางนาโนจากแร่อิลเมไนต์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล



ภาพที่ 3.11 การชั่งแร่โอลิเมนที่บดปริมาณ 16 กรัม



ภาพที่ 3.12 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 M



ภาพที่ 3.13 การเตรียมการสังเคราะห์หัวสควนาโน



ภาพที่ 3.14 การประกอบตั้งอุปกรณ์เข้ากับชุดให้ความร้อนและชุดกวนสาร



ภาพที่ 3.15 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 M



ภาพที่ 3.16 การล้างตัวอย่างด้วยกรด HCl และน้ำ D.I.

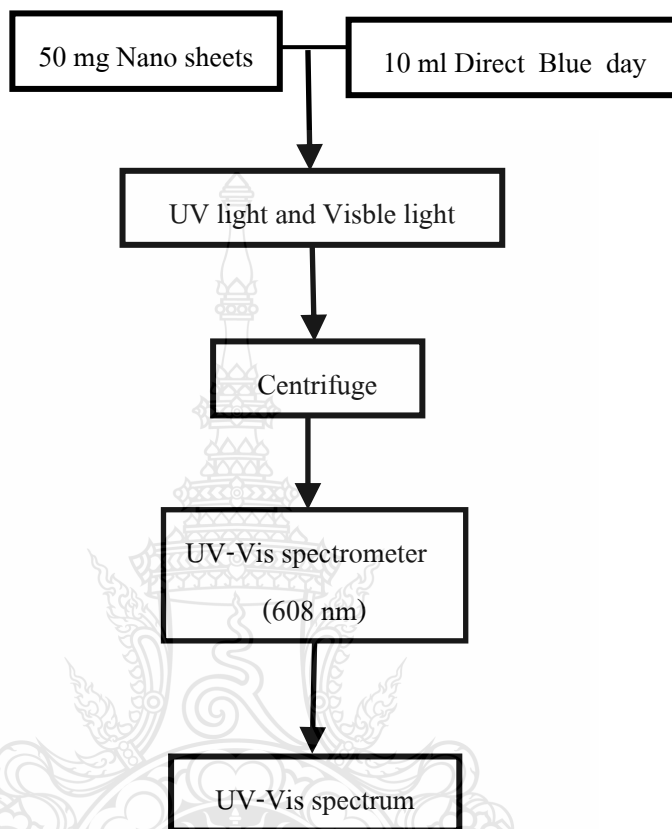


ภาพที่ 3.17 การกรองตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ

3.3.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพของวัสดุแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้

โครงสร้างผลึกและเฟสของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD: X'Pert PRO MPD Model pw 3040/60, PAN Alytical) องค์ประกอบของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF: ED-2000, Oxford) ลักษณะโครงสร้างของวัสดุที่เตรียมได้นั้นถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JSM-6510, JEOL) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM: JEM-2010, JEOL) สำหรับพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของตัวอย่างนั้นถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธี The Brunauer-Emmett-Teller (BET: BELSORP-Mini, Rubotherm)

6.3.3 การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic Activity) ในช่วง UV และแสงในช่วงของ Visible



ภาพที่ 3.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic Activity)

นำวัสดุนาโนที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic Activity) โดยเป็นวัสดุบับค้ำน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอในเบื้องต้น ซึ่งมีรูปแบบการวัดการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงซึ่งมีวิธีการทดลองดังต่อไปนี้ โดยนำสีย้อมตัวอย่าง (Direct Blue ของบริษัท Winimax Industry Co., Ltd.) ค่าความเข้มข้นของสีย้อม 5 g/L. นำมาทำให้เจือจางทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของ สีย้อม 90 mg/L. ในการตรวจสอบ ทำการเติมผง TiO_2 ที่ 50 mg กับสารละลายสีย้อมที่เจือจางแล้ว 10 ml ในภาชนะ แล้วนำไปวางไว้ในที่ที่อับแสง จากนั้นทำการให้ แสง UV ภายใต้การกวน ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 นาที เก็บค่าตัวอย่างทุกๆ 15 นาที โดยทำการแยกสารละลายด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลาง (Centrifuge) นำไปวัดความเข้มข้นของไอออน ด้วยการดูดซับคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 608 nm โดยใช้ UV-Vis spectrometer (Thermo Scientife : Genesys 20) วัสดุนาโนที่

เตรียมได้ในส่วนของการทดสอบสมบัติการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงกับแสงในช่วงของ Visible นั้นก็ทำเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงกับแสงในช่วงของแสง UV จะแตกต่างกันก็เพียงแหล่งกำเนิดแสงโดยเปลี่ยนจากหลอดที่ให้แสง UV ไปเป็นหลอดที่ให้แสงในช่วง Visible โดยในการทดลองนี้ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งให้แสงทั้งช่วงของ UV และ Visible ซึ่งเราสามารถให้แสงที่ส่องออกมานั้นเป็นเฉพาะแสงช่วง Visible ได้โดยใช้ฟิล์มกรองแสง UV ชนิดที่กรองแสง UV ได้ใกล้เคียง 100 % มากที่สุด หลังจากทดสอบสมบัติการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของวัสดุแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้จากแร่โอลิเมนที่เตรียมได้โดยเปรียบเทียบกับ ไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 รูปเครื่อง UV Spectrophotometer (Thermal Scientific, Genesys 20) และตู้ทึบแสง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ผลการวิจัยของการสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่อิลเมไนท์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และทำการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ ดังนี้ คือ รูปร่าง, ขนาด และโครงสร้างผลึก รวมถึงการนำแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ไปใช้สำหรับลดความเข้มของสีข้อมจากสิ่งทอ

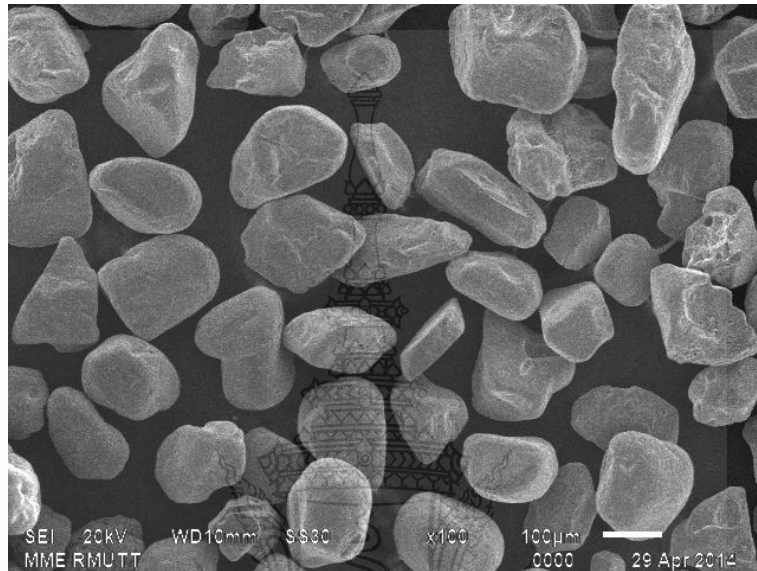
4.1 ผลการสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่อิลเมไนท์

วัตถุดิบสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อเตรียมแผ่นบางนาโนคือ แร่อิลเมไนท์จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดเล็กๆ สีดำ (ดังภาพที่ 4.1)

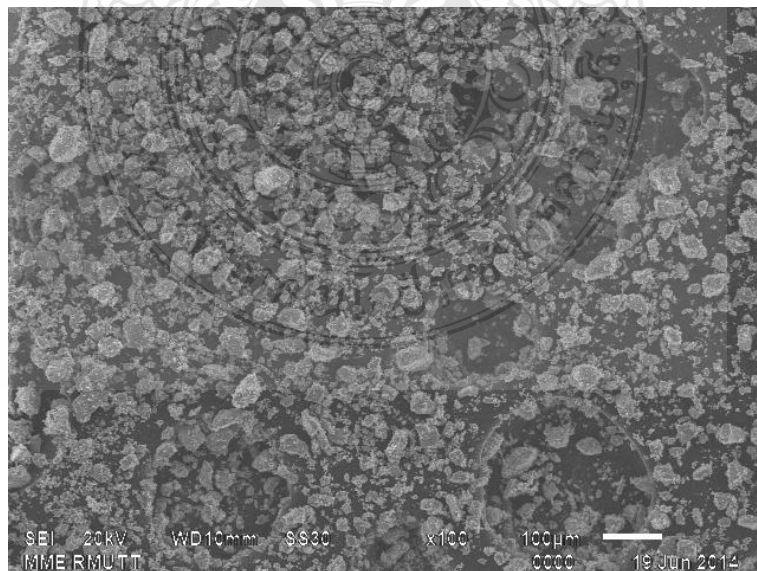


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายแร่อิลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น

จากผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าแร่โอลิเมนที่ก่อนการสังเคราะห์มีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดประมาณ 100 - 250 μm ดังภาพที่ 4.2 ใน ส่วนของแร่โอลิเมนที่ผ่านการบดเมื่อวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 - 50 μm ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแร่โอลิเมนที่วัตถุดิบตั้งต้นที่กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของแร่โอลิเมนที่ผ่านการบดด้วยเครื่อง ballmill ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากการสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไนท์ของไทยโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งสังเคราะห์ภายในชุดถังปฏิกรณ์ โดยใช้แร่โอลิเมนไนท์ปริมาณ 16 g ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5 M NaOH (aq)) ปริมาณ 2000 ml ใสลงในชุดถังปฏิกรณ์ จากนั้นใส่ Magnetic Stirrer เพื่อทำให้เกิดการกวนตลอดเวลาที่สังเคราะห์โดยให้อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.4) หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างที่กรองได้ไปอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารตัวอย่างภาพดังที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 5 M

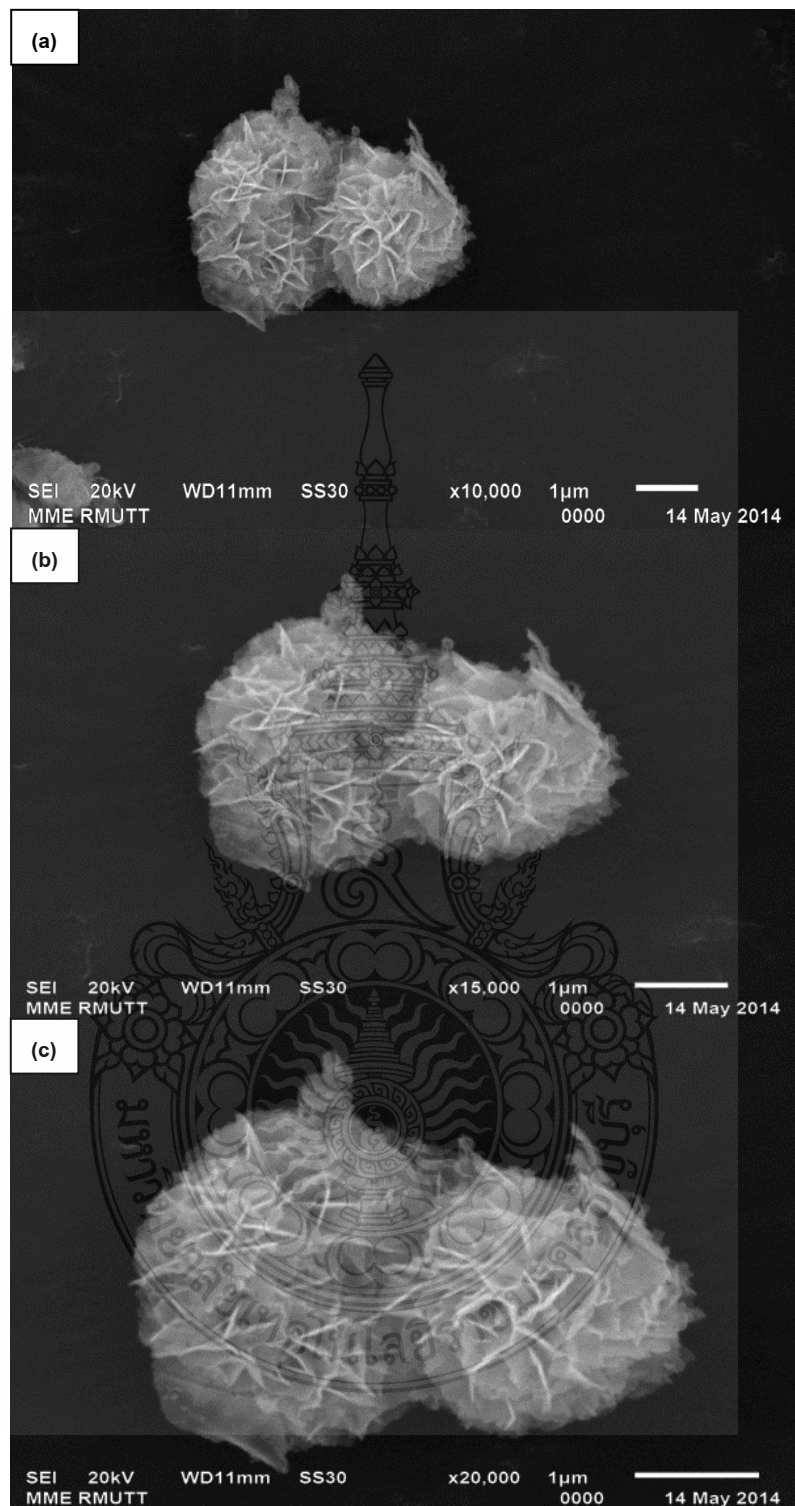


ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายสารตัวอย่างแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้

4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้

จากการวิเคราะห์ตรวจสอบ และศึกษาสมบัติต่างของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

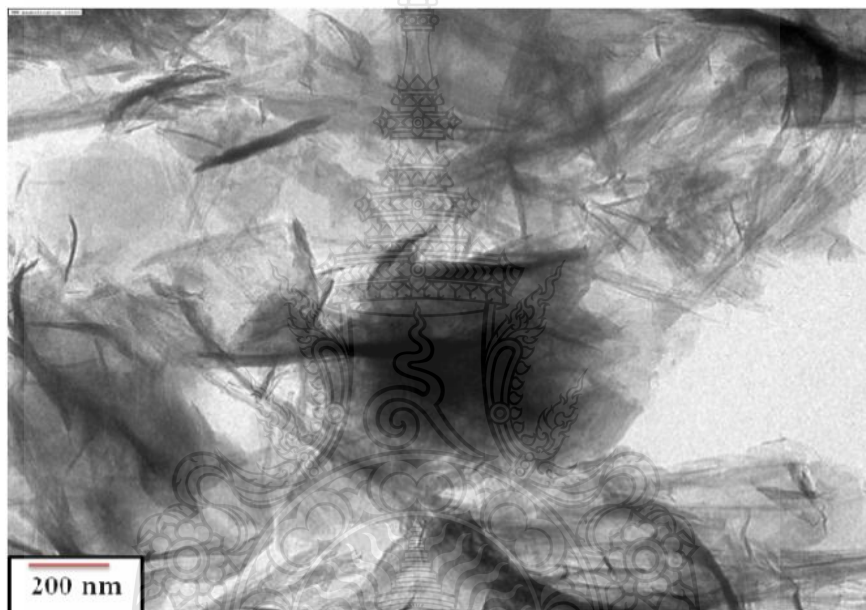
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)



ภาพที่ 4.6 ภาพ SEM ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ ที่กำลังขยาย (a) 10,000 เท่า (b) 15,000 เท่า และ (c) 20,000 เท่า

จากภาพที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า , 15,000 เท่า และ 20,000 เท่า พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ มีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มมีการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมรูปร่างคล้ายกับดอกไม้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2 - 5 μm ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นบางนาโนเมตร

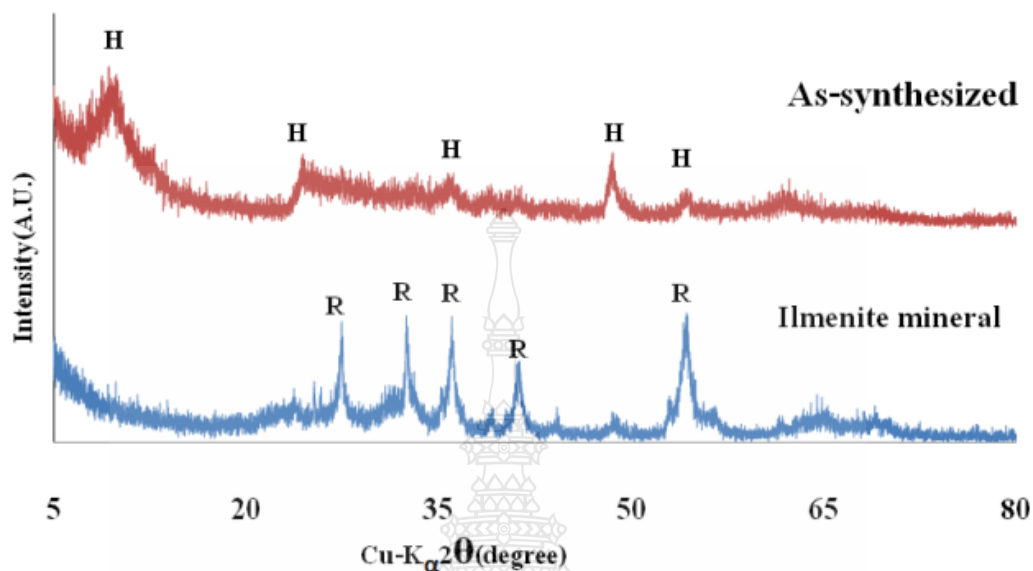
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากภาพที่ 4.7 เป็นภาพถ่ายที่แสดงผลจากการวิเคราะห์อนุภาคของแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่ได้จากการสังเคราะห์ แสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมลักษณะคล้ายดอกไม้ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นบางนาโนเมตร

4.2.3 โครงสร้างผลึกของแร่โอลิเมนไนท์ที่วัดดูดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้



ภาพที่ 4.8 ภาพ XRD Patterns โครงสร้างผลึกของแร่โอลิเมนไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ (H = Hydrogen titanate และ R = Rutile TiO_2)

การศึกษาทดสอบหาโครงสร้างผลึกของอนุภาคของแร่โอลิเมนไนท์และ สารตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังภาพที่ 4.8 พบว่า แร่โอลิเมนไนท์มีโครงสร้างผลึกแบบ รูไทล์ (Rutile) ขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททานเนต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) แสดงให้เห็นว่ามีอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งอาจมาจากน้ำกลั่นในกระบวนการเตรียมเป็นส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่เตรียมได้ [6], [18] นอกจากนี้ไม่ปรากฏเฟสของรูไทล์หรือสารเจือปนอื่นๆ เช่น เกลือแกง (NaCl) ในตัวอย่างที่เตรียมได้ ซึ่งการที่ไม่พบ Na ในตัวอย่างที่เตรียมได้อธิบายได้จากการที่อะตอมของ Na อาจถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือน้ำกลั่น โดยเกิดการแทนที่หรือแลกเปลี่ยนกันระหว่างอะตอมของ Na^+ ในสารประกอบ $\text{Na}_2\text{Ti}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ด้วย H^+ [8], [43]

4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะแรื่อลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุแผ่นบางนาโนจากแรื่อลเมไนท์ที่สังเคราะห์ขึ้นมา นั้นทำการวัดด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) โดยใช้การดูดซับก๊าซไนโตรเจน โดยวัตถุดิบตั้งต้นคือแรื่อลเมไนท์นั้นมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ประมาณ $0 \text{ m}^2/\text{g}$ เมื่อทำการสังเคราะห์ แรื่อลเมไนท์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ $105 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างที่เตรียมได้นั้น มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดด้วยเทคนิค BET และมีปริมาตรของรูพรุนที่วัดได้ประมาณ $72.319 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.609 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างที่เตรียมได้นี้มีค่ามากกว่าวัตถุดิบตั้งต้น 70 - 80 เท่าตัว และเมื่อเปรียบเทียบกับนาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ (P-25) แล้วพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้มีค่ามากกว่านาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ (P-25) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
แรื่อลเมไนท์ (วัตถุดิบตั้งต้น)	~ 0	-
เส้นใยนาโน (งานวิจัยที่ผ่านมา)	49	0.159
แผ่นบางขนาดนาโน(งานวิจัยนี้)	72.319	0.609
นาโน TiO_2 (P-25)	49.99	0.2318

4.4 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

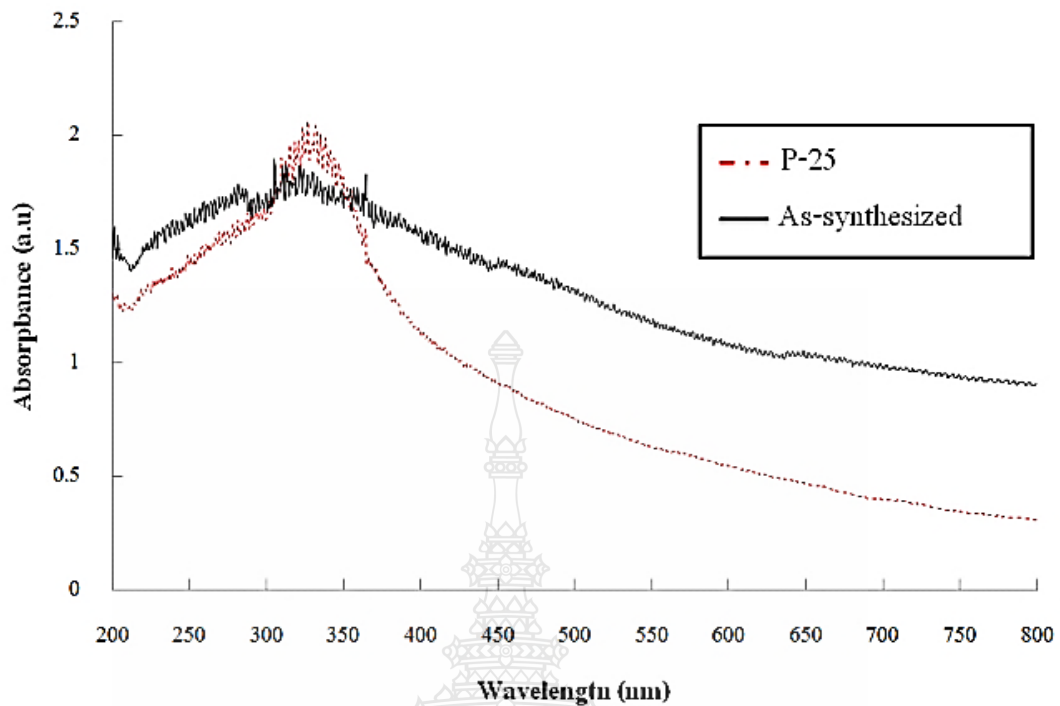
องค์ประกอบทางเคมีของแรื่อลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้นั้นถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ซึ่งผลของการวิเคราะห์นั้น แรื่อลเมไนท์มีส่วนประกอบหลักคือ TiO_2 ประมาณร้อยละ 60.8 โดยน้ำหนัก และมี Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO และอื่นๆ เป็นสิ่งเจือปน หลังการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นปริมาณของสิ่งเจือปนที่ประกอบด้วย Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , และ MnO ลดลงซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ Fe_2O_3 ของแรื่อลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้นกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้พบว่าปริมาณ Fe_2O_3 ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณลดลงมากกว่าแรื่อลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น คือลดลงจากร้อยละ 24.00 โดยน้ำหนัก เหลือร้อยละ 23.70 โดยน้ำหนัก และปริมาณของ TiO_2 ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าแรื่อลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น คือเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 60.80 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 65.70 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสิ่งเจือปนถูกกำจัดไประหว่างกระบวนการล้างและกระบวนการสังเคราะห์ [6] ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของแร่อิลเมนไนท์วัตถุดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

Oxide	Ilmenite mineral (%wt)	As-Synthesized
TiO ₂	60.8	65.7
Fe ₂ O ₃	24.0	23.7
Al ₂ O ₃	1.92	0.348
MnO	1.49	0.612
SiO ₂	1.24	0.186
V ₂ O ₅	0.419	0.377
Cr ₂ O ₃	0.376	0.379
Nb ₂ O ₅	0.349	0.197
WO ₃	0.329	<0.1
MgO	0.259	0.184
P ₂ O ₅	0.187	<0.1
ZrO ₂	0.149	0.137
Na ₂ O	<0.1	1.13

4.5 การวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25)

ในการวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของตัวอย่างที่เตรียมได้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25) โดยใช้เครื่อง UV Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 200 - 800 nm โดยตัวอย่างแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้มีการดูดกลืนความยาวคลื่นได้ทั้งในช่วง UV และ Visible ในช่วงของ UV นั้นแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้มีการดูดกลืนสเปกตรัมได้ใกล้เคียง วัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25) ในส่วนของการดูดกลืนสเปกตรัมในช่วง Visible นั้นพบว่าแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้มีการดูดกลืนสเปกตรัมในช่วงของ Visible ได้วัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25) ดีกว่าเป็นเท่าตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.9

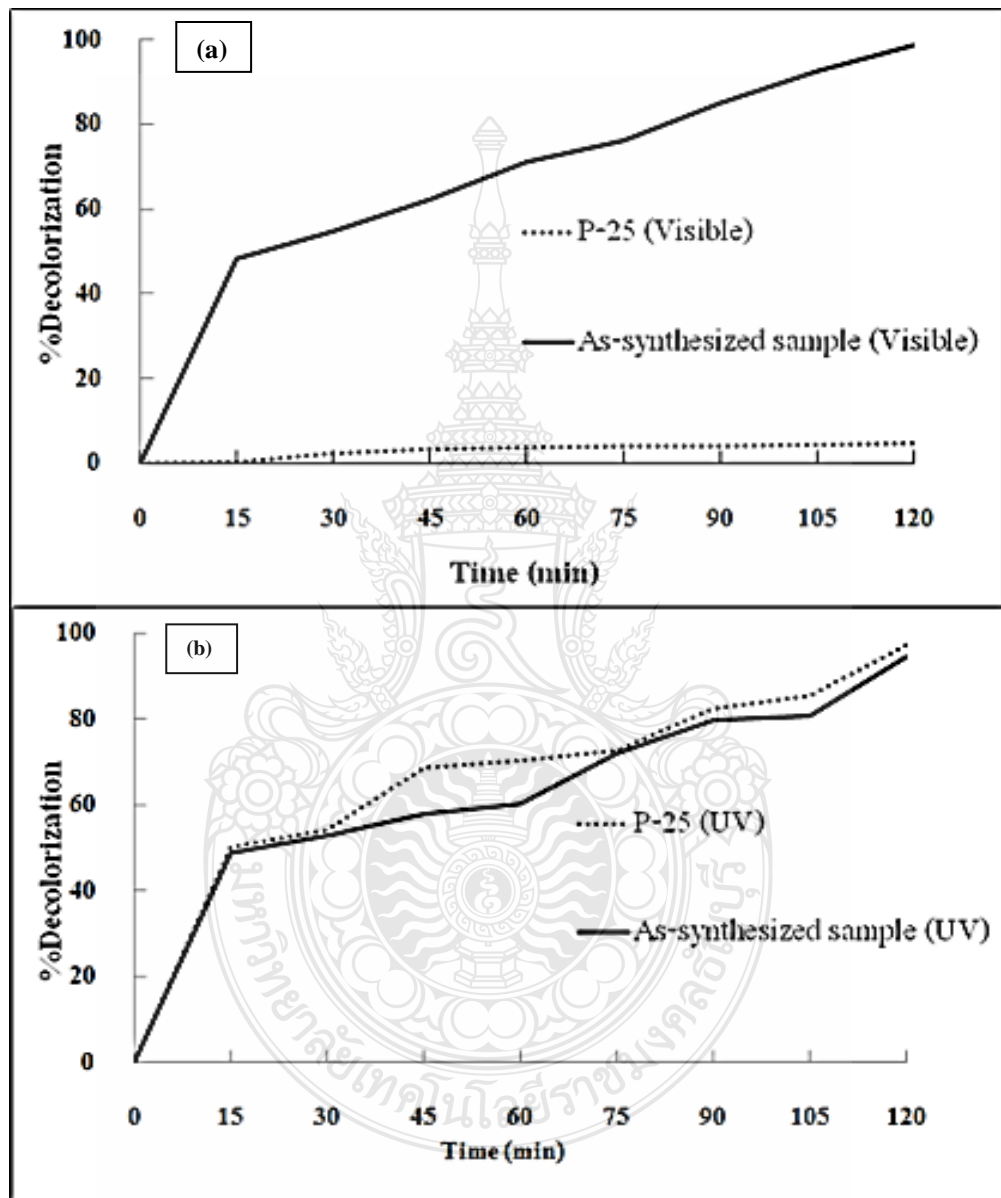


ภาพที่ 4.9 Uv-Vis absorbance spectra ของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้และวัสดุนาโนTiO₂ เชนิงพาณิชย์ (P-25)

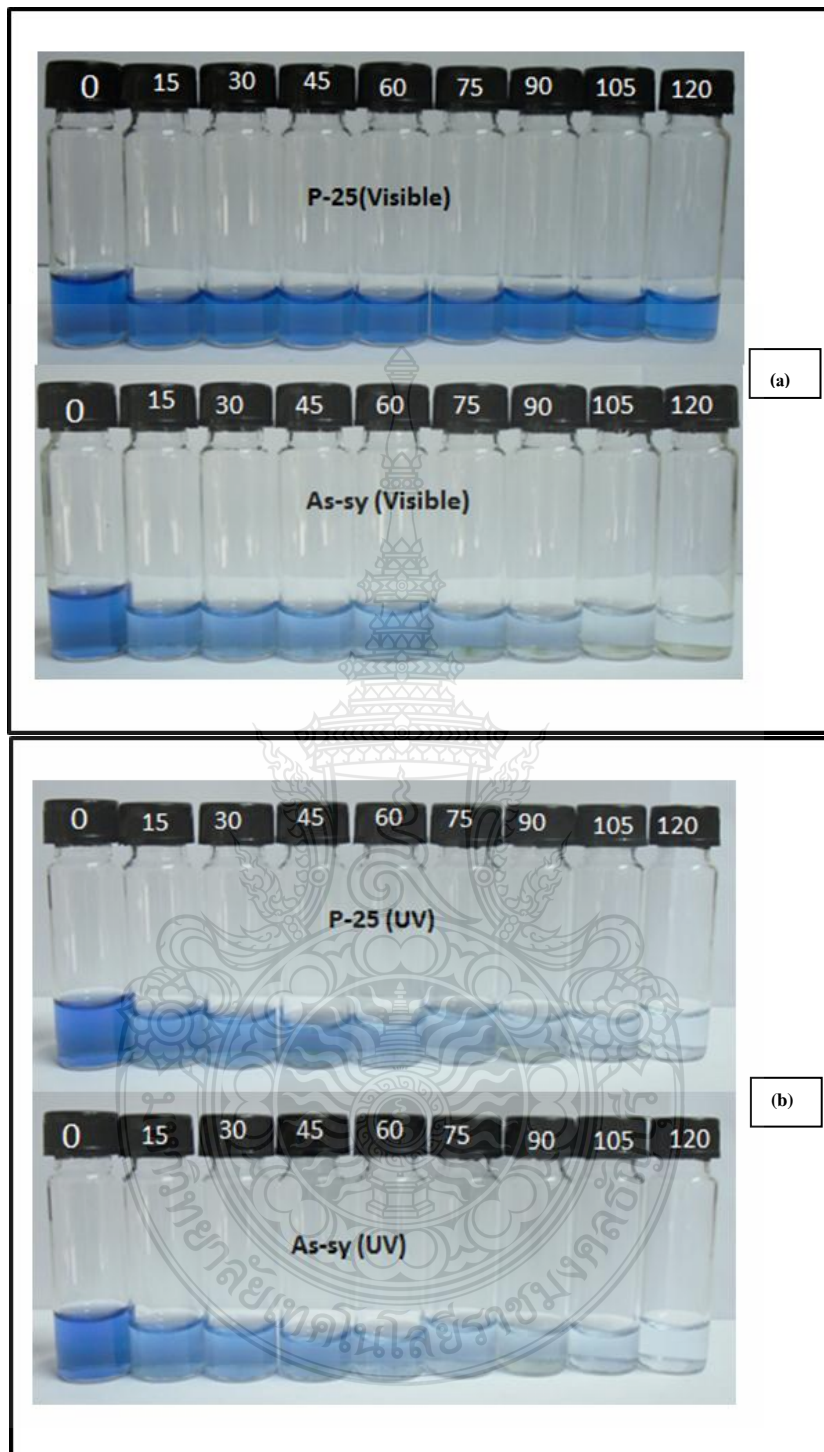
4.6 การทดลองใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง

ในการทดสอบสมบัติการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงของแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 5 M นำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ไปทดสอบการใช้งานเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอในเบื้องต้น พบว่าจากการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมี เมื่อมีการเติมแผ่นบางนาโน (Nanosheets) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงมากที่สุดคือร้อยละ 98.7 และเมื่อให้แสง UV มีค่าร้อยละ 94.6 ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาที และเมื่อมีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงคือร้อยละ 4.6 และเมื่อให้แสง UV มีค่าร้อยละ 97.3 ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาทีตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และ 4.11) เนื่องจากแผ่นบางนาโนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมมีรูปร่างคล้ายดอกไม้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าซึ่งส่งผลให้มีค่าการกระตุ้นเชิงแสง

ได้ดี [6], [9] และมี Fe^{3+} ช่วยในการรับแสงในช่วง Visible [13] แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้จากแร่โอลเมไนท์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียจากสีข้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้



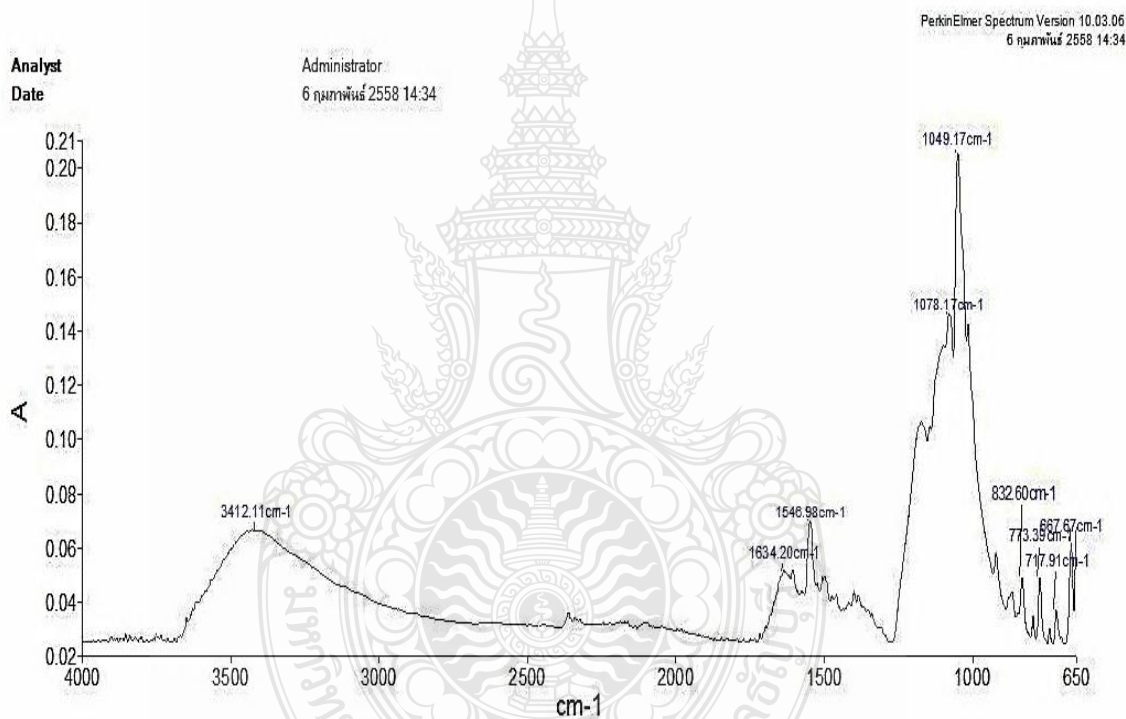
ภาพที่ 4.10 การดูดกลืนแสงของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO_2 เซิงพาทิชย์โดยใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (a) UV (b) Visible โดยสีข้อมชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน



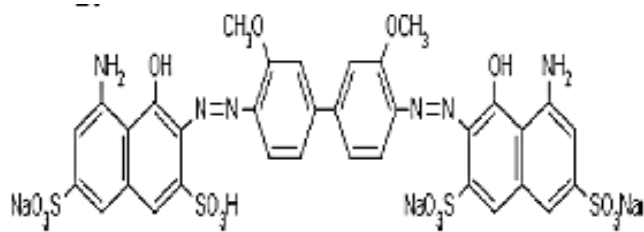
ภาพที่ 4.11 การลดความเข้มสีของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO_2 เซิงพาณิชย์ โดยใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (a) Visible (b) UV โดยสีย้อมชนิดไคเร็กซ์ สีนํ้าเงิน

4.7 การศึกษาการดูดซับและการกำจัดสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงินโดยใช้แผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25)

จากการศึกษาสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน โดยใช้ FT-IR Spectroscopy พบว่าจาก FT-IR spectra ดังแสดงในภาพที่ 4.12 พีกที่ตำแหน่ง 3412 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของสารในหมู่ -OH Group พีกที่ตำแหน่ง 1634 cm^{-1} และ 1548 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของสารในหมู่ -C=C Group และ -NH Group ในตำแหน่งของพีกที่ 1078 cm^{-1} และ 1049 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของสารในหมู่ -C-O-C Group, -C-OH Group, และ -S=O Group [42] โดยสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน มีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.13

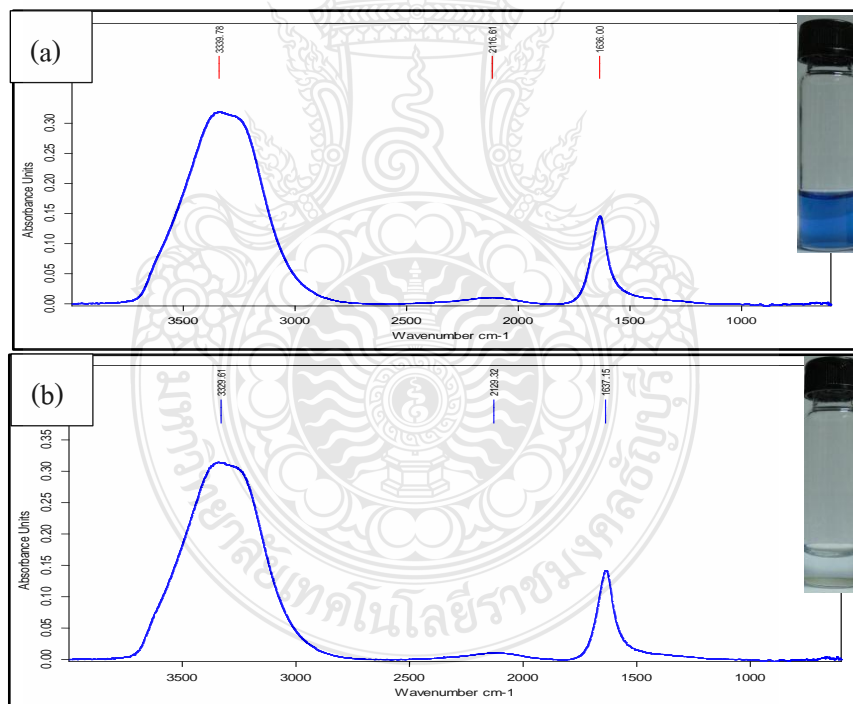


ภาพที่ 4.12 FT-IR spectra ของสีย้อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน



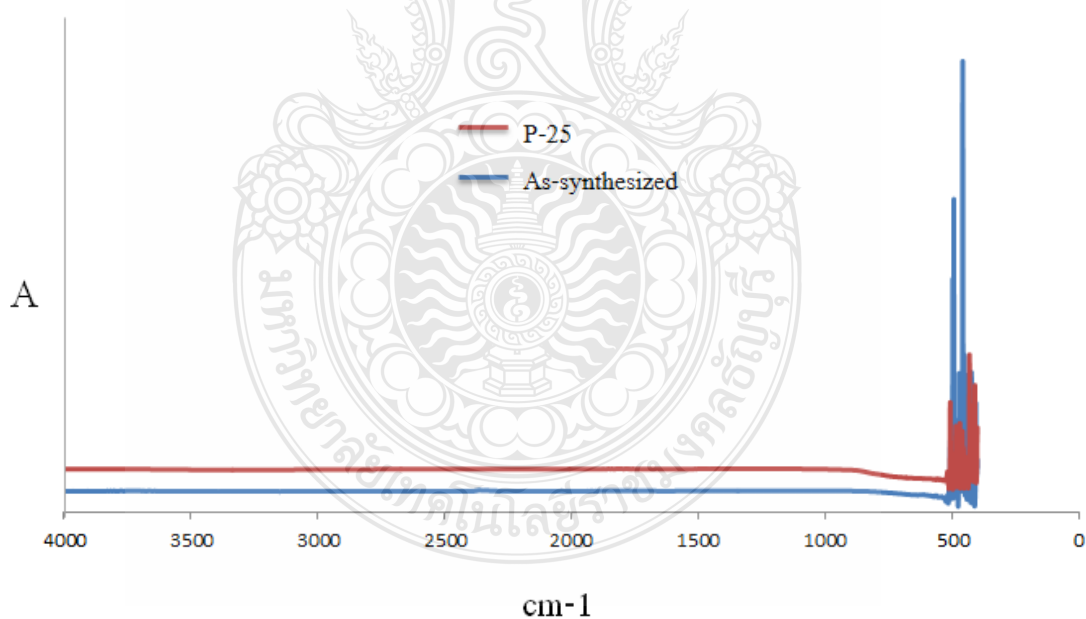
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างสีไดเร็กซ์สีน้ำเงิน [44]

จาก FT-IR spectra ของสีข้อมจากสิ่งทอชนิดไดเร็กซ์สีน้ำเงิน (ของเหลว) และตัวอย่างสีข้อมที่ผ่านการลดความเข้มสีโดยใช้แผ่นบางนาโน โดยทำการให้แสง Visible เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งพบที่ตำแหน่งของพีค 3339 cm^{-1} และ 1636 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่ -OH Group หรือโมเลกุลน้ำ เนื่องจากในการทำการทดลองใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสีข้อมชนิดไดเร็กซ์สีน้ำเงิน จึงทำให้มีพีคของ -OH Group หรือโมเลกุลน้ำที่โดดเด่น [45] ดังแสดงในภาพที่ 4.14

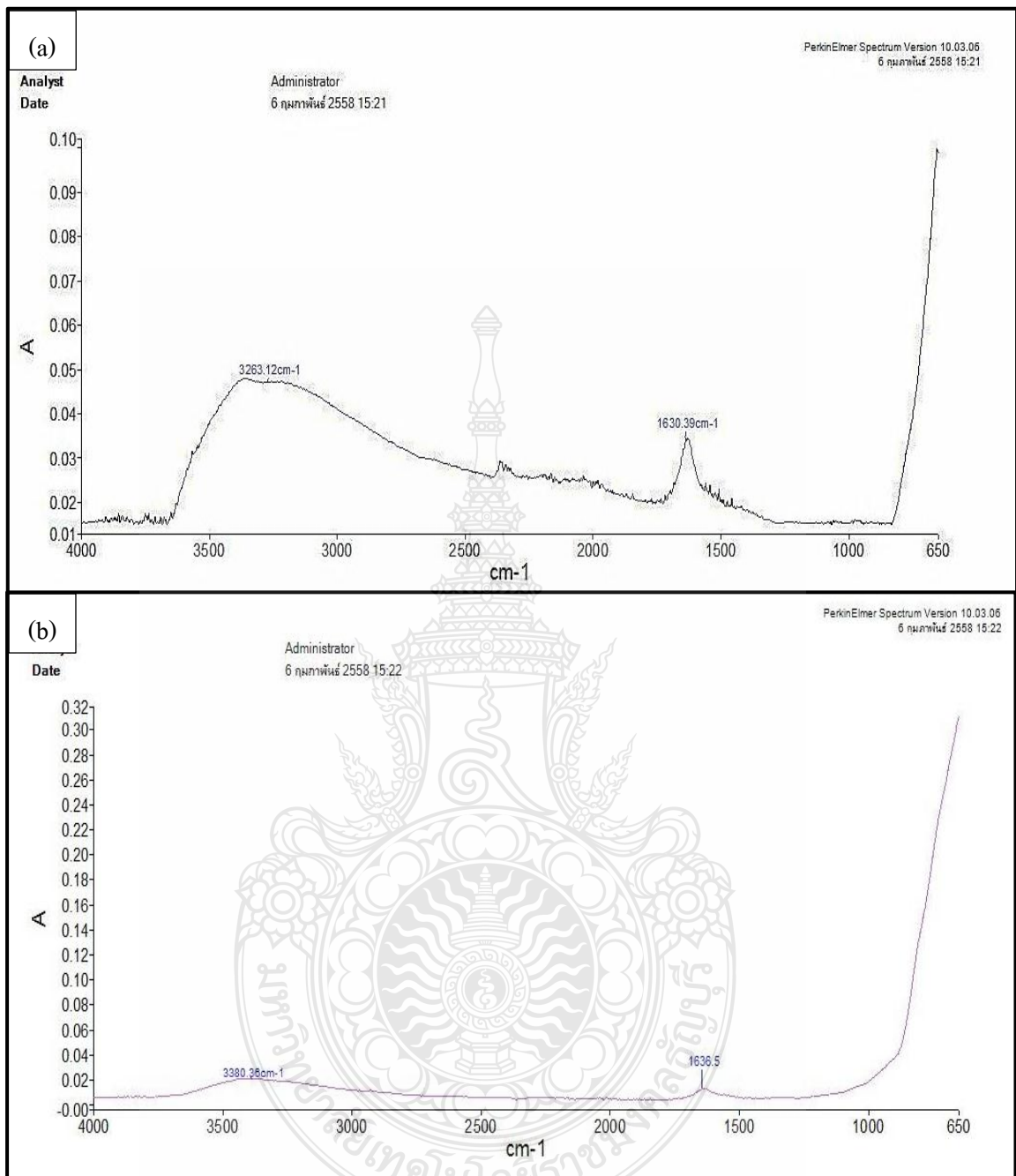


ภาพที่ 4.14 FT-IR spectra ของ (a) สีข้อมจากสิ่งทอชนิดไดเร็กซ์สีน้ำเงิน (ของเหลว) และ (b) ตัวอย่างสีข้อมที่ผ่านการลดความเข้มสีโดยใช้แผ่นบางนาโน ที่เวลา 120 นาที (Visible)

จากภาพที่ 4.14 พบว่าที่ตำแหน่งพิก 600 - 900 cm^{-1} จากตำแหน่งการขึ้นของพิกแสดงให้เห็นตำแหน่งหมู่ $-\text{O}-\text{Ti}-\text{O}$ นั่นก็คือไททานเนียมไดออกไซด์ [56] ต่อมาได้นำตัวอย่างแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) ที่ผ่านการลดสีเชื่อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน เป็นเวลา 120 นาที มาทำการศึกษาโดยใช้ FT-IR Spectroscopy จากผลการศึกษา FT-IR spectra พบว่ามีพิกแสดงตำแหน่ง ขึ้นมา 2 ตำแหน่ง ได้แก่ที่ตำแหน่ง 3260 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่ $-\text{OH}$ Group และที่ตำแหน่ง 1630 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่ $-\text{C}=\text{C}$ Group และ $-\text{NH}$ Group [42] ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ดังนั้นจึงพบว่าตัววัสดุแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) สามารถดูดซับสีเชื่อมจาก สิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงินได้เนื่องจากตัวบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) เป็นวัสดุที่มีรูพรุน โดยตัววัสดุแผ่นบางนาโนจะทำการดูดซับสีเชื่อมไว้ที่ภายในของรูพรุนตัววัสดุ และหลังจากตัววัสดุจะเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง (Photocatalytic) ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ ซึ่งสีเชื่อมมักมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นหลักทำให้ในการใช้วัสดุแผ่นบางนาโนจากแร่ไทเมไนท์สามารถสีเชื่อมผ่านการลดสีเชื่อมจากสิ่งทอชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงินได้เป็นอย่างดี [57], [58]



ภาพที่ 4.15 FT-IR spectra ของแผ่นบางนาโนและวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25)



ภาพที่ 4.16 FT-IR spectra ของ (a) แผ่นบางนาโน (หลังผ่านการกระบวนการลดความเข้มสีข้อม) และ (b) วัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) (หลังผ่านกระบวนการลดความเข้มสีข้อม)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทต์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยวิธีการที่ไม่ยุ่งยากด้วยชุดถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบและผลิตโดยฝีมือคนไทย วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อเตรียมแผ่นบางนาโนคือ แร่โอลิเมนไทต์จากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยทำการทดลองสังเคราะห์ด้วยเครื่องสังเคราะห์ขนาด 4 ลิตร ทำการสังเคราะห์ และศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น รูปร่าง ขนาด โครงสร้างผลึก ฯลฯ ของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ รวมถึงการนำแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สำหรับลดความเข้มข้นของสีย้อมจากสิ่งทอ

การสังเคราะห์แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทต์ของไทยโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งสังเคราะห์ภายในชุดถังปฏิกรณ์ โดยใช้แร่โอลิเมนไทต์ที่เป็นสารตั้งต้นปริมาณ 16 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ที่ความเข้มข้น 5 M NaOH (aq)) ปริมาณ 2000 ml ใส่ลงในชุดถังปฏิกรณ์ จากนั้นใส่ Magnetic Stirrer เพื่อทำให้เกิดการกวนตลอดเวลาที่สังเคราะห์โดยให้อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5.1 การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นบางนาโนที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) โครงสร้างทางจุลภาคของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ มีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มมีการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมรูปร่างคล้ายกับดอกไม้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2-5 μm ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นบางนาโนเมตร จากการวิเคราะห์อนุภาคของแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่ได้จากการสังเคราะห์ แสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมลักษณะคล้ายดอกไม้ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นบางนาโนเมตร

การศึกษาโครงสร้างผลึกของอนุภาคของแร่โอลิเมนไทต์และ สารตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า แร่โอลิเมนไทต์มีโครงสร้างผลึกแบบ รูไทล์ (Rutile) ขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททานิต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$)

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุแผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมนไทต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นทำการวัดด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ตัวอย่างที่เตรียมได้นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดด้วยเทคนิค BET

และมีปริมาตรของรูพรุนที่วัดได้ประมาณ $72.319 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.609 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างที่เตรียมได้นี้มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์ (P-25)

องค์ประกอบทางเคมีของแร่โอลิเมไนท์ที่วัดดูดิบตั้งต้นและตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้นั้นถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ซึ่งผลของการวิเคราะห์นั้น แร่โอลิเมไนท์มีส่วนประกอบหลักคือ TiO_2 ประมาณ 60.8 %wt และมี Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO และอื่นๆ เป็นสิ่งเจือปน หลังการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นปริมาณของสิ่งเจือปนลดลงซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ Fe_2O_3 ของแร่โอลิเมไนท์ที่วัดดูดิบตั้งต้นกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้พบว่าปริมาณ Fe_2O_3 ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณลดลงมากกว่าแร่โอลิเมไนท์ที่วัดดูดิบตั้งต้น คือลดลงจาก 24.00 เหลือ 23.70 %wt และปริมาณของ TiO_2 ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าแร่โอลิเมไนท์ที่วัดดูดิบตั้งต้น คือเพิ่มขึ้นจาก 60.80 เป็น 65.70 %wt เนื่องมาจากสิ่งเจือปนถูกกำจัดไประหว่างกระบวนการล้างและกระบวนการสังเคราะห์ [6]

การวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของตัวอย่างที่เตรียมได้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและวัสดุนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์ (P-25) โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 200 – 800 nm โดยตัวอย่างที่เตรียมได้มีการดูดกลืนความยาวคลื่นได้ทั้งในช่วง UV และ Visible ในขณะที่วัสดุนาโน TiO_2 เชิงพาณิชย์ (P-25) การดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วง UV

5.2 การทดลองใช้แผ่นบางนาโนจากแร่โอลิเมไนท์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง

แผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ไปทดสอบการใช้งานเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอในเบื้องต้น พบว่าจากการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมี เมื่อมีการเติมแผ่นบางนาโน (Nanosheets) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงมากที่สุดคือค่า 98.7 % และเมื่อให้แสง UV มีค่า 94.6% ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาที และเมื่อมีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงคือค่า 4.6 % และเมื่อให้แสง UV มีค่า 97.3 % ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาทีตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 4.9) เนื่องจากแผ่นบางนาโนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมมีรูปร่างคล้ายดอกไม้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าซึ่งส่งผลให้มีค่าการกระตุ้นเชิงแสงได้ดี [6], [9] และมี Fe^{3+} ช่วยในการรับแสงในช่วง Visible [13] แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้จากแร่โอลิเมไนท์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้

บรรณานุกรม

- [1] Jun, W., Teng, M., Zhaohong, Z., Xiangdong, Z., Yuefeng, J., Guan, Z., Gang, Z., Hongdan, Z., and Peng, Z. (2007). **Investigation on transition crystal of ordinary rutile TiO₂ powder and its sonocatalytic activity. Vol. 14: Ultrasonics Sonochemistry** (pp. 246-252).
- [2] Michael, G. (2001). **Photoelectrochemical cells. Vol. 414: Nature International weekly journal of science** (pp. 338-344).
- [3] Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, A., and Taga, Y. (2001). **Titanium Oxides Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped. Vol. 293: Science** (pp. 269-271).
- [4] Sorapong, P., Yoshikazu, S., Sommai, P. A., and Susumu, Y. (2005). **Preparation and Characterization of Mesoporous TiO₂ - CeO₂ Nanopowders respond to Visible Wavelength. Vol.178: Journal of Solid State Chemistry** (pp. 128-134).
- [5] Yoshikazu, S., & Susumu, Y. (2004). **Synthesis and Thermal Analyses of TiO₂-Derived Nanotubes Prepared by the Hydrothermal Method. Vol. 19: Journal of Materials Research** (pp. 982-985).
- [6] Yoshikazu, S., Sorapong, P., Susumu, Y., and Ryoji, K. (2005). **Natural Rutile-Derived Titanate Nanofibers Prepared by Direct Hydrothermal. Vol. 20: Processing Journal of Materials Research** (pp. 1063-1070).
- [7] Sorapong, P., Yoshikazu, S., Susumu, Y., and Ryoji, K. (2005). **Synthesis of Titanate TiO₂ (B), and Anatase TiO₂ Nanofibers from Natural Rutile Sand. Vol. 178: Journal of Solid State Chemistry** (pp. 3110-3116).
- [8] Sorapong, P., Navadol, L., Surawut, C., and Takashi, S. (2011). **Fabrication and Utilization of Titania Nanofibers from Natural Leucoxene Mineral in Photovoltaic Applications Japanese. Vol. 50: Journal of Applied Physics** (pp. 01BJ16-1-01BJ16-4).

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [9] Sorapong, P., Supachai, N., Suzuki, and Susumu, Y. (2006). **Synthesis and Dye-Sensitized solar Cell Performance of Nanorods/Nanoparticles TiO₂ from High Surface Area Nanosheet TiO₂. Vol. 6: Journal of Nanoscience and Nanotechnology** (pp. 3685-3692).
- [10] Athapon, S., Thanakorn W., Sorapong, P., and Wisanu, P. (2012). **Simple Hydrothermal Preparation of Nanofibers from Natural Ilmenite Mineral. Vol. 39: Ceramics International** (pp. 2497 – 2502).
- [11] Sorapong, P., Supachai, N., Yoshikazu, S., and Susumu, Y. (2007). **Preparation and Characterization of High Surface Area Nanosheet Titania with Mesoporous Structure. Vol. 61: Materials Letters** (pp. 2973–2977).
- [12] Jaturong, J., Thitima, R., Surawut, C., Sorapong, P., Yoshikazu, S., and Susumu, Y. (2009). **Low Temperature Hydrothermal Synthesis of Monodispersed Flower-like Titanate Nanosheets. Vol. 10: Catalysis Communications** (pp. 378–382).
- [13] Athapon, S., Thanakorn, W., Wisuthchai, B., Sommai, P. A., Churairat, D., Singto, S., and Sorapong, P. (2011). **Preparation of High Photocatalyst Mesoporous TiO₂ from Nanosheets Using Autoclave Unit (Thai Made). Vol. 9: Energy Procedia** (pp. 440 – 445).
- [14] Hyung-Kee, S., Gil-Sung K., Ansari, S.G., Young-Soon, K., Hyung-Shik S., Kyu-Hwan, S., and Eun-Kyung, S. (2008). **A Study on The Structure/ Phase Transformation of Titanate Nanotubes Synthesized at Various Hydrothermal Temperatures. Vol. 92: Solar Energy Materials & Solar Cells** (pp. 1533 –1539).
- [15] Jun Song, C., Yi Ling, T., Chang Ming, L., Yan Ling, C., Deyan, L., Srinivasan, M., Freddy Yin C. B., Lynden A. A., and Xiong W. L. (2010). **Constructing Hierarchical Spheres from Large Ultrathin Anatase TiO₂ Nanosheets with Nearly 100% Exposed (001) Facets for Fast Reversible Lithium Storage. Vol. 132: Journal of American Society** (pp. 6124–6130)

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [16] Deaw, A., Thanakorn, W., Sorapong, P., and Pichet, L. (2011). **Effect of Calcination Temperatures on Structures of TiO₂ Powders Prepared by Hydrothermal Method Using Thai Leucoxene Mineral. Vol 9: 9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium** (pp.539-544).
- [17] Jiaguo, Y., Huogen Y., Bei, C., Xiujian, Z., and Qingjie, Z. (2006). **Preparation and Photocatalytic Activity of Mesoporous Anatase TiO₂ Nanofibers by a Hydrothermal Method vol. 182: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** (pp. 121–127).
- [18] Athapon, S., Thanakorn, W., Sorapong, P., and Wisanu, P. (2013). **Simple Hydrothermal Preparation of Nanofibers from a Natural Ilmenite Mineral. Vol.39: Ceramics International** (pp. 2497–2502)
- [19] Deaw, A., Thanakorn, W., Sutham, N., Sorapong P., and Pichet, L. (2014). **Synthesis of Anatase TiO₂ Nanotubes Derived from Anatural Leucoxene Mineral by The Hydrothermal Method. Vol. 40: Ceramics International** (pp. 9241–9247).
- [20] Athapon, S., Thanakorn, W., Sorapong, P., and Wisanu, P. (2013). **Effect of Calcination Temperature on Structural and Photocatalyst Properties of Nanofibers Prepared from Low-Cost Natural Ilmenite Mineral by Simple Hydrothermal Method. Vol. 48: Materials Research Bulletin** (pp. 3211–3217).
- [21] Fang, H., Venkata, S. R. K., Madapusi, S., Dharmarajan, R., and Ravi, N. (2009). **Review Tailored Titanium Dioxide Photocatalysts for The Degradation of Organic Dyes in Wastewater Treatment: A review. Vol. 359: Applied Catalysis A: General** (pp. 25–40)
- [22] Doaa, E.-M. & Galal, H.R. (2013). **Removal of a Synthetic “Dye Direct Fast Blue B2RL” Via Adsorption Andphotocatalytic Degradation Using Low Cost Rutile and Degussa P25 Titanium Dioxide. Vol.7: Journal of Hydro-Environment Research** (pp. 219-226).

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [23] Auer, G., Woditsch, P., Weaterhaus, A., Kischkewitz, J., Gribler W.-D., and De Liedekerke, M. (2002). **Pigments, Inorganic 2. White Pigments, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th edition, Wiley-VCH Verlag GmbH Weinheim. DOI: 10.1002/14356007.N20_n01.**
- [24] Sheng-yong, L., Di, W., Qiu-lin, W., Jianhua, Y., Alfons G., B., Ke-fa, C. (2011). **Photocatalytic Decomposition on Nano-TiO₂: Destruction of Chloroaromatic Compounds. Vol. 82:Chemosphere (pp.1215-1224).**
- [25] สุกัญญา สารทูลขัตต์, วรริภา หงส์โต, และวารภรณ์ นันทพันธ์. (2549) การศึกษาผลของปริมาณและขนาดอนุภาคที่มีผลของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการบดบังแสงของปฏิกิริยาที่ผลิตจากโพลีเมทิลครีเลต. (ปริญญาานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.)
- [26] ตะวัน สุขน้อย. (2543) การสังเคราะห์และการศึกษาความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์ที่มีไททาเนียมเป็นองค์ประกอบ. ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ (น. 2). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [27] Michael R., H., Scot T., M., Wonyong, C., and Detlef W., B. (1995). **Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. Vol. 95: Chem Reviews (pp. 69-96)**
- [28] Ulrike, D. (2003). **The Surface Science of Titanium Dioxide. Vol. 48: Surface Science Report (pp. 53-229).**
- [29] ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์(10 February 2015).(online) Available: <http://www.nanoyothai.com>
- [30] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, (2551) นาโนเทคโนโลยีงานวิจัยนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทย. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [31] Geology, What is Ilmenite (online), 2005. Available: www.geology.com/minerals/ilmenite.shtml, (24 January 2015).

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [32] Raghavender, A.T., Nguyen Hoa, H., KyuJoon, L., Myung-Hwa, J., Skoko, Z., Vasilevskiy, M., Cerqueira, M.F., and Samantilleke, A.P.. (2013). **Nano-Ilmenite FeTiO₃: Synthesis and Characterization. Vol. 331: Journal of Magnetism and Magnetic Materials** (pp. 129–132).
- [33] Byrappa K., & Adschiri T. (2007). **Hydrothermal Technology for Nanotechnology. Vol. 53: Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials** (pp. 117-166).
- [34] Humin, C., Jiming, Ma., Zhenguog, Z., and Limin, Q. (1995). **Hydrothermal Preparation of Uniform Nanosize Rutile and Anatase Particles. Vol. 7: Chemistry of Materials** (pp. 663-671).
- [35] ณรงค์ ไชยสุต. (2548). **วิธีการวิเคราะห์โดยอุปกรรม**, (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [36] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, **การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์** (online), Available: www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm (24 February 2015)
- [37] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนารเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล.(15 January 2015). **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด** (online), <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [38] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ “**นาโนเทคโนโลยีงานวิจัยนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทย**”
- [39] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนารเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล.(15 January 2015). **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน**(online), <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [40] สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ.(15 January 2015). **การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์** (online), <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/april/radio4-1.htm>
- [41] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543). **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [42] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2554). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : บริษัทชวนพิมพ์ 50 จำกัด.
- [43] Jun-Nan, N., & Hsisheng, T. (2006). **Hydrothermal Synthesis of Single-Crystalline Anatase TiO₂ Nanorods with Nanotubes as The Precursor**. Vol. 110: *Journal of Physical Chemistry B* (pp. 4139–4198).
- [44] Samta, S., Karunesh, K., Nidhi, P., Prasad, R., and Singh, R.P. (2014). **Biodegradation of azo dyes Acid Red 183, Direct Blue 15 and Direct Red 75 by the isolate Penicillium oxalicum SAR-3**. Vol. 107: *Chemosphere* (pp. 240–248).
- [45] Atheel, H. A., Ahmad, Z. A., and Norli, I. (2013). **Elucidation of Reaction Behaviors in Sonocatalytic Decolorization of Amaranth Dye in Water Using Zeolite Y Co-Incorporated with Fe and TiO₂**. Vol. 3: *Advances in Chemical Engineering and Science* (pp. 113-122).
- [46] Imelda, F., Mudasir², and Endang, T. W. (2014). **Photocatalytic Decolorization Study of Methyl Orange by TiO₂-Chitosan Nanocomposites**. Vol. 14: *Indo. J. Chem* (pp. 209 – 218).
- [57] เสรีชัย ผู้ประภาย. (2548). **การบำบัดโครเมียมเฮกซะวาเลนทีนในสารละลายโดยไททานเนียมไดออกไซด์แบบตรึงในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก**. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [58] Kazuya, N., & Akira, F. (2012). **TiO₂ photocatalysis: Design and applications**. Vol. 13: *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* (pp. 169–189)

ภาคผนวก



การประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี



วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระดับประเทศ ครั้งที่ 5

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ขอเชิญเข้าร่วมการประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี

ซึ่งถ้วยพระราชทาน

สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

ระหว่างวันที่ 1-2 กันยายน 2557

ณ หอประชุมใหญ่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยมี พลเอก สุรยุทธ์ จุลานนท์

องคมนตรีและนายกสภาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นประธานในพิธี

รางวัลแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

นวัตกรรมเชิงพาณิชย์

นวัตกรรมความดีสร้างสรรค์

นวัตกรรมเพื่อประโยชน์ต่อสาธารณชน



เปิดรับสมัครเข้าประกวดเป็น 2 ระดับ

ระดับมัธยมศึกษา ระดับอุดมศึกษาและบุคลากรทั่วไป

(สมัครล่วงหน้าในวันที่ 15 สิงหาคม 2557)



ผู้สนใจเข้าประกวด download แบบฟอร์มและเงื่อนไขการสมัครที่ www.nano.kmitl.ac.th พร้อมทั้งสอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทร 0924701815, 02-3298000 ต่อ 3074, 3034 โทรสาร 02-3298265
Email: nanokmitl@hotmail.com, Website: www.nano.kmitl.ac.th





แผ่นบางขนาดนาโนจากแร่โอโรไมนของไทยสำหรับลดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงที่ตามองเห็น
Nanosheets from Thai Ilmenite Mineral for Decolorization of Dye Waste Water from Textile Dyeing Under Visible Light

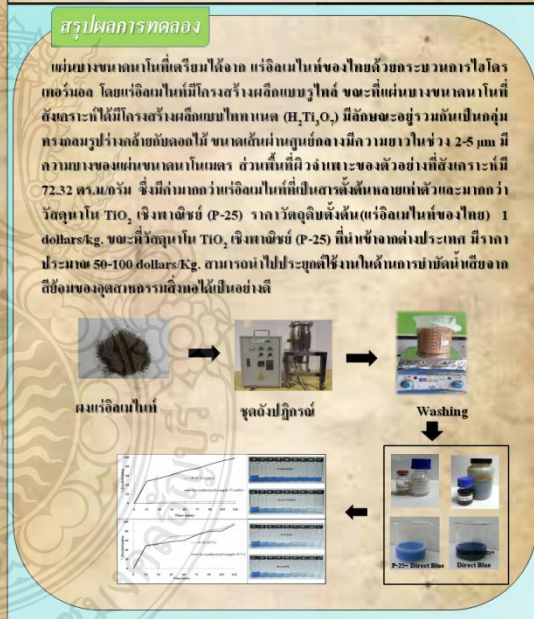
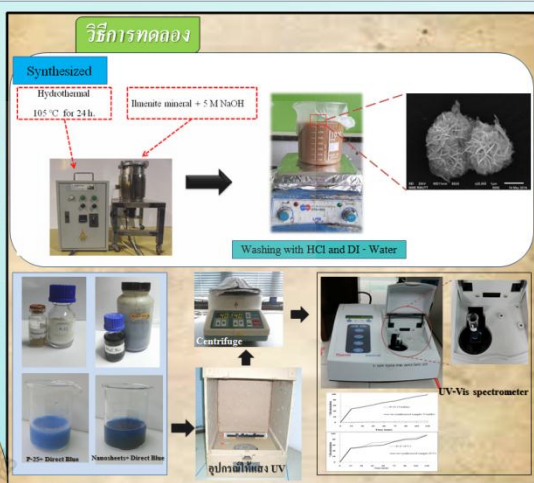
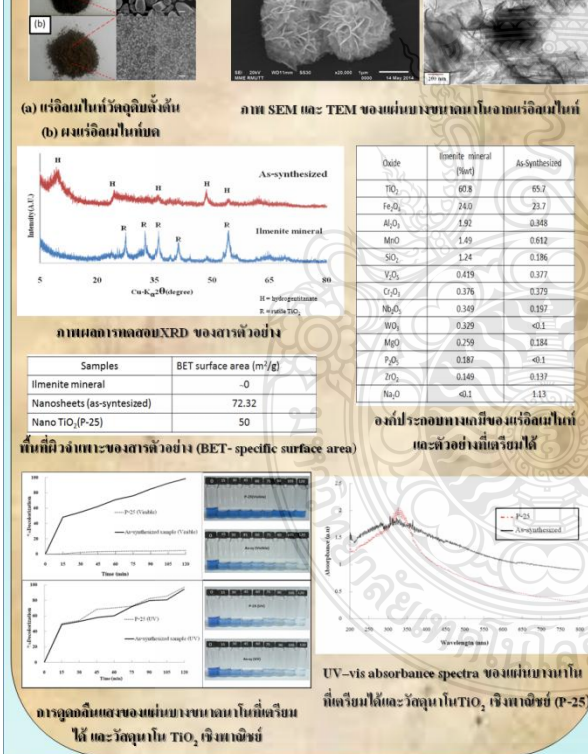
พรอมพิไล ท่วงกระโทก วิมล จริญญา นอม สรพจน์ กวสุปรีช
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12110
Tel. 02-5493480 Fax. 02-5494383 E-mail: sorapongp@yahoo.com



- วัตถุประสงค์ของการวิจัย**
1. เพื่อเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่โอโรไมนของไทย
 2. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้
 3. เพื่อทดลองนำแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สำหรับลดความเข้มของสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

- ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย**
1. เตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่โอโรไมนของไทย โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล
 2. ศึกษาสมบัติต่างๆของแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ เช่น ขนาด รูปร่าง โครงสร้างผลึก และสมบัติเชิงแสง
 3. ทดลองนำแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สำหรับลดความเข้มของสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ผลการทดลอง



แนวทางการนำผลการดำเนินการไปใช้ประโยชน์

วัสดุแผ่นบางนาโน ที่เตรียมได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ในการลดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการพัฒนา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และมูลค่าของสินแร่ซึ่งมีนัยสำคัญทางเศรษฐกิจของไทย





รางวัลรองชนะเลิศ อันดับ 2
ระดับอุดมศึกษาและบุคคลทั่วไป
หัวข้อ นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีกับการประยุกต์ใช้วัสดุนาโน
ประเภทนวัตกรรมเพื่อประโยชน์ต่อสาธารณชน
1-2 กันยายน 2557



NANOTEC
a member of NSTDA

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง อธิบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง
ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
ขอแสดงความยินดีต่อคุณบงกช โคตรทอง นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี

**เรื่อง แจ้งมอบงานพัฒนาในอวกาศเดิมในสหราชอาณาจักรสำหรับการจัดซื้อคอมพิวเตอร์
จากอุตสาหกรรมวิจัยที่แสดงในข้อที่ตามองค์**

โดย นางอชพรณิไธ ทัตตะระไทย
ภาคอุตสาหกรรมวิจัยและไอทีและการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผ่านการประกวดนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีระดับประเทศ ครั้งที่ 5 ระดับอุดมศึกษาและบุคลากรทั่วไป
ในชั้นที่ 1-2 กันยายน พ.ศ.2557
ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง อธิบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง

จ.ช.ช

(ศาสตราจารย์ ดร. อติ หนแก้ว)

คณบดี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง อธิบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าอุตสาหกรรม บัง

Industrial Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



การประชุมวิชาการสายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

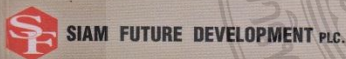
IE NETWORK CONFERENCE 2014

30-31 October 2014
Novotel Suvarnabhumi Airport Hotel
www.ienet-th.org

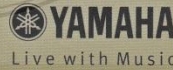
Diversifying Industrial Engineering
for Future Generation



การไฟฟ้านครหลวง
Metropolitan Electricity Authority



KISTLER
measure. analyze. innovate.



วันที่ 31 ตุลาคม 2557

	Room1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 6	Room 7
09.00-09.25	MM 253	MM 167	OM 209	OM 138	QE 244	PL 127	WE 146
09.25-09.50	MM 361	MM 206	OM 221	OM 155	QE 245	PL 140	WE 233
09.50-10.15	MM 358	MM 347	OM 252	OM 172	QE 271	PL 186	WE 235
10.15-10.40	MM 331	MM 357	OM 328	OM 224	QE 282	PL 201	WE 250
10.40-11.05	MM 276	MM 367	OM 339	OM 263		PL 323	WE 251
11.05-11.20	พักรับประทานอาหารว่าง						
11.20-12.00	การบรรยายพิเศษ						
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน						
13.00-13.25	MM 274	MM 176	OM 187	OM 312	QE 283	OR 147	WE 368
13.25-13.50	MM 165	MM 188	OM 255	OM 321	QE 306	OR 158	WE 272
13.50-14.15	MM 303	MM 202	OM 256	OM 322	QE 320	OR 212	WE 359
14.15-14.40	MM 198	MM 210	OM 284	OM 372	QE 324	OR 290	WE 365
14.40-14.55	พักรับประทานอาหารว่าง						
14.55-15.20	MM 194	MM 273		OM 378	QE 329	OR 298	WE 370
15.20-15.45	MM 195	MM 375		LG 260	QE 349	OR 299	WE 371
15.45-16.10	MM 151	MM 294					WE 184
16.10-16.35	MM 170	MM 304					
16.35-17.00	MM 345						

สารบัญบทความ (เรียงตาม Paper ID)

Paper ID	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	หน้า
304	การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่โอลเมไนท์ของไทยสำหรับการลดสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น	พรรณพิไล ห่วงกระโทก วิชญ์ เจริญถนอม สรพงษ์ ภาวสุปรีย์	105
305	การจัดการความเสี่ยงสำหรับผู้ให้บริการด้านโลจิสติกส์	ชวลิต มณีศรี ธรีณี มณีศรี	106
306	การประยุกต์ใช้ซิกซ์ ซิกมาสำหรับปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	อาคม มาป้อง ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง	107
312	การเพิ่มผลผลิตด้วยเทคนิคการซ่อมบำรุงเครื่องจักร	ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ อำนาจเจริญ อินทตก	108
318	การศึกษาความเป็นไปได้โครงการใช้ก๊าซชีวภาพจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานเอทานอลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า กรณีศึกษา : โรงงานเอทานอล	กมลวรรณ ตีสวัสดิ์มงคล ปณณมี สัจจกมล ก้องกิติ พุสวัตต์ พรเทพ อนุสรณินิตินสาร วิสุทธิ สุพิทักษ์	109
320	การปรับปรุงกระบวนการประกันภัยรถยนต์โดยการประยุกต์ใช้แนวคิดลีน ซิกซ์ ซิกมา	คม ธเนศานนท์ ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย	110
321	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของแผ่นกัมมันต์โลหะ	ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ อาทิตย์ยาพร สิทธิรัมย์ มาริษา แสนสี	111
322	การเพิ่มประสิทธิภาพสายการประกอบจุกนมหลอก	ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ พิไลวรรณ ปราปไชยโจร พิชชา อนันต์กัฏฐการ ปนัดดา แคล้นเที่ยะ	112
323	การออกแบบพื้นที่จัดวางสินค้าแบบพื้นฐานของคลังเก็บกระดาษลูกฟูก	ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า	113
324	การปรับปรุงวัสดุเพื่อทดแทนพอลิออลูมิเนียมโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อน โดยประยุกต์ใช้แนวทาง ซิกซ์ ซิกมา	อรไท ฉัพพรรณรังษี ปารเมศ ชุตินา	114
325	การลดของเสียจากการเกิดรอยแตกร้าวในกระบวนการหล่อฉีดอลูมิเนียม:กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์โคมไฟรุ่น LM3024	สุรศักดิ์ ธนูทอง ก๋อสุชน ศาตะโยธิน มนตรี พงษ์เหล็ก	115

๕. นางสาวกษิสร มั่งคั่งธนสมบัติ	กรรมการ
๖. นางสาวชื่นสมณ อนันตพงษ์	กรรมการ
๗. นางสาวจิตต์ ไพโรจน์	กรรมการ
๘. นางสาวรุ่งนภา อินทร์มีศรี	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายเลี้ยงต้อนรับและพิธีการ

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	ประธานกรรมการ
๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย	กรรมการ
๓. ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์	กรรมการ
๔. นายกำธร สุขพิมาย	กรรมการ
๕. นายสิทธิชัย บุญกิจ	กรรมการ
๖. นางสาวสุดาทิพย์ พึ่งรัมย์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายเลขานุการ ลงทะเบียน สถานที่ และของที่ระลึก

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	ประธานกรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต	กรรมการ
๔. ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	กรรมการ
๕. นางสาวรุ่งนภา อินทร์มีศรี	กรรมการ
๖. นางสาวพิรญาณ์ แก้วสุวรรณ	กรรมการ
๗. นางสาวสุดาทิพย์ พึ่งรัมย์	กรรมการ
๘. นางสาวธันย์นิชา สีนเกียรติวรกุล	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทางวิชาการ

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ประธาน กรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๖. ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๗. ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ

๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันทะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๙. ดร.ชนะ รักษ์ศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๒. ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ธิดำ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๓. ดร.ฐิติกร พัฒนพิบูล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๔. ดร.นัฏฐวิภา จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๕. ดร.ศิริรัตน์ หมั่นวนิชกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๖. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๗. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาณณรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ราษฎร์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน พีรพัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุของค์มา แกล่งกัมภ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๔. รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิธ เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๕. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภากแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณพล สมุทคุปต์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๐. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๑. ดร.วสวัชร นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ

๓๒. ดร.อนิรุท ไชยจรรวณิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๓. รองศาสตราจารย์ ดร.เขาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๔. รองศาสตราจารย์ ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๕. รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพิตรภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ เจริญวิไลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์นันทนา อุดมศักดิ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทรวานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เตยวัฒนรัฐติกาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๑. ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๒. ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๓. ดร.พิเชษฐ์ ศรีโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๔. ดร.วิบุญ ตั้งวโรตมนุกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๕. ดร.อุษณีย์ คำพูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๖. อาจารย์สมพร เพียรสุขขมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๗. อาจารย์สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ

๕๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุศล พิมาพันธ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๕๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๕๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๑. อาจารย์ธนภุต โขติภาวริศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๒. อาจารย์ธนิดา สุনারักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๓. อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถวัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๔. อาจารย์วรินทร์ เกียรติบุญกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๗. ดร.ฤทธิชัย เภาเนียม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์เชษฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๕๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ตริยวนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๒. ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๓. ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ อินตะวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ

๖๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อารีพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชา เชียงใหม่	กรรมการ
๖๖. ดร.แมน ตัญแพร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชา เชียงใหม่	กรรมการ
๖๗. ดร.บรรเจิด แสงจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชา เชียงใหม่	กรรมการ
๖๘. ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชา เชียงใหม่	กรรมการ
๖๙. ดร.อลงกต ลิ้มเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชา เชียงใหม่	กรรมการ
๗๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยงยุทธ ดุลยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๒. อาจารย์รอมฎอน บุระพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ น่วมทิม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รพีพร เจริญยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๖. ดร.สมพงษ์ พิริยานต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ

๗๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ ศรีศิลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๗๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรเดช สุวิทยารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทัศน์ ยอดเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพจน์ วัชรโรภากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๕. ดร.จกกล ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๖. ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๑. ดร.สันห์ รัฐวิบูลย์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๒. ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๓. ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๔. อาจารย์อรดี พฤติศรีณนันท	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	กรรมการ
๙๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิษญา สิมารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๙. ดร.ขวัญนิตี คำเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๐. ดร.ภาณุ บุรณจารุกร	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ	มหาวิทยาลัยปทุมธานี	กรรมการ
๑๐๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรทอง ทองจตุ	มหาวิทยาลัยพะเยา	กรรมการ
๑๐๓. รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อัจฉฤทธิ์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ

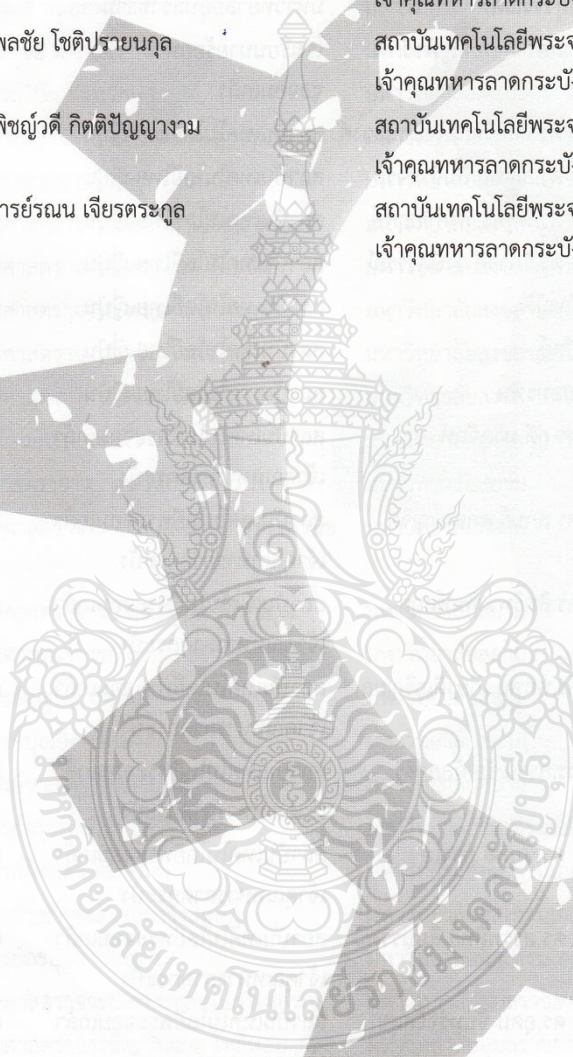
๑๐๔. อาจารย์ณภัทร อินทนนท์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
๑๐๕. รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนาถ ไกรภู	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๗. ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๘. ดร.รมชัย ศิโรเวฐนุกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๙. ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๐. อาจารย์กัญจน์ คณาธารทิพย์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๑. อาจารย์ดวงยศ สุภิกิตย์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๒. อาจารย์ธนา สาทรา	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๓. อาจารย์พิมพ์วัลย์สุ สุตะโคตร	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๖. ดร.พิชญ มนัสปิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๗. อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไพฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๘. อาจารย์พรรคพงษ์ แก่นณรงค์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๙. อาจารย์ศิลป์ชัย วัฒนเสย	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๐. อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๑. อาจารย์สมพร พรหมดวง	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๒. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
๑๒๓. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๕. ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๖. ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๗. ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๘. ดร.สิริเดช ซาตินิยม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๒. ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๓. อาจารย์จักรพันธ์ กัณหา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ

๑๓๔. อาจารย์ธนิศ ศรีวะระมย์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ลีลากวีวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๘. ดร.กัญจนา ทองสนิท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๙. ดร.คณิศ พลอยदनัย	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๐. ดร.สิทธิชัย แซ่เหลม	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๑. อาจารย์วิชัย จันทร์รักษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๒. รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๓. รองศาสตราจารย์วันดา รัตนมณี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โพชนา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ สังขพงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจตวิจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๙. ดร.วันฐมพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๕๐. รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วินิช ทวี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ รู้แทนคุณ	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ โสตรโยม	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๔. อาจารย์ณัฐพล พุฒยางกูร	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๕. อาจารย์ปยุตยา คีนดี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๖. อาจารย์ชานิดา พิทยานนท์	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๗. อาจารย์จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
๑๕๘. อาจารย์จิตลดา หมายมัน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
๑๕๙. อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังษุณี	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
๑๖๐. อาจารย์อรอุมา กอสนาน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย	กรรมการ
๑๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพ็ชรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ

๑๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สีนุชเชาวน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๕. ดร.จรวัยพร แสนทวิสุข	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๖. ดร.ธารชุตตา พันธนิกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๗. ดร.จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๘. ดร.สัมพันธ์ โอฬาริยกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๙. อาจารย์ฐิตินันท์ ศรีสุวรรณดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๗๐. พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญพัชร คง วัฒนานันท์	โรงเรียนนายร้อยพระ จุลจอมเกล้า	กรรมการ
๑๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๕. ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๖. ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๗. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจินท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๗๙. รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๐. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๑. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรพลสิทธิ์ ลิ้มนรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ

๑๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๕. ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๖. ดร.ธารชуда พันธนิกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๗. ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๘. ดร.สัมพันธ์ โอฬาทิรียกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๙. อาจารย์ฐิตินันท์ ศรีสุวรรณดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๗๐. พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญพัชร คง วัฒนานันท์	โรงเรียนนายร้อยพระ จุลจอมเกล้า	กรรมการ
๑๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ่มจีระจรัส	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๕. ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๖. ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๗. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๗๙. รองศาสตราจารย์ ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๐. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร ทิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๑. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรพลสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ

๑๘๖. ดร.เขาวลิต หามนตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๗. ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๘. ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๙. ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๐. ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๑. อาจารย์ธรรณ เจียรตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ และ เลขานุการ



การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่ิลเมไนท์ของไทยสำหรับการลดสี
ย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น
Preparation of Nanosheets from Thai Ilmenite Mineral for Decolorization of
Dye Waste Water from Textile Dying Under Visible Light

พรรณพิไล ห่วงกระโทก¹ วิษณุ เจริญถนอม² สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

E-mail: sorapongp@yahoo.com

Punpilai Haungkrathok¹ Wissanu Charentanom² Sorapong Pavasupree³

^{1,2,3}Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani

E-mail: sorapongp@yahoo.com

บทคัดย่อ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง(Photocatalyst) ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถสลายสารอินทรีย์ได้ งานวิจัยนี้แผ่นบางขนาดนาโนถูกเตรียมจากแร่ิลเมไนท์ของไทย (TiO₂~60.8 wt%) สำหรับการลดความเข้มข้นย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น โดยใช้ชุดตั้งปฏิกิริยาที่ทำการผลิตเองภายในประเทศ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ที่อุณหภูมิในการเตรียม 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของ TiO₂ ในตัวอย่าง เพิ่มขึ้นจาก 60.8 wt% เป็น 65.7 wt% โดยแผ่นบางขนาดนาโนที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททานิต (H₂Ti₂O₇) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2-5 μm มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณ 72 ตร.ม/กรัม แผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ในลดความเข้มข้นของสีย้อมชนิดไคเร็กซ์สีน้ำเงิน (λ_{max}~608 nm) พบว่าการเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็นของแผ่นบางขนาดนาโนสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้ 98.67% ในเวลา 120 นาที ซึ่งดีกว่า P-25 ซึ่งเป็นวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์

คำหลัก : แผ่นบางขนาดนาโน ไฮโดรเทอร์มอล อิลเมไนท์

* corresponding author



การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแร่อิลเมไนท์ของไทยสำหรับการลดสีข้อมจาก
อุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น

Preparation of Nanosheets from Thai Ilmenite Mineral for Decolorization of
Dye Waste Water from Textile Dying Under Visible Light

พรณพิไล ห่วงกระโทก¹ วิษณุ เจริญถนอม² สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี
E-mail: sorapongp@yahoo.com

Punpilai Haungkrathok¹ Wissanu Charemtanom² Sorapong Pavasupree³

^{1,2,3}Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani
E-mail: sorapongp@yahoo.com

บทคัดย่อ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง(Photocatalyst) ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถสลายสารอินทรีย์ได้ งานวิจัยนี้แผ่นบางขนาดนาโนถูกเตรียมจากแร่อิลเมไนท์ของไทย (TiO₂~60.8 wt%) สำหรับการลดความเข้มข้นข้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น โดยใช้ชุดถึงปฏิบัติการที่ทำการผลิตเองภายในประเทศ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ที่อุณหภูมิในการเตรียม 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของ TiO₂ ในตัวอย่าง เพิ่มขึ้นจาก 60.8 wt% เป็น 65.7 wt% โดยแผ่นบางขนาดนาโนที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททาเนต (H₂Ti₃O₇) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2-5 μm มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณ 72 ตร.ม/กรัม แผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ในลดความเข้มข้นของสีข้อมชนิดไดเร็กซ์สีน้ำเงิน (λ_{max}~608 nm) พบว่าการเร่งปฏิกิริยาภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็นของแผ่นบางขนาดนาโนสามารถลดความเข้มข้นของสีข้อมได้ 98.67% ในเวลา 120 นาที ซึ่งดีกว่า P-25 ซึ่งเป็นวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์

คำหลัก : แผ่นบางขนาดนาโน ไฮโดรเทอร์มอล อิลเมไนท์

Abstract

The expansion of the textile industry, cause water pollution. Waste-water treatment in textile industry by using titanium dioxide (TiO₂), which is a catalyst activated by light (Photocatalyst) TiO₂ has been one of very popular solutions for such a problem because TiO₂ decompose organic compounds. In this study, nanosheets was prepared from low-cost Thai ilmenite (TiO₂~60.8 wt%) for decolorization of dye waste water from textile dying with a Teflon-lined stainless steel autoclave (Thai made) via simple hydrothermal method using at 105 °C over a period of 24 hours. The amount of TiO₂ in the prepared sample increased from 60.8 wt% to 65.7 wt%. Nanosheets presented titanate structure (H₂Ti₃O₇) with diameter range of 2-5 μm. The BET specific surface area of the prepared titanate nanosheets was about 72 m²/g. The

decolorization of direct blue dye ($\lambda_{max} \sim 608$ nm) was monitored. The results from the test under visible light showed that the prepared nanosheets decolorized the waste-water to 98.68% within 120 min which was higher than those of commercial TiO_2 nanoparticles (P-25).

Keywords: nanosheets hydrothermal ilmenite

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของไทย โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น นับเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อม ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำเป็นอย่างมาก การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี, การดูดซับ, การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน และการเร่งปฏิกิริยาใช้แสงร่วมโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น[1]

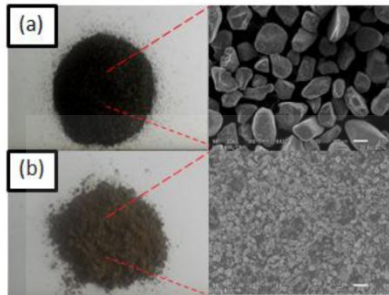
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่ง ที่มีช่วงแบนด์แกป (band gap) ที่กว้างประมาณ 3.2 eV เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอันเนื่องมาจากการที่ตัวมันมีสมบัติพิเศษในหลาย ๆ ด้าน อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย อาทิ เช่น วัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง วัสดุบำบัดน้ำเสีย วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ เป็นต้น[2] ในการสังเคราะห์วัสดุ TiO_2 สามารถทำการสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น วิธีโซล-เจล (Sol-gel), วิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน (Electrodeposition), วิธีอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) และวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นต้น [3,4] จากกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้น เป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนในการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และใช้อุณหภูมิในการเตรียมไม่สูงมาก มีต้นทุนต่ำ การเกิดปฏิกิริยาทำในระบบปิด มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม[5-8] และตัวอย่างที่เตรียมได้มีรูปร่างที่มีความพิเศษคือ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เช่น ท่อนาโน เส้นใยนาโน และแผ่นบางขนาดนาโน[6, 9-

10] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนะการเตรียมวัสดุนาโน TiO_2 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากแร่โอลิเมไนท์ของไทย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการลดสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุ

ทำการเตรียมวัสดุนาโน (Nanostructured materials) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้แร่โอลิเมไนท์ของไทยเป็นสารตั้งต้นโดยนำมาทำการบดด้วยเครื่อง Ball Mill ได้ผงของแร่โอลิเมไนท์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ผสมผงแร่โอลิเมไนท์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 M ปริมาตร 2000 ml ลงในชุดถังปฏิกรณ์ที่หุ้มจากเหล็กกล้าไร้สนิมและบุด้วยเพฟรอนอยู่ภายใน ที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นทำการให้ความร้อนจนถึงปฏิกรณ์มีอุณหภูมิ 105 °C พร้อมกับทำการกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เกิดการเย็นตัว ณ อุณหภูมิห้อง และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มารองและชะล้างด้วยสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.1 M และน้ำปราศจากไอออน (deionized water: DI) หลายๆ ครั้ง จนกระทั่งมีค่า pH เท่ากับ 7 ในขั้นตอนสุดท้ายนำ TiO_2 ที่สังเคราะห์ได้มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณลักษณะ



รูปที่ 1 ภาพถ่าย (a) แร่โอซิลเมในทิวัดอุบิตั้งต้น
(b) ผงแร่โอซิลเมในทิวัด



รูปที่ 2 อุปกรณ์ในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะ

นำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: X'Pert PRO MPD, PANalytical, Natherlands) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-Ray Fluorescence (XRF: X'Pert PRO MPD model PW3040/60, PAN alytical) โครงสร้างและสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JSM-6510, JEOL, Japan) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM: JEM-2100, JEOL, Japan) สำหรับพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของตัวอย่างวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธี The Brunauer-Emmett-Teller (BET: BELSORP-Mini, Rubotherm) ตามลำดับ

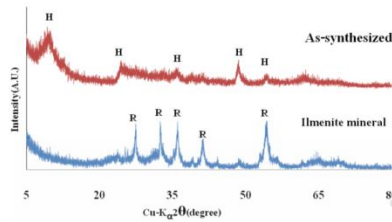
2.3 การวัดการนำป้ใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง

ในการศึกษาการนำป้ใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอในเมืองต้น คณะผู้วิจัยได้นำสีย้อมตัวอย่างตัวอย่าง (Direct Blue ของบริษัท Winimax Industry Co.,Ltd.) ค่าความเข้มข้นของสีย้อม 5 g/L. นำมาทำให้เจือจางให้ได้ค่าความเข้มข้นของสีย้อม 90 mg/L. ในการตรวจสอบ ทำการเติมผง TiO_2 ที่ 50 mg กับสารละลายสีย้อมที่เจือจางแล้ว 10 mL ในภาชนะ แล้วนำไปวางไว้ในที่ที่อับแสง จากนั้นทำการให้แสง UV ภายใต้การกวน ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 นาที เก็บค่าตัวอย่างทุกๆ 15 นาที โดยทำการแยกสารละลายด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลาง (Centrifuge) นำไปวัดความเข้มข้นของไอออน ด้วยการดูดซับคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 608 nm โดยใช้ UV-Vis spectrometer (Thermo Scientife : Genesys 20) ในการทดสอบด้วยแสง Visible ทดสอบเหมือนให้แสง UV [4]

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างหลักและรูปร่างลักษณะ

จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่เตรียมได้ (As-synthesized) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล ขณะที่แร่โอซิลเมในทิวัดที่เป็นสารตั้งต้นมีสีค่อนข้างดำ โครงสร้างผลึกของแร่โอซิลเมในทิวัดและตัวอย่างที่เตรียมได้ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า แร่โอซิลเมในทิวัดมีโครงสร้างผลึกแบบ รูไทล์ (Rutile) ขณะที่ตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบไฮโดรเจนไททาเนต ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) แสดงให้เห็นว่ามีอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งอาจมาจากน้ำกลั่นในกระบวนการเตรียมเป็นส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่เตรียมได้ [7-11] ส่วนประกอบทางเคมีของแร่โอซิลเมในทิวัดของตัวอย่างที่เตรียมได้หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลพบว่าสารเจือปน เช่น Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO และอื่นๆ ในปริมาณที่ลดลง ขณะที่ TiO_2 มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 60.8 เป็น 65.7 %wt ดังตารางที่ 1 เนื่องมาจากการกำจัดสารเจือปนดังกล่าวข้างต้น[12]



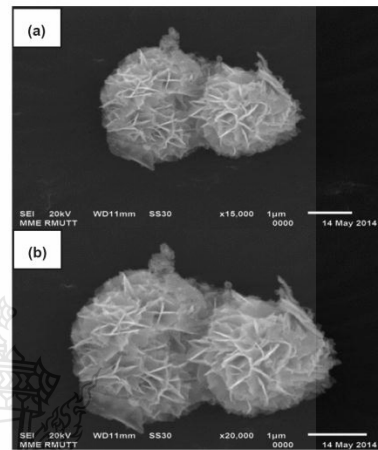
รูปที่ 3 โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของแร่อิลเมนไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ (H = hydrogen titanate และ R = rutile TiO₂)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่อิลเมนไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้

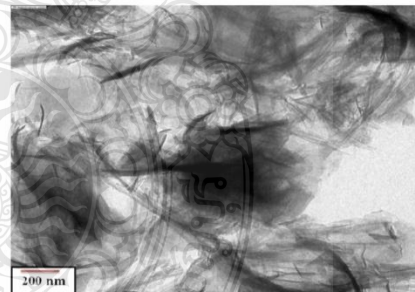
Oxide	Ilmenite mineral (%wt)	As-Synthesized
TiO ₂	60.8	65.7
Fe ₂ O ₃	24.0	23.7
Al ₂ O ₃	1.92	0.348
MnO	1.49	0.612
SiO ₂	1.24	0.186
V ₂ O ₅	0.419	0.377
Cr ₂ O ₃	0.376	0.379
Nb ₂ O ₅	0.349	0.197
WO ₃	0.329	<0.1
MgO	0.259	0.184
P ₂ O ₅	0.187	<0.1
ZrO ₂	0.149	0.137
Na ₂ O	<0.1	1.13

โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่เตรียมได้แสดงในรูปที่ 4 โดยใช้กล้องขยายรูป a. 15,000 เท่า รูป b. 20,000 เท่า มีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มมีการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมรูปร่างคล้ายกับดอกไม้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงประมาณ 2-5 μm ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) (รูปที่ 5) แสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างการจัดเรียงตัวเป็นทรงกลมลักษณะคล้ายดอกไม้ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นบางขนาดนาโนเมตร โดยตัวอย่างที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ทำการวัดด้วยเทคนิค BET ที่วัดได้ 72.32 ตร.ม/กรัม ในขณะที่วัสดุนาโน TiO₂ เซิงพานิชย์ (P-25) นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 ตร.ม/กรัม ดังแสดงในตารางที่ 2 ในการวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของตัวอย่างที่เตรียมได้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และวัสดุนาโน TiO₂ เซิง

พานิชย์ (P-25) โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 200 – 800 nm โดยตัวอย่างที่เตรียมได้มีการดูดกลืนความยาวคลื่นได้ทั้งในช่วง UV และ Visible ในขณะที่วัสดุนาโน TiO₂ เซิงพานิชย์ (P-25) การดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วง UV ดังแสดงในรูปที่ 6



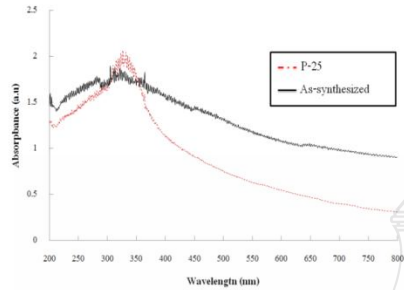
รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้
กำลังขยาย (a) 15,000x และ (b) 20,000x เท่า



รูปที่ 5 ภาพถ่าย TEM ของแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้

ตารางที่ 2 พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่าง (BET- specific surface area)

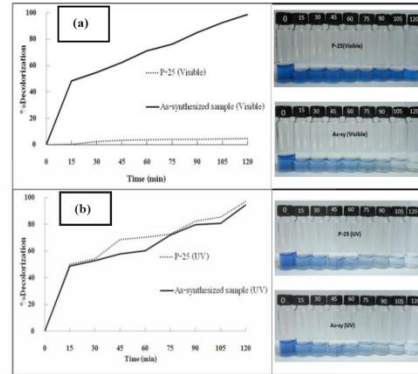
Samples	BET surface area (m ² /g)
Ilmenite mineral	-0
Nanosheets (as-synthesized)	72.32
Nano TiO ₂ (P-25)	50



รูปที่ 6 UV-vis absorbance spectra ของแผ่นบางนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25)

3.2 การวัดการนำไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง

การนำไปทดสอบการใช้งานเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสีย จากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอในเมืองต้น พบว่าการทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมี เมื่อมีการเติมแผ่นบางขนาดนาโน (nanosheets) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงมากที่สุดคือค่า 98.7 % และเมื่อให้แสง UV มีค่า 94.6% ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาที และเมื่อมีการเติมไททานเนียมไดออกไซด์เชิงพาณิชย์ (P-25) และให้แสง Visible ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีค่าลดลงคือค่า 4.6% และเมื่อให้แสง UV มีค่า 97.3% ที่เวลาในการทดสอบ 120 นาทีตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 7) เนื่องจากแผ่นบางขนาดนาโนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมมีรูปร่างคล้ายดอกไม้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าซึ่งส่งผลให้ค่าการกระตุ้นเชิงแสงได้ดี[6,9] และมี Fe³⁺ ช่วยในการรับแสงในช่วง Visible[13] แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้จากแร่โอลเมไนท์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้



รูปที่ 7 การดูดกลืนแสงของแผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้ และวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์โดยใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (a) UV (b) Visible โดยสีย้อมชนิดไครโซซีนำเงิน

4. สรุป

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า แผ่นบางขนาดนาโนที่เตรียมได้จากแร่โอลเมไนท์ของไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ชุดตั้งปฏิกิริยาที่ผลิตเองภายในประเทศ ที่อุณหภูมิในการเตรียม 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแร่โอลเมไนท์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ขณะที่แผ่นบางขนาดนาโนที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบไททานิต (H₂Ti₃O₇) มีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มทรงกลมรูปร่างคล้ายกับดอกไม้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวในช่วง 2-5 μm มีความบางของแผ่นขนาดนาโนเมตร ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างที่สังเคราะห์มี 72 ตร.ม/กรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าแร่โอลเมไนท์ที่เป็นสารตั้งต้นหลายเท่าตัวและมากกว่าวัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25) ราคาวัตถุดิบตั้งต้น (แร่โอลเมไนท์ของไทย) 1 dollars/kg. ขณะที่วัสดุนาโน TiO₂ เชิงพาณิชย์ (P-25) ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีราคาประมาณ 50-100 dollars/Kg. แผ่นบางนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมของอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ กลุ่มวิจัย Nanotechnology for Textile and Polymer Research Group (NanoTeP) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, J., Ma, T., Zhang, Z., Zhang, X., Jiang, Y., Zhang, G., Zhao, G., Zhao, H. and Zhang, P. 2007. Investigation on transition crystal of ordinary rutile TiO_2 powder and its sonocatalytic activity. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14: 246-252.
- [2] Grätzel, M. 2001. Photoelectrochemical cells. *Nature International weekly journal of science*, 414: 338-344.
- [3] Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., Aoki, A. and Taga, Y. 2001. Titanium Oxides Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped. *Science*, 293: 269-271.
- [4] Pavasupree, S., Suzuki, Y., Pivsa-Art, S. and Yoshikawa, S. 2005. Preparation and characterization of mesoporous TiO_2 - CeO_2 nanopowders respond to visible wavelength. *Journal of Solid State Chemistry*, 178: 128-134.
- [5] Suzuki, y. and Yoshikawa, S. 2004. Synthesis and Thermal Analyses of TiO_2 -Derived Nanotubes Prepared by the Hydrothermal Method. *Journal of Materials Research*, 19: 982-985.
- [6] Suzuki, Y., Pavasupree, S., Yoshikawa S. and Kawahata, R. 2005. Natural Rutile-Derived Titanate Nanofibers Prepared by Direct Hydrothermal Processing. *Journal of Materials Research*, 20: 1063-1070.
- [7] Pavasupree, S., Suzuki, Y., Yoshikawa, s. and Kawahata, s. 2005. Synthesis of Titanate TiO_2 (B), and Anatase TiO_2 Nanofibers from Natural Rutile Sand. *Journal of Solid State Chemistry*, 178: 3110-3116.
- [8] Pavasupree, S., Laosiripojana, N., Chuangchote, S. and sagawa, T. 2011. Fabrication and Utilization of Titania Nanofibers from Natural Leucosene Mineral in Photovoltaic Applications Japanese. *Journal of Applied Physics*, 50: 01BJ16-1-01BJ16-4.
- [9] Pavasupree, S., Ngamsinlapasathian, S. and Yoshikawa, S. 2006. Synthesis and dye-sensitized solar cell performance of nanorods/nanoparticles TiO_2 from high surface area nanosheet TiO_2 . *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6: 3685-3692.
- [10] Simpraditpan, A., Wirunmongkol, T., Pavasupree, S. and Pecharapa, W. 2012. Simple Hydrothermal Preparation of Nanofibers from Natural Ilmenite Mineral. *Ceramics International*, 39: 2497 – 2502.
- [11] Simpraditpan, A., Wirunmongkol, T., Pavasupree, S. Pecharapa, W. 2013. Effect of Calcination Temperature on Structural and Photocatalytic Properties of Nanofibers Prepared from Low – Cost Natural Ilmenite Mineral by Simple Hydrothermal Method. *Materials Research Bulletin*, 48: 3211-3217.
- [12] Loc Luu, C., Tuan Nguyen, Q. and Thoang Ho S. 2010. Synthesis and characterization of Fe-doped TiO_2 photocatalyst by the so-gel method. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 1: 1-5.
- [13] Khan, M.A., Woo, S.I. and Yang, O.B. 2008. Hydrothermally Stabilized Fe (III) Doped Titania Active Under Visible Light for Water Splitting Reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 5345-53521.

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

IE Network Conference 2014



ขอขอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

พรณพีไล ห่วงกระโทก วิชาญ เจริญถนอม
สรพงษ์ ภาสุปรีย์

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

การเตรียมแผนผังขนาดนาโนจากแร่ซิลิเกตสำหรับป้องกันการลัดลึ้ย้อม

จากอุตสาหกรรมสิ่งทอภายใต้แสงในช่วงที่ตามองเห็น

ระหว่างวันที่ 30 - 31 ตุลาคม 2557

ณ โรงแรม โนโวเทล สุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญ ศรีสืบสาย)

ประธานข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวพรรณพิไล ห่วงกระโทก
วัน เดือน ปีเกิด 25 กรกฎาคม 2533
ที่อยู่ 484 หมู่ที่ 1 ตำบลตะขบ อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา 30150
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์ 08-6874-6461
อีเมล Punpilai2533@gmail.com

