# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | ก |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับจากโครงการนี้ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญรูป | ช |
| สารบัญตาราง | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย | 3 |
| 1.4 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย | 3 |
| บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1.1 Natural rutile-derived titanate nanofibers prepared by direct hydrothermal processing | 7 |
| 2.1.2 Synthesis of titanate, $TiO_2$ (B), and anatase $TiO_2$ nanofibers from natural rutile sand | 9 |
| 2.1.3 Precursor Particle Size as the Key Parameter for Isothermal Tuning of Morphology from Nanofibers to Nanotubes in the $Na_{2-x}H_xTi_nO_{2n+1}$ System through Hydrothermal Alkali Treatment of Rutile Mineral Sand. | 12 |
| 2.1.4 Formation of crystallized titania nanotubes and their transformation into nanowires. | 14 |
| 2.1.5 Heating-sol-gel template process for the growth of $TiO_2$ nanorods with rutile and anatase structure | 17 |
| 2.1.6 Regulation of the Physical Characteristics of Titania Nanotube Aggregates Synthesized from Hydrothermal Treatment. | 17 |
| 2.1.7 Hydrothermal synthesis and photpluminescence of $TiO_2$ naonwires | 19 |
| 2.1.8 Titanium oxide nanotubes, Nanofibers and Nanowires | 19 |

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.9 Synthesis of high surface area titania powders via basic hydrolysis of titanium(IV) isopropoxide. 19

2.1.9 Synthesis and photocatalytic activity for water-splitting reaction of nanocrystalline mesoporous titania prepared by hydrothermal method 20

2.1.10 Synthesis of $TiO_2$ nanotubes and its photocatalytic activity for $H_2$ evolution 20

2.1.11 Fabrication and Utilization of Titania Nanofibers from Natural Leucoxene Mineral in Photovoltaic Applications. 21

2.1.12 Simple hydrothermal preparation of nanofibers from a natural ilmenite mineral. 23

2.2 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) 28

2.3 วัสดุนาโน (Nanomaterials) 29

2.3.1 เส้นใยนาโน (Nanofiber) 29

2.3.2 อนุภาคนาโน (Nanoparticles) 30

2.3.3 วัสดุประกอบแต่งนาโน (Nanocomposites) 32

2.3.4 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) 33

2.3.5 หมุดควอนตัม (Quantum dots) 24

2.3.6 ฟิล์มบางนาโน (Namofilms) 35

2.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) 36

2.4.1 ไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติทางกายภาพ 37

2.4.2 สมบัติเฉพาะตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ 39

2.5 1 D Nanostructured 43

2.5.1 One-dimensional nanostructured materials 43

2.5.2 การสังเคราะห์ One-dimensional nanostructured materials 44

2.6 การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrotermal synthersis) 49

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 52

3.1 แผนการดำเนินงาน 52

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 53

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

3.2.1 สารเคมี 53

3.2.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ 53

3.3 การเตรียมสารละลาย 56

3.3.1 การคำนวณ 10 M NaOH 56

3.3.2 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M 57

3.4 วิธีการทดลอง 58

3.4.1 การออกแบบสร้างถังปฏิกรณ์และชุดสังเคราะห์ 58

3.4.2 การสังเคราะห์วัสดุท่อนาโนจากวัสดุราคาถูก (แร่อิลเมไนท์) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล 60

3.4.3 การศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพของวัสดุท่อนาโนที่เตรียมได้ 67

3.4.4 การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ 71

3.4.5 การทดลองนำเอาวัสดุนาโนที่เตรียมได้ไปใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง 72

บทที่ 4 ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ 77

4.1 ลักษณะทางกายภาพ 77

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ 78

4.2.2 โครงร่างผลึกของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ 79

4.2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ 81

4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ 85

4.2 สมบัติการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงของท่อนาโนที่เตรียมได้กับเส้นใยนาโน, ท่อนาโนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้และวัสดุนาโน $TiO_2$ เชิงพาณิชย์ 87

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 89

5.1 สรุปผลการทดลอง 89

5.2 ข้อเสนอแนะ 90

บรรณานุกรม 91

ภาคผนวก ก 100

ผลงานวิจัยที่กำลังดำเนินการจัดตีพิมพ์ 100

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | ภาพถ่าย TEM, SEM และราคาของสารตั้งต้นในการเตรียมท่อนาโนจากแร่ธรรมชาติ | 2 |
| 1.2 | การนำไปใช้งานของวัสดุนาโน $TiO_2$ | 3 |
| 1.3 | โครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ | 5 |
| 1.4 | กลไกการเกิดเส้นใยนานโนจากแร่รูไทล์ | 5 |
| 1.5 | ภาพถ่าย TEM ของ $TiO_2$-derived nanotubes by Dr. T. Kasuga | 6 |
| 2.1 | ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (a) ที่อุณหภูมิ 150 °C, 50 ชั่วโมงในสภาวะปราศจากการกวนด้วยตัวกวนชนิดแม่เหล็ก (b) ที่อุณหภูมิ 150 °C, 120 ชั่วโมงในสภาวะที่กวนด้วยตัวกวนชนิดแม่เหล็ก | 7 |
| 2.2 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (a) แร่รูไทล์วัตถุดิบตั้งต้น (b) เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 150 °C, 120 ชั่วโมงในสภาวะที่กวนด้วยตัวกวนชนิดแม่เหล็ก (c) ท่อนาโนไททาเนตที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง | 8 |
| 2.3 | ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 150 °C, 120 ชั่วโมงในสภาวะที่กวนด้วยตัวกวนชนิดแม่เหล็ก | 8 |
| 2.4 | เส้นใยนาโนที่ได้จากเครื่อง SEM ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500, 700, 900 และ 1000 °C | 10 |
| 2.5 | ลักษณะของท่อนาโน | 10 |
| 2.6 | ลักษณะเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์เป็นเวลา 120 ชั่วโมง | 11 |
| 2.7 | ลักษณะเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ Magnetic stirring กวนผสม | 11 |
| 2.8 | ภาพถ่าย TEM ของแร่รูไทล์วัตถุดิบตั้งต้นที่ผ่านการบดที่ (a) 60 นาที (b) 90 นาที | 12 |
| 2.9 | ภาพถ่าย TEM ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของแร่รูไทล์ที่ผ่านการบดที่ 30นาที (a, d), 60 นาที (b,e), 90 นาที (c, f) | 13 |
| 2.10 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของแร่รูไทล์ที่ (a) ไม่ผ่านการบด (b) ผ่านการบดที่ 30 นาที (c) ผ่านการบดที่ 60 นาที (d) ผ่านการบดที่ 90 นาที | 14 |

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.11 | ภาพถ่าย SEM และ TEM ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ (a) ภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยล้างด้วย HCl 1M (sample C) (b) ภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยไม่ล้างด้วย HCl (sample A) (c) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยล้างด้วย HCl 1M (sample C) (d) ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยโดยใช้ปริมาตรสารละลายในหม้อความดัน 50% และล้างด้วย HCl 1M (sample E) | 15 |
| 2.12 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของ (a) ผง $TiO_2$ วัตถุดิบตั้งต้น (b) ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ที่ล้างด้วย HCl 0M (c) ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ที่ล้างด้วย HCl 0.1M (d) ท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ที่ล้างด้วย HCl 1M | 16 |
| 2.13 | ภาพถ่าย SEM (a) และ TEM (c) ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้และผ่านการล้างด้วย HCl 0.1M และผ่านการให้ความร้อนที่ 650 °C และ ภาพถ่าย SEM (b) และ TEM (d) ของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้และผ่านการล้างด้วย HCl 1M และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันซึ่งจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็นลวดนาโน (nanowires) | 16 |
| 2.14 | ภาพถ่าย TEM ของ $TiO_2$ ที่ได้ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ 130 °C โดยใช้สารละลาย NaOH โดยไม่ผ่านการล้างด้วย HCl (a) และผ่านการล้างด้วย HCl (b) | 18 |
| 2.15 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของ $TiO_2$ P-25วัตถุดิบตั้งต้นและท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้และผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 18 |
| 2.16 | พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET specific surface area) ของแร่ลูโคซีนวัตถุดิบตั้งต้น, เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้, และเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 700, และ 1000 °C | 21 |
| 2.17 | การกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนของเส้นใยนาโนและเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 22 |
| 2.18 | (a-e) ภาพถ่าย SEM ของ (a) แร่ลูโคซีนวัตถุดิบตั้งต้น (b) เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้และเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ (c) 400°C (d) 700°C และ (e) 1000 °C (f) ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้และเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ 400°C และ 700°C (จากซ้ายไปขวา) | 22 |

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.19 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของ (a) แร่ลูโคซีน, เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้, เส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่อุณหภูมิ 100-400 °C (b) เส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่อุณหภูมิ 500-1000 °C เมื่อ A = anatase $TiO_2$, B = $TiO_2$(B), H = hydrogen titanate, และ R = rutile $TiO_2$. | 23 |
| 2.20 | ภาพถ่ายของ (a) แร่อิลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น (b) ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้. | 24 |
| 2.21 | ภาพถ่าย SEM ของแร่อิลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น. | 24 |
| 2.22 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของแร่อิลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น และเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อ H = hydrogen titanate, และ R = rutile $TiO_2$. | 25 |
| 2.23 | ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย (a) 10000 เท่า (b) 20000 เท่า. | 26 |
| 2.24 | ภาพถ่าย TEM ของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ที่กำลังขยาย 100000 เท่า. | 26 |
| 2.25 | สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้และ $TiO_2$ เชิงพาณิชย์ ST-01. | 27 |
| 2.26 | การเปรียบเทียบขนาดของสิ่งต่างๆ | 28 |
| 2.27 | ขนาดของวัสดุนาโนเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผม | 29 |
| 2.28 | เส้นใยนาโนจากแร่รูไทล์ | 30 |
| 2.29 | อนุภาคนาโนของซีเลเนียม (Nanoparticles) | 31 |
| 2.30 | วัสดุประกอบแต่งนาโนที่ได้จาก Silica xerogel (Nanocomposite) | 33 |
| 2.31 | ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) | 34 |
| 2.32 | หมุดควอนตัมที่ได้จากแคดเมียมเซเลไนด์กับซิงค์ซัลเฟต | 35 |
| 2.33 | ฟิล์มบางนาโนจากหยดน้ำ (Namofilms) | 36 |
| 2.34 | ผงของไททาเนียมไดออกไซด์ | 38 |
| 2.35 | การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกฮีดรัล (a) เฟสรูไทล์ (b) เฟสอนาเทส (c) เฟสบรุ๊คไคท์ | 39 |
| 2.36 | การนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ ของไททาเนียมไดออกไซด์ | 42 |
| 2.37 | Typical morphologies of one-dimensional nanostructures: nanowires, Nanorods, Nanotube and Nanobelts | 43 |
| 2.38 | แผนภาพวิธีการเกิดโครงสร้างแบบ 1 มิติ 6 วิธี | 44 |
| 2.39 | ภาพที่ได้จากโครงสร้าง 1-Dimensional โดยใช้เครื่องTEM และ SEM | 47 |

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.40 | แผนผังการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล | 49 |
| 2.41 | ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล | 51 |
| 3.1 | แบบจำลองของชุดถังปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ | 53 |
| 3.2 | ชุดถังปฏิกรณ์แบบควบคุมอุณหภูมิ | 53 |
| 3.3 | ชุดกรองแบบสุญญากาศ | 54 |
| 3.4 | ตู้อบสารเคมี | 54 |
| 3.5 | เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง | 55 |
| 3.6 | เครื่องกวนสาร | 55 |
| 3.7 | การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M | 56 |
| 3.8 | การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M | 57 |
| 3.9 | แบบจำลองชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล a) อุปกรณ์ควบคุมถังปฏิกรณ์ที่จะใช้ในกระบวนการเตรียมวัสดุท่อนาโน และ b) ถังปฏิกรณ์ | 58 |
| 3.10 | ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเขียนแบบทางวิศวกรรม | 59 |
| 3.11 | แบบชุดถังปฏิกรณ์ที่จะใช้ในการเตรียมวัสดุนาโน | 60 |
| 3.12 | กระบวนการล้างแร่อิลเมไนท์ด้วยสารละลาย NaOH | 61 |
| 3.13 | ขั้นตอนการล้างแร่อิลเมไนท์ (a) ชั่งแร่อิลเมไนท์ปริมาณ 16 กรัม (b) ผสมแร่อิลเมไนท์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M (c) กวนสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 61 |
| 3.14 | การล้างแร่อิลเมไนท์ด้วยน้ำ D.I. จนกระทั่งได้ค่า pH เป็นกลาง | 62 |
| 3.15 | การกรองแร่อิลเมไนท์ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ | 62 |
| 3.16 | กระบวนการการสังเคราะห์ท่อนาโนจากแร่ธรรมชาติ | 63 |
| 3.17 | กลไกการเกิดท่อนาโน | 63 |
| 3.18 | การเตรียมการสังเคราะห์วัสดุนาโน (a) ผสมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น10 โมล่าร์กับแร่อิลเมไนท์บดที่ผ่านการล้าง 5 รอบในถังปฏิกรณ์ (b) ปิดฝาถังและล็อคให้แน่น | 64 |
| 3.19 | การประกอบถังปฏิกรณ์เข้ากับชุดให้ความร้อนและชุดกวนสาร | 64 |
| 3.20 | การปรับและควบคุมอุณหภูมิในการสังเคราะห์วัสดุนาโน | 65 |

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.21 | วัสดุนาโนที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล | 65 |
| 3.22 | การล้างวัสดุนาโนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และน้ำปราศจากไอออน (DI) | 66 |
| 3.23 | การกรองวัสดุนาโนด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ | 66 |
| 3.24 | การอบวัสดุนาโนด้วยตู้อบสารเคมี | 67 |
| 3.25 | เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) | 68 |
| 3.26 | เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF) | 69 |
| 3.27 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) | 69 |
| 3.28 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) | 70 |
| 3.29 | เครื่องวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน (The Brunauer-Emmett-Teller, BET) | 71 |
| 3.30 | หลักการวัดการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสง | 72 |
| 3.31 | การเตรียมสารละลาย Potassium Iodide (KI) 0.2 โมล่าร์ | 73 |
| 3.32 | การชั่งวัสดุนาโนที่เตรียมได้ปริมาณ 0.05 กรัม ใส่ในขวดขนาด 15 มิลลิลิตร | 74 |
| 3.33 | การตวงสารละลาย KI 0.2 M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่ชั่งตัวอย่างที่จะทดสอบสมบัติการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสง | 74 |
| 3.34 | การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงของวัสดุนาโนที่เตรียมโดยใช้แสง UV | 75 |
| 3.35 | การตกตะกอนสารตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Centrifugal | 75 |
| 3.36 | รูปเครื่อง UV Spectrophotometer (UV-1601 SHIMADZU) ใช้สำหรับวัดการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของ $I_3^-$ (สมบัติการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้แสง) ของวัสดุนาโนที่เตรียมได้ | 76 |
| 4.1 | แร่อิลเมไนท์วัตถุดิบตั้งต้น | 77 |
| 4.2 | a) แร่อิลเมไนท์ที่ล้างด้วย NaOH 5 รอบก่อนสังเคราะห์ b) ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ | 78 |
| 4.3 | โครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ (H = hydrogen titanate และ R = rutile $TiO_2$) | 80 |
| 4.4 | ภาพถ่าย SEM ของแร่อิลเมไนท์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น | 81 |
| 4.5 | ภาพถ่าย SEM ของ (a) แร่อิลเมไนท์บดแต่ไม่ผ่านการล้างด้วยสารละลาย NaOH (b) แร่อิล เมไนท์บดแต่ผ่านการล้างด้วยสารละลาย NaOH จำนวน 5 รอบ | 82 |

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 4.6 | ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (a) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า | 83 |
| 4.7 | ภาพถ่าย TEM ของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ (a) ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 285,000 เท่า | 84 |
| 4.8 | รูปแบบไอโซเทอร์มของท่อนาโนเตรียมที่ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง | 86 |
| 4.9 | ค่าความเข้มข้นของ $I_3^-$ ของท่อนาโนที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับเส้นใยนาโน, ท่อนาโนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้และวัสดุนาโน $TiO_2$ เชิงพาณิชย์ (P-25, JRC-01, JRC-03 และ white pigment) | 88 |

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | สภาวะการสังเคราะห์, ความเป็นผลึก และสิ่งที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ท่อนาโนแต่ละตัวอย่าง | 15 |
| 2.2 | สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นจากเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้, เส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ 400, 700, และ 1000 °C และ $TiO_2$ เชิงพาณิชย์ P-25 ที่เป็นตัวอ้างอิงและวัสดุประกอบแต่งระหว่าง $TiO_2$ เชิงพาณิชย์ P-25 กับเส้นใยนาโนที่ผ่านการปรับปรุงโดยความร้อนที่ 400 °C | 23 |
| 2.3 | องค์ประกอบทางเคมีของแร่อิลเมไนท์และเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ | 25 |
| 2.4 | พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET specific surface area) ของแร่อิลเมไนท์และเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ | 27 |
| 2.5 | สมบัติทางกายภาพทั่วๆ ไปของไททาเนียมไดออกไซด์ | 38 |
| 3.1 | ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย | 52 |
| 4.1 | องค์ประกอบทางเคมีของแร่อิลเมไนท์และตัวอย่างที่เตรียมได้ | 79 |
| 4.2 | พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (BET- specific surface area) | 86 |