สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

สารบัญ ฉ

สารบัญตาราง ญ

สารบัญรูปภาพ ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 11

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ 12

2.1 นาโนเทคโนโลยี 12

2.1.1 นาโนฟิสิกส์ 13

2.1.2 สมบัติเฉพาะของวัสดุนาโน 14

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide , TiO2) 15

2.2.1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 17

2.2 2 ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ 17

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3 กระบวนการซอลเจล (sol-gel process) 20
2.4 กระบวนการกลั่นไหลกลับ (reflux process) 21
2.5 Dye (N719) 23
2.6 องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 24
2.6.1 สีย้อมไวแสง (Dye sensitizer) 25
2.6.2 สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ 25
2.6.3 สารละลายอิเล็กโทรไลท์ 26
2.6.4 เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด 27
2.6.5 ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง 27
2.7 หลักการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 27
2.8 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 28
2.9 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) 30
2.9.1 กฎของแบรก์ (Bragg's law) 32
2.10 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี 35
2.11 รามาน สเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) 39
2.11.1 ปรากฏการณ์รามาน 40
2.11.2 สเปกตรัมรามาน 41
2.11.3 ข้อได้เปรียบของรามานสเปกโทรสโคปี 41
2.11.4 ส่วนประกอบของรามานสเปกโทรมิเตอร์ 41
2.11.5 สเปกโทรมิเตอร์การกระจายพลังงาน 42
2.12 การเปล่งแสงด้วยแสง (Photoluminescence; PL) 43
2.12.1 หลักการทำงานของ Photoluminescence; PL 43
2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 45
2.13.1 หลักการพื้นฐานการใช้งาน TEM 45
2.13.2 Bright-Field and Dark-Field images 48
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 49
2.14.1 อิเล็กตรอนทุติยภูมิ 53
2.14.2 หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน 53
2.14.3 การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 53

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.14.4 อันตรกิริยา และ ผลผลิต 54

2.14 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 56

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง 58

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง 60

3.1.1 สารเคมี 60

3.1.2 อุปกรณ์ 60

3.2 วิธีการทดลอง 61

3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน TiO_2 โดยวิธี ซอลเจล 62

3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน TiO_2 โดยวิธี กลั่นไหลกลับ 63

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของอนุภาคนาโน TiO_2 65

3.2.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 70

3.2.4.1 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์ 70

3.2.4.2 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด 70

3.2.4.3 ขั้นตอนการประกอบเซลล์ 71

3.3 การหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน TiO_2 71

3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 72

3.3.2 วิเคราะห์ด้วยการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องมือวัดการดูดกลืน 73

3.3.3 วิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี 74

3.3.4 วิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ 75

3.3.5 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบส่องกราด 76

3.3.6 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน 77

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 78

4.1 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน TiO_2 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจล และ วิธีกลั่นไหลกลับ 78

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction : XRD) 78
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 78
4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy : EDS 78
4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโน TiO_2 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) 85
4.1.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของอนุภาคนาโน TiO_2 โดยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี 87
4.1.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเครื่อง อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี 88
4.1.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะพฤติกรรมการเปล่งแสงของอนุภาคนาโน TiO_2 ด้วยเครื่องลูมิเนสเซนต์สเปกโทรสโกปี 91
4.2 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมจากอนุภาค TiO_2 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจลและวิธีกลั่นไหลกลับ 92
4.3 ผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 93
4.3.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 94

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 97

เอกสารอ้างอิง 99

รายการสิ่งตีพิมพ์ 105

ประวัติผู้เขียน 106

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 สมบัติทางกายภาพบางประการของ TiO_2 19

ตาราง 3.1 อัตราส่วนในการหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางของอนุภาค TiO_2 จากการเตรียม ด้วยวิธีซอลเจล และ การกลั่นไหลกลับ 67

ตาราง 3.2 อัตราส่วนในการหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางของอนุภาค TiO_2 จากการเตรียม ด้วยวิธีซอลเจลและวิธีกลั่นไหลกลับโดยได้ทำการเติม HNO_3, 65% ที่ความเข้มข้น 1 M 67

ตาราง 3.3 อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการสร้างฟิล์มบางของอนุภาค TiO_2 จากการเตรียมด้วย วิธีซอลเจและวิธีกลั่นไหลกลับโดยได้ทำการเติม HNO_3, 65% ที่ความเข้มข้น 1 M 68

ตาราง 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน TiO_2 จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจล วิธีการกลั่นไหลกลับและเทียบกับ TiO_2-P25 80

ตาราง 4.2 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ N719 94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพถ่าย SEM การปลูกแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย วิธีไฮโดรเทอร์มอ(Hydrothermal) 5

รูปที่ 1.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ของการปลูกแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 5

รูปที่ 1.3 วิธีการเตรียมแผ่นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้วย วิธีเลเยอบายเลเยอ (layer-by-layer method) 6

รูปที่ 1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี เลเยอบายเลเยอ (layer-by-layer method) 7

รูปที่ 1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม pH ของสารละลายกรด 8 HNO_3กับ ขนาด อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ 8

รูปที่ 16 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคกลั่นไหลกลับ 9

รูปที่ 17 ผลแสดงค่าข้อมูลจากการวิเคราะห์ผลของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคกลั่นไหลกลับ 9

รูปที่ 1.8 การเตรียมสารละลายในอัตราส่วนการโดยมวลของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อ แอมโมเนีย 10

รูปที่ 1.9 ค่าวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของสารตั้งต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้สีย้อมไวแสงเป็น N719 10

รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะขนาดระดับนาโนเมตรนี้เป็นขนาดของโมเลกุลสิ่งที่สามารถมองเห็น 13

รูปที่ 2.2 โครงสร้างแลตทิชเฟส อนาเทส กับเฟสรูไทล์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ 18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยา การสลายพันธะด้วยวิธีโซลเจล 21

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการโซลเจลจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 21

รูปที่ 2.5 กระบวนการเตรียมสารด้วยเทตนิครีฟลักซ์ (reflux) 22

รูปที่ 2.6 โครงสร้างสีย้อมไวแสง N719 23

รูปที่ 2.7 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง 24

รูปที่ 2.8 แสดงหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง 28

รูปที่ 2.9 กราฟ I-V (current – voltage curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ 29

รูปที่ 2.10 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์ 30

รูปที่ 2.11 แสดงภาพวาดสเปกตรัมรังสีเอกซ์จากอะตอมมิบดินัมที่พลังงาน31อิเล็กตรอน กระตุ้น 35 kV 31

รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยผลึก เมื่อมุมตกกระทบของรังสีเอกซ์เท่ากับ θ 33

รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง 35

รูปที่ 2.14 แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้น 36

รูปที่ 2.15 แสดงกระบวนการวัดการดูดกลืนแสง 37

รูปที่ 2.16 แสดงการกระเจิงแสงที่ตกกระทบวัตถุ 39

รูปที่ 2.17 แสดงระดับพลังงานของการกระเจิงแบบเรย์ลีสโตกรามานและแอนติสโตกรามาน 40

รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ 42

รูปที่ 2.19 แสดงการจัดชุดการทดลองสำหรับการวัด PL 44

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะอุปกรณ์ภายนอกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 45

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 2.21 รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบผลึกเดี่ยว (a) และ วัสดุแบบพหุผลึก (b) 46

รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน 46

รูปที่ 2.23 แสดงภาพแบบสว่าง bright-field (a) และ ภาพแบบมืด dark-field (b) 48

รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะอุปกรณ์ภายนอกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 49

รูปที่ 2.25 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 50

รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของ LM TEM และ SEM 50

รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบของปืนอิเล็กตรอน 51

รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 52

รูปที่ 2.29 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 52

รูปที่ 2.30 แสดงภาพถ่าย SEM ของ TiO_2จากสัญญาณ secondary electrons 55

รูปที่ 2.31 แสดงไดอะแกรมของเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 56

รูปที่ 2.32 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 57

รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนในการทดลอง 59

รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการซอลเจลจากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 63

รูปที่ 3.3 ลักษณะของผง TiO_2 จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจล 63

รูปที่ 3.4 ลักษณะของผง TiO_2 จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีกลั่นไหลกลับ 65

รูปที่ 3.5 กระจก FTO ขนาด ความยาว 2 cm ความกว้าง 1.5 cm 66

รูปที่ 3.6 อนุภาคนาโน TiO_2 + PVA ที่ผสมกันในอัตราส่วนโดยมวล 0.5 : 1 68

รูปที่ 3.7 อนุภาคนาโน TiO_2 + PVA ที่เคลือบฟิล์มบางบนกระจก FTO 69

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 3.8 ฟิล์มบาง อนุภาคนาโน TiO_2 + PVA ที่เผาอุณหภูมิ 450 ^oC เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 69

รูปที่ 3.9 กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วย Pt 71

รูปที่ 3.10 X-ray diffractometer 72

รูปที่ 3.11 UV-VIS Spectrophotometer 73

รูปที่ 3.12 Raman-spectroscopy 74

รูปที่ 3.13 Photo luminescence Spectrometer 75

รูปที่ 3.14 Field Emission Scanning Electron Microscope 76

รูปที่ 3.15 Transmission Electron Microscope 77

รูปที่ 4.1 ผล XRD ของ TiO_2 สังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจล (a) และการกลั่นไหลกลับ(b) เทียบกับ 80

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน TiO_2ที่ได้จาก การสังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจล ภายใต้การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมง 81

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ได้จากการ สังเคราะห์ ด้วยวิธีรีกลั่นไหลกลับ ภายใต้การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมง 81

รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM และค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโน TiO_2 –P25 เพื่อใช้เป็นตัวมาตรฐาน 82

รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโน TiO_2 จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีซอลเจล และ วิธีกลั่นไหลกลับ ภายใต้การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมง เทียบกับ TiO_2-P25 ด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy : EDS 84

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย TEM และ SAED pattern ของพบว่า อนุภาคนาโน TiO_2ได้จากการสังเคราะห์ ด้วย (a) วิธีโซลเจล และ (b) รีฟลักซ์ภายใต้การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมงและเทียบกับ (c) TiO_2-P25 86

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์จากเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีของอนุภาคนาโน 88

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

TiO_2ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีซอลเจลและวิธีกลั่นไหลกลับภายใต้การเผาด้วย
อุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมงและเทียบกับ TiO_2-P25

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์การดูดกลืนช่วงแสง UV-VIS 89
และค่าแถบพลังงานที่ได้จากการคำนวณของสมการ $(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n$
จากกราฟ UV-VIS ของอนุภาคนาโน TiO_2ได้จากการสังเคราะห์ ด้วย
วิธีซอลเจลและวิธีกลั่นไหลกลับภายใต้การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2
ชั่วโมงและเทียบกับ TiO_2-P25

รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค PL ของอนุภาคนาโน TiO_2 91
ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีซอลเจลและวิธีกลั่นไหลกลับภายใต้การ
เผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมงและเทียบกับ TiO_2-P25

รูปที่ 4.10. ภาพถ่าย SEM ฟิล์มบางของอนุภาคนาโน TiO_2 ที่เตรียมด้วยเทคนิค doctor-blade: 93
จากการสังเคราะห์ ด้วย (a) วิธีซอลเจล และ (b) วิธีกลั่นไหลกลับ ภายใต้การเผาด้วย
อุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมงและเทียบกับ TiO_2-P25 (c) และ(d) ภาพ cross section
ของฟิล์มบาง

รูปที่ 4.11 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงของอนุภาคนาโน 95
TiO_2ได้จากการสังเคราะห์ ด้วย วิธีซอลเจล และ วิธีกลั่นไหลกลับภายใต้
การเผาด้วยอุณหภูมิ 400 ^oC ใช้เวลา 2 ชั่วโมงและเทียบกับ TiO_2-P25

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการอักษรย่อ

^{o}C	องศาเซลเซียน
FF	Fill Factor
J_D	dark current density
J_{max}	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังสูงสุด
J_P	photo generated current densit
J_{sc}	short circuit current density
nm	นาโนเมตร
P_{in}	ผลรวมของกำลังของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์
T	อุณหภูมิ
V_{oc}	ความต่างศักย์วงจรเปิด
V_{max}	ศักย์ไฟฟ้าที่ให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการสัญลักษณ์

pH	ค่าที่แสดงความเป็นกรดเป็นเบสของสารเคมีจากปฏิกิริยา
λ	Lamda, ความยาวคลื่น
θ	Theta, ค่าระหว่างของมุม
μ	ค่าความถี่ของพลังงาน
Po	corrected incident radiant energy
dP	radiant power
%	ร้อยละ
e^-	อิเล็กตรอน
α	สัมประสิทธิ์การดูดกลื่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved