สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ		ง
บทคัดย่อภาษาไทย		จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ฉ
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญภาพ		ฎ
รายการอักษรย่อ/สัญลักษณ์		ท
บทที่ 1	บทนำ	1
1.1	ประวัติความเป็นมา/เหตุปัจจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2	วรรณกรรมปริทัศน์	3
2.1	การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์	3
2.2	สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	6
2.3	สีย้อม	17
2.4	วิธีการเตรียมโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต	21
2.5	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	23
2.6	สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	57
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	64
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	64
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	65
3.3	วิธีการสังเคราะห์วัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์ และบิสมัธวานาเดต	67
3.4	การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปหาลักษณะเฉพาะโดยเทคนิคต่างๆ	69
3.5	ขั้นตอนการทดสอบความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	71

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่สังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล 72

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 72

4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยเทคนิคบรูนัวร์เอ็มเม็ทและเทลเลอร์ 73

4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 74

4.4 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงโดยเทคนิคยูวีวิสดิฟฟิวส์รีเฟรกแทนสเปกโทรสโฟโตเมตทรี 78

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ เลขออกซิเดชันด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี 80

4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กโดยเทคนิคเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น 85

4.7 ผลการวิเคราะห์ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 86

4.8 การวัดสเปกตรัมการเรืองแสงโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี 96

4.9 กลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง 97

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่สังเคราะห์โดยวิธีเผาไหม้สารละลายร่วมกับไฮโดรเทอร์มอล 101

5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 101

5.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยเทคนิคบรูนัวร์เอ็มเม็ทและเทลเลอร์ 102

5.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดอนุภาคโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 103

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

	5.4	ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนโดยเทคนิคยูวีวิสดิฟฟิวส์รีเฟรกแทนสเปกโทรสโฟโตเมตทรี	107
	5.5	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ เลขออกซิเดชันด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี	108
	5.6	ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กโดยเทคนิคเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น	113
	5.7	ผลการวิเคราะห์ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	114
	5.8	การวัดสเปกตรัมการเรืองแสงโดยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี	121
	5.9	กลไกการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง	122
บทที่ 6	สรุปผลการทดลอง		125
	6.1	สรุปผลการทดลอง	125
เอกสารอ้างอิง			127
ภาคผนวก			138
ประวัติผู้เขียน			146

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของบิสมัธวานาเดตโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิกแบบซีไลท์ 8

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ 17

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเมทิลีนบลู 18

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของโรดามีนบี 19

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเมทิลออเรนจ์ 20

ตารางที่ 2.6 ชนิดของวัสดุออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการเผาไหม้สารละลาย 22

ตารางที่ 2.7 ความเป็นไปได้ของการหนีออกจากพื้นผิวของอิเล็กตรอนที่ความลึก d (P(d)) 50

ตารางที่ 4.1 ค่าพื้นที่ผิวของตัวอย่าง บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ โคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.2CoFe_2O_4$:$0.8BiVO_4$ 73

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที 88

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที 91

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที 92

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.2:0.8 สำหรับนำกลับมาใช้ใหม่จำนวน 5 รอบ 95

ตารางที่ 5.1 ค่าพื้นที่ผิวของตัวอย่าง บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ โคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.4CoFe_2O_4$:$0.6BiVO_4$ 102

ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.4:0.6 สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของโรดามีนบี ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที 118

ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์การกำหนดและค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.4:0.6 สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที 118

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	แถบช่องว่างพลังงานของตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ	4
ภาพที่ 2.2	การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบวิวิธพันธ์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์	5
ภาพที่ 2.3	โครงสร้างผลึกบิสมัธวานาเดต	7
ภาพที่ 2.4	โครงสร้างของโคบอลต์เฟอร์ไรต์	9
ภาพที่ 2.5	การจัดเรียงขั้วคู่ของแม่เหล็กแบบเฟอร์ริแมกเนติก	10
ภาพที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) หรือค่าสภาพแม่เหล็ก (M) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (H)	11
ภาพที่ 2.7	วงวนฮีสเตอรีซีส	13
ภาพที่ 2.8	เส้นโค้งการเหนี่ยวนำสภาพแม่เหล็ก สำหรับวัสดุแม่เหล็กอ่อนและวัสดุแม่เหล็กแข็ง	14
ภาพที่ 2.9	เส้นโค้งการเหนี่ยวนำสภาพแม่เหล็กที่ทำให้เกิดวงวนฮีสเตอรีซีส ภายในควอดแรนต์ที่สอง	15
ภาพที่ 2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองต่อแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก ของอนุภาคแม่เหล็กที่แสดงพฤติกรรมแม่เหล็กพาราซิ่งยวด	16
ภาพที่ 2.11	โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลีนบลู	18
ภาพที่ 2.12	โครงสร้างโมเลกุลของโรดามีนบี	19
ภาพที่ 2.13	โครงสร้างของเมทิลออเรนจ์	20
ภาพที่ 2.14	เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์	23
ภาพที่ 2.15	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
ภาพที่ 2.16	โครงสร้างภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
ภาพที่ 2.17	การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้น ความลึกต่างๆ	26
ภาพที่ 2.18	การเกิดรังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะของชั้นอิเล็กตรอน	29
ภาพที่ 2.19	การเกิดรังสีเอ็กซ์จากการถูกหน่วง	31
ภาพที่ 2.20	แผนภาพของส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	32
ภาพที่ 2.21	เครื่องวัดค่าศักย์ซีตา	33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.22 ผลของประจุของสารคอลลอยด์ที่มีต่อสภาวะของอนุภาค 33
ภาพที่ 2.23 ความเข้มข้นของไอออนิกและความแตกต่างของศักยภาพ จะเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากพื้นผิวประจุของอนุภาคแขวนลอยในจุดกึ่งกลางการกระจายตัว 34
ภาพที่ 2.24 ช่วงของค่าศักย์ซีตา ของอนุภาค 35
ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ซีตาและพีเอช 36
ภาพที่ 2.26 ลักษณะช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง และช่องว่างแถบพลังงานแบบไม่ตรง 40
ภาพที่ 2.27 การทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง 42
ภาพที่ 2.28 ตัวอย่างค่าพลังงานแถบช่องว่างของ $BiFeO_3$ (BFO) และ $Bi_{0.9}Sr_{0.1}FeO_3$ (BSFO) 43
ภาพที่ 2.29 สถานะพื้น (ground singlet state) สถานะกระตุ้น (excited singlet state) และสถานะกระตุ้นที่สาม (excited triplet state) 45
ภาพที่ 2.30 ระดับพลังงาน Jablonski เกี่ยวกับการดูดกลืนและการแผ่รังสี 46
ภาพที่ 2.31 กลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวจากรังสีเอ็กซ์ของเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์ 48
ภาพที่ 2.32 โฟโตอิเล็กตรอนพลังงาน ที่ถูกปลดปล่อยจากอะตอมในระดับความลึก d 48
ภาพที่ 2.33 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของอะตอม 49
ภาพที่ 2.34 ตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยที่ความลึกต่างกัน 50
ภาพที่ 2.35 รูปแบบฟังก์ชันของ P(d) และ (d /λ) 51
ภาพที่ 2.36 แบบจำลองในการพิจารณาพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน 53
ภาพที่ 2.37 องค์ประกอบโดยทั่วไปของสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์ 54
ภาพที่ 2.38 แสดงส่วนประกอบหลักของ VSM 56

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 72

ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) อนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ข) อนุภาคบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (ค) วัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.2CoFe_2O_4$:$0.8BiVO_4$ (ง) สเปกตรัมการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.2CoFe_2O_4$:$0.8BiVO_4$ 74

ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก-ข) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ค-ง) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (จ-ฉ) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.5CoFe_2O_4$:$0.5BiVO_4$ 76

ภาพที่ 4.4 (ก) ร้อยละการสะท้อนของแสง (ข) การดูดกลืนแสงของบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (ค) การดูดกลืนแสงของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ง) การดูดกลืนแสงของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.2CoFe_2O_4$:$0.8BiVO_4$ 78

ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมของธาตุโคบอลต์ ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.5:0.5 80

ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมของธาตุเหล็ก ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.5:0.5 81

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมของธาตุบิสมัธ ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของบิสมัธวานาเดต บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.5:0.5 82

ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมของธาตุวานาเดียม ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของบิสมัธวานาเดต บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.5:0.5 83

ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมของธาตุออกซิเจน ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.5:0.5 84

ภาพที่ 4.10 วงวนฮีสเตอรีซีสของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.2:0.8 85

ภาพที่ 4.11 ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (C/C_0) ในการย่อยสลาย เมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 86

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (C_0/C)$ กับ เวลา สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 87

ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงการย่อยสลายโรดามีนบี ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 89

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 89

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C_0/C) กับ เวลา สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของโรดามันบีภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 90

ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C_0/C) กับ เวลา สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.2:0.8 91

ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง zeta potential และค่าพีเอชเพื่อหาค่าศักย์ซีตาเท่ากับศูนย์บนพื้นผิวของอนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ 93

ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง zeta potential และค่าพีเอชเพื่อหาค่าศักย์ซีตาเท่ากับศูนย์บนพื้นผิวของอนุภาคบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ 93

ภาพที่ 4.19 ความสามารถการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.2:0.8 จำนวน 5 รอบ 94

ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C_0/C) กับ เวลา สำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.2:0.8 จำนวน 5 รอบ 95

ภาพที่ 4.21 การเปล่งแสงของ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.2:0.8 96

ภาพที่ 4.22 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง 98

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 101

ภาพที่ 5.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) อนุภาคโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ข) อนุภาคบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (ค) วัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.4CoFe_2O_4$:$0.6BiVO_4$ (ง) สเปกตรัมการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.4CoFe_2O_4$:$0.6BiVO_4$ 103

ภาพที่ 5.3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก-ข) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ค-ง) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (จ-ฉ) อนุภาคและริ้วของระนาบแลตทิซวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.4CoFe_2O_4$:$0.6BiVO_4$ 105

ภาพที่ 5.4 (ก) ร้อยละการสะท้อนของแสง (ข) การดูดกลืนแสงของบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ (ค) การดูดกลืนแสงของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ (ง) การดูดกลืนแสงของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ $0.4CoFe_2O_4$:$0.6BiVO_4$ 107

ภาพที่ 5.5 สเปกตรัมของธาตุโคบอลต์ ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 108

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.6 สเปกตรัมของธาตุเหล็ก ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 109

ภาพที่ 5.7 สเปกตรัมของธาตุบิสมัธ ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของบิสมัธวานาเดต บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 110

ภาพที่ 5.8 สเปกตรัมของธาตุวานาเดียม ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของบิสมัธวานาเดต บริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 111

ภาพที่ 5.9 สเปกตรัมของธาตุออกซิเจน ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 112

ภาพที่ 5.10 วงวนฮีสเตอรีซีสของโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 113

ภาพที่ 5.11 ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (C/C_0) ในการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาทีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 114

ภาพที่ 5.12 ความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (C/C_0) ในการย่อยสลายเมทิลีนบลูภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาทีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ ที่ช่วงค่า C/C_0 เท่ากับ 0 – 0.2 114

ภาพที่ 5.13 กราฟแสดงการย่อยสลายโรดามีนบี ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 115

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.14 กราฟแสดงการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 116

ภาพที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C_0/C) กับ เวลา สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของโรดามีนบีภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.4:0.6 117

ภาพที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln (C_0/C) กับ เวลา สำหรับการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงวิสิเบิล เป็นเวลา 240 นาที โดยโคบอลต์เฟอร์ไรต์บริสุทธิ์ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.4:0.6 117

ภาพที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง zeta potential และค่าพีเอชเพื่อหาค่าศักย์ซีตาเท่ากับศูนย์บนพื้นผิวของอนุภาคบิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์ 119

ภาพที่ 5.18 ความสามารถการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต ที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 จำนวน 5 รอบ 120

ภาพที่ 5.19 การเปล่งแสงของ บิสมัธวานาเดตบริสุทธิ์และวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดตที่อัตราส่วนโดยโมล 0.4:0.6 121

ภาพที่ 5.20 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของวัสดุผสมนาโนโคบอลต์เฟอร์ไรต์และบิสมัธวานาเดต เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง 122

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการอักษรย่อ

$CoFe_2O_4$	โคบอลต์เฟอร์ไรต์
$BiVO_4$	บิสมัธวานาเดต
OH^{-}	ไฮดรอกไซด์อิออน
$OH^{\bullet}$	ไฮดรอกซิลเรดิเคิล
$O_2^{\bullet-}$	ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิเคิล
H_2O_2	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
MB	เมทิลีนบลู
RhB	โรดามีนบี
MO	เมทิลออเรนจ์
SCS	กระบวนการเผาไหม้สารละลาย
XRD	เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
SEM	เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
EDS	เทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์
TEM	การวิเคราะห์สารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
BET	การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ
UV-vis DRS	เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีแบบดิฟฟิวรีแฟรกแทนต์
PL	เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี
XPS	เทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์
VSM	เครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น
hkl	ระยะห่างระหว่างระนาบ
JCPDS	joint committee on powder diffraction standards

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการสัญลักษณ์

h^+	โฮล
e^-	อิเล็กตรอน
E	พลังงานควอนตัม
h	ค่าคงที่ของแพลงค์
ν	ความถี่ของคลื่นแสง
λ	ความยาวคลื่นแสง
c	ความเร็วของคลื่นแสง
H	สนามแม่เหล็กภายนอก
B	ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
M	ค่าสภาพแม่เหล็ก
μ_0	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของช่องว่างอิสระ
ζ	ศักย์ไฟฟ้าซีตา
$F(R_\infty)$	ฟังก์ชันของ Kubelka-Munk
E_g	ค่าแถบช่องว่างพลังงาน
E^0	standard redox potential
χ	ค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved