# สารบัญ


หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค

บทคัดย่อภาษาไทย ง

ABSTRACT ฉ

สารบัญตาราง ฌ

สารบัญรูปภาพ ญ

รายการอักษรย่อ/สัญลักษณ์ ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 3
1.2 วิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา 10
1.3 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11
1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 20
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา เชิงทฤษฎี หรือเชิงประยุกต์ 20
1.6 แผนดำเนินงาน ขอบเขต และวิธีการวิจัย 21

บทที่ 2 วิธีการทดลอง 22

2.1 สารเคมี 22
2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ 23
2.3 กระบวนการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 24
2.4 กระบวนการทดสอบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้ 27
2.5 เทคนิควิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้ 31



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


บทที่ 3 ผลการทดลอง 46

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา และธาตุองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 46

3.2 การทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงผ่านปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิล 50

3.3 การอธิบายการเกิดโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารคอมโพสิทที่ส่งผลต่อการปรับปรุงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 55

3.4 การอธิบายกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยการทดสอบหาแอคทีฟสปีชีส์หลัก 60

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง 64

เอกสารอ้างอิง 66

ภาคผนวก 81

ประวัตผู้เขียน 88



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# สารบัญตาราง

หน้า


ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบสภาวะในการสังเคราะห์ BiOI โดยวิธีตกตะกอน และสมบัติบางประการของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ 13

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบสภาวะในการสังเคราะห์ α-SnS โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล และสมบัติบางประการของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ 15

ตารางที่ 1.3 ชนิดวัสดุคอมโพสิท ประสิทธิภาพการใช้งาน และแผนภาพระดับพลังงานของวัสดุคอมโพสิทประเภท 2 18

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของ SnS ที่ใช้ในการสังเคราะห์สารคอมโพสิท SnS/BiOI ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ 24

ตารางที่ 2.2 โครงสร้าง คุณสมบัติ และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่ใช้ในการทดสอบ 38

ตารางที่ 3.1 ประสิทธิภาพและค่าคงที่อัตราในการย่อยสลาย MO ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 51

ตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้ 54

ตารางที่ 3.3 ตำแหน่งพีค CL และค่า VBM ที่ใช้ในการคำนวณค่า VBO ของสารคอมโพสิท SnS/BiOI 57

ตารางที่ 3.4 สารดักจับแอคทีฟสปีชีส์ที่ใช้ในกระบวนการทดสอบหาแอคทีฟสปีชีส์หลักในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 61



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# สารบัญภาพ

หน้า


| | | |
|---|---|---|
| รูปที่ 1.1 | ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี | 3 |
| รูปที่ 1.2 | สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า | 4 |
| รูปที่ 1.3 | ช่องว่างแถบพลังงานของสารตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน | 6 |
| รูปที่ 1.4 | สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น | 6 |
| รูปที่ 1.5 | สารกึ่งตัวนำประเภทพี | 7 |
| รูปที่ 1.6 | แผนภาพระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง และช่องว่างแถบพลังงานแบบอ้อม | 8 |
| รูปที่ 1.7 | กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบนสารกึ่งตัวนำ | 9 |
| รูปที่ 1.8 | แผนภาพเครื่องมือในการสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล | 10 |
| รูปที่ 1.9 | โครงสร้างผลึกของ BiOI | 11 |
| รูปที่ 1.10 | โครงสร้างของ BiOI แบบเป็นชั้นซ้อนกันในทิศทางตั้งฉากแกน c ภาพโครงสร้างแบบชั้นเดียว และรูปร่างโคออร์ดิเนชันของอะตอม Bi ใน BiOI | 12 |
| รูปที่ 1.11 | โครงสร้างผลึกของทินซัลไฟด์ | 14 |
| รูปที่ 1.12 | การรวมกันใหม่ของ $e^-$ และ $h^+$ เนื่องมาจากจุดบกพร่องภายในวัสดุและบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา | 16 |
| รูปที่ 1.13 | ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ | 17 |
| รูปที่ 1.14 | แผนภาพแถบพลังงานของวัสดุคอมโพสิท SnS/BiOI | 20 |
| รูปที่ 2.1 | แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ SnS | 25 |
| รูปที่ 2.2 | แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ BiOI และสารคอมโพสิท SnS/BiOI | 26 |
| รูปที่ 2.3 | ผงตัวเร่งปฏิกิริยา SnS, BiOI, 10%SnS/BiOI และ 20%SnS/BiOI ที่สังเคราะห์ได้ | 26 |
| รูปที่ 2.4 | เครื่องทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง | 27 |
| รูปที่ 2.5 | ปฏิกิริยาการเกิด HTA ระหว่าง TA และ •OH | 30 |
| รูปที่ 2.6 | เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า | 31 |
| รูปที่ 2.7 | การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก | 32 |


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า


| | | |
|---|---|---|
| รูปที่ 2.6 | เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า | 31 |
| รูปที่ 2.7 | การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก | 32 |
| รูปที่ 2.8 | ส่วนประกอบของเครื่อง SEM | 33 |
| รูปที่ 2.9 | ชนิดของอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวหน้าของชิ้นงาน | 34 |
| รูปที่ 2.10 | หลักการเกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ | 35 |
| รูปที่ 2.11 | ส่วนประกอบของเครื่อง TEM | 36 |
| รูปที่ 2.12 | การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนบนผิวของวัสดุเป็นชั้นๆ | 37 |
| รูปที่ 2.13 | ส่วนประกอบของเครื่อง UV-vis แบบลำแสงคู่ | 39 |
| รูปที่ 2.14 | ผล UV-vis DRS ของ BiOI และ $Bi_2WO_6$ | 40 |
| รูปที่ 2.15 | ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก | 41 |
| รูปที่ 2.16 | ส่วนประกอบของเครื่อง XPS | 42 |
| รูปที่ 2.17 | แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski เกี่ยวกับการดูดกลืนและการแผ่รังส | 43 |
| รูปที่ 2.18 | ส่วนประกอบเครื่องวัดฟลูออเรสเซนต์ | 44 |
| รูปที่ 2.19 | ผล LSV ของ ZnO, ZnO/Au และ $ZnO/Au/Al_2O_3$ ภายใต้การฉายแสงอาทิตย์ | 45 |
| รูปที่ 3.1 | XRD pattern ของ SnS, BiOI และสารคอมโพสิท SnS/BiOI ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆที่สังเคราะห์ได้ | 47 |
| รูปที่ 3.2 | ภาพ SEM ของ SnS, BiOI, สารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI และสเปกตรัม EDX ของสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 48 |
| รูปที่ 3.3 | ผลการทดสอบ elemental mapping ของสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 49 |
| รูปที่ 3.4 | ภาพ TEM และ HRTEM ของสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 50 |
| รูปที่ 3.5 | ผลการย่อยสลาย MO ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างๆ โดยพล็อตระหว่างค่า $C/C_0$ และเวลาการย่อยสลาย | 51 |
| รูปที่ 3.6 | ผลการย่อยสลาย MO ภายใต้การฉายแสงวิสิเบิลของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างๆ โดยพล็อตระหว่างค่า $\ln(C/C_0)$ และ เวลาในการฉายแสง | 52 |


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า


| | | |
|---|---|---|
| รูปที่ 3.7 | ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆของ BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 53 |
| รูปที่ 3.8 | การทดสอบประสิทธิภาพการการนำกลับมาใช้ใหม่ในการย่อยสลาย MO ของ BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 55 |
| รูปที่ 3.9 | สเปกตรัม XPS ของออร์บิทัล Sn 3d ของ SnS และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI, ออร์บิทัล Bi 4f ของ BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI, สเปกตรัม VB-XPS ของ SnS และ BiOI และค่าช่องว่างแถบพลังงานของ SnS และ BiOI | 56 |
| รูปที่ 3.10 | แผนภาพแถบพลังงานของสารคอมโพสิท SnS/BiOI | 58 |
| รูปที่ 3.11 | สเปกตรัม PL ของ BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 59 |
| รูปที่ 3.12 | ผล LSV ของ BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 60 |
| รูปที่ 3.13 | ผลการทดสอบหาแอคทีฟสปีชีส์หลักในการย่อยสลาย MO ในระบบของ SnS, BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI | 62 |
| รูปที่ 3.14 | สเปกตรัม PL ของ TA (Blank), SnS, BiOI และสารคอมโพสิท 10%SnS/BiOI ที่ตรวจวัดได้ ที่เวลา 1 ชั่วโมง | 62 |



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

# รายการอักษรย่อ

| | |
|---|---|
| SnS | Tin (II) sulfide |
| BiOI | Bismuth (III) oxyiodide |
| XRD | X-ray diffraction |
| SEM | Scanning electron microscope |
| TEM | Transmission electron microscope |
| EDX | Energy dispersive X-ray spectroscopy |
| XPS | X-ray photoelectron spectroscopy |
| UV–vis DRS | UV–vis diffuse reflectance spectroscopy |
| PL | Photoluminescence |
| $e^-$ | Electron |
| $h^+$ | Hole |
| $^\bullet OH$ | Hydroxyl radical |
| $O_2^{\bullet -}$ | Superoxide radical |
| nm | Nanometer |
| µm | Micrometer |
| ºC | Degree Celsius |
| eV | Electron volt |

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved