

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	3
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับซิงก์ออกไซด์	3
2.1.1 สมบัติทั่วไปของซิงก์ออกไซด์	3
2.1.2 โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์	4
2.1.3 การนำซิงก์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้	5
2.2 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	6
2.2.1 วิธีการตกตะกอน (Precipitation method)	6
2.2.2 วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)	8
2.2.3 วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)	9
2.2.4 วิธีการทำให้แห้งแบบละออง (Spray-drying method)	9
2.2.5 วิธีระเหยแห้ง (Evaporation method)	10
2.2.6 วิธีซอล-เจล (Sol-gel method)	10
2.2.7 เฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame Spray Pyrolysis (FSP))	11
2.3 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)	12
2.3.1 การเผาแคลไซน์ (Calcination)	12
2.3.2 การเผาสารแบบซินเตอร์ (Sintering)	13
2.4 สารกึ่งตัวนำโฟโตแคทาไลซิส (Semiconductor Photocatalysis)	13
2.4.1 สมบัติอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ	13

2.4.2 กลไกของสารกึ่งตัวนำโฟโตแคทาไลซิสซิงก์ออกไซด์	14
2.4.3 ผลของโลหะต่อปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติก	16
2.5 การหาลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่าง	19
2.5.1 การวิเคราะห์สารด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)	19
2.5.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	19
2.5.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	21
2.5.2.3 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์	22
2.5.2 การวิเคราะห์สารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)	23
2.5.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	24
2.5.2.2 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	25
2.5.2.2.1 ระบบแสง	25
2.5.2.2.2 ระบบภาพ	27
2.5.2.2.3 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)	28
2.5.2.3 การวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)	29
2.5.3 การวิเคราะห์โดยเทคนิคเอสทีอีเอ็ม (Scanning-Transmission electron microscopy (STEM))	31
2.5.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารโดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area analyzer)	32
2.5.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้น	33
2.5.4.2 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องวัดพื้นที่ผิว	35
2.5.4.3 การเตรียมตัวอย่าง	38
2.6 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	47
3.1 สารเคมี	47
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	47

3.3	ลักษณะเฉพาะเครื่องเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส	48
3.4	วิธีการทดลอง	49
3.4.1	เตรียมสารตั้งต้นเพื่อใช้ในเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส	49
3.4.2	วิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ และเพอเลเดียม เจืออนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส	50
3.4.3	การสอบเทียบโฟโตแคทาลิติก รีเอกเตอร์	52
3.4.4	การทดสอบความสามารถโฟโตแคทาลิติก	53
3.5	การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อหาลักษณะเฉพาะ	54
3.5.1	การเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์	54
3.5.2	การเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน, การวิเคราะห์ด้วยการกระจาย พลังงานของรังสีเอกซ์ และการวิเคราะห์โดยเทคนิคเอสทีอีเอ็ม	54
3.5.3	การเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิว	54
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	55
4.1	ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยเพอเลเดียม	55
4.2	ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	57
4.3	ผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	58
4.3.1	ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	58
4.3.2	ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย เพอเลเดียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	60
4.4	ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือ ด้วยเพอเลเดียมด้วยเทคนิคเอสทีอีเอ็ม	65
4.5	ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่าง	67
4.6	การทดสอบความสามารถโฟโตแคทาลิติก	68
4.6.1	ผลการสอบเทียบโฟโตแคทาลิติก รีเอกเตอร์	68

4.6.2 การทดสอบความสามารถโฟโตแคทาลิติก สำหรับการย่อยสลายเมทานอล และซูโครส	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	82
ภาคผนวก ข การคำนวณ และข้อมูล JCPDS	85
ประวัติผู้เขียน	89

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเอกซเรย์ดิจิทัลแฟรกชัน	21
2.2 ปริมาณสารที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้นเพื่อใช้ในฟิล์มสเปรย์ไฟโรลิซิส	50
4.1 เปรียบเทียบปริมาณผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยฟิล์มสเปรย์ไฟโรลิซิสในทางทฤษฎี และที่สังเคราะห์ได้จริง	56
4.2 ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ โดยวิธีฟิล์มสเปรย์ไฟโรลิซิส	56
4.3 ค่าพื้นที่ผิวเฉพาะ และขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ที่เจือ ด้วยแพลเลเดียมที่ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยโมล	67
4.4 ค่านำไฟฟ้า และจำนวนการรับอนที่อยู่ในรีเอกเตอร์ของช่วงต่างๆ ในรูป 4.13 และ ค่าของ $\ln(\Delta K)$ และ $\ln(\Delta C)$ ที่คำนวณได้	69
4.5 เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายเมทานอล และซูโครสจนเสร็จสิ้น เมื่อใช้ตัวโฟโตแคทาไลสต์ ต่างๆ	72

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1	แสดงปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติกของอนุภาคสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานแสง
2.1	(a) เซลล์หน่วยของโครงสร้างเวอร์ดไซต์ และ (b) เซลล์หน่วยอยู่ในโครงสร้างเวอร์ดไซต์
2.2	ไดอะแกรมแสดงลำดับของวิธีการสังเคราะห์ผงด้วยวิธีการตกตะกอน
2.3	ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ผงด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล
2.4	กลไกการเกิดอนุภาคโดยเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส
2.5	แผนผังขั้นตอนการเผาแคลไซน์
2.6	ผลของจำนวนอะตอม (N) ต่อโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ของสารกึ่งตัวนำ
2.7	กลไกไฟฟ้าเคมีของอนุภาคซิงก์ออกไซด์เมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ก่อนและหลังถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต
2.8	เส้นทางที่เป็นไปได้ของประจุพาหะ (e^- และ h^+) ที่เกิดขึ้นเมื่อซิงก์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง
2.9	อิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ผิวรอยต่อระหว่าง ZnO และโลหะ ที่เคลื่อนผิวทำให้การแยกของประจุ (charge separation) เพิ่มขึ้น
2.10	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
2.11	แผนภาพการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD
2.12	หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์
2.13	ภาคตัดขวางของหลอดผลิตรังสีเอกซ์
2.14	แผนภาพของส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
2.15	ไดอะแกรมแสดงการเกิดลำแสงอิเล็กตรอน
2.16	ไดอะแกรมแสดงแนวโค้งของอิเล็กตรอนที่วิ่งเฉียงผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอ
2.17	การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แสง กับกล้อง SEM และ TEM

2.18	การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ	30
2.19	การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน	31
2.20	แผนภาพแสดงระบบของเทคนิคเอสทีอีเอ็ม	32
2.21	กราฟที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ BET	35
2.22	หลักการทำงานของเครื่องวัดพื้นที่ผิว	36
2.23	แผนผังการสังเคราะห์ ZnO ด้วยกระบวนการแอซีเตด-ซิเตรตเจล	39
2.24	แผนภาพการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ZnO ด้วยกระบวนการของสารประกอบ เชิงซ้อนพอลิเมอร์	41
2.25	แผนภาพแสดงการตกตะกอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์โดยใช้ระบบ ไมโครอิมัลชันของ Zn-AOT/เอทานอล/ไอโซออกเทน	42
2.26	แผนภาพการสังเคราะห์อนุภาค ZnO ด้วยกระบวนการตกตะกอนแบบ เปลี่ยนแปลงเฟส	43
4.1	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จาก ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และ ซิงก์ออกไซด์เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยโมล เปรียบเทียบกับ JCPDS file No. 89-0510 ซึ่งเป็นซิงก์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	57
4.2	ภาพถ่ายไบรท์ฟิลด์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์	59
4.3	สเปกตรัมจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ใน บริเวณทั้งหมดของรูป 4.2	59
4.4	ภาพถ่ายไบรท์ฟิลด์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย แพลเลเดียมร้อยละ 0.25 โดยโมล	60
4.5	สเปกตรัมจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ใน บริเวณทั้งหมดของรูป 4.4	61
4.6	ภาพถ่ายไบรท์ฟิลด์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย แพลเลเดียมร้อยละ 0.5 โดยโมล	61
4.7	สเปกตรัมจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ใน บริเวณทั้งหมดของรูป 4.6	62

4.8	ภาพถ่ายโปรไฟล์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 0.75 โดยโมล	62
4.9	สเปกตรัมจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ในบริเวณทั้งหมดของรูป 4.8	63
4.10	ภาพถ่ายโปรไฟล์ และรูปแบบการเลี้ยวเบนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 โดยโมล	63
4.11	สเปกตรัมจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ในบริเวณทั้งหมดของรูป 4.10	64
4.12	(a) ภาพถ่ายเอสทีอีเอ็มของผงอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 1.0 โดยโมล, (b), (c) และ (d) โหมดแมปปิงของเทคนิคเอสทีอีเอ็มแสดงการกระจายตัวของซิงก์, แพลเลเดียม และ ออกซิเจน ในรูป a ตามลำดับ	66
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านำไฟฟ้า และเวลา เมื่อฉีดซูโครสที่มีจำนวนคาร์บอน 100, 300, 500 และ 700 อะตอม ตามลำดับลงในโฟโตแคทาไลติก รีแอคเตอร์ที่มีซิงก์ออกไซด์เป็นตัวโฟโตแคทาไลสต์	68
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\Delta C)$ และ $\ln(\Delta K)$ เมื่อ C คือจำนวนคาร์บอนอะตอมในรีแอคเตอร์ และ K คือค่านำไฟฟ้า	70
4.15	กราฟปริมาณเมทานอลที่ย่อยสลายเทียบกับเวลาเมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยโมล เป็นตัวโฟโตแคทาไลสต์	71
4.16	กราฟปริมาณซูโครสที่ย่อยสลายเทียบกับเวลาเมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมร้อยละ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 โดยโมล เป็นตัวโฟโตแคทาไลสต์	71
4.17	การถ่ายเทประจุของอิเล็กตรอนจากซิงก์ออกไซด์ไปสู่ออกซิเจนโดยผ่านโลหะที่เคลือบอยู่ที่ผิวของซิงก์ออกไซด์ และผลของขนาดของควอนตัมของโลหะที่เคลือบอยู่ที่ผิวของซิงก์ออกไซด์	74

อักษรย่อและสัญลักษณ์

θ (theta)	มุมการเลี้ยวเบน
a.u.	arbitrary unit
amu	atomic mass unit
BET	Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E.
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EELS	Electron Energy Loss Spectrometry
FSP	Flame Spray Pyrolysis
JCPDS	Joint Committee for Powder Diffraction Standards
nm	นาโนเมตร
Pd	แพลเลเดียม
pH	ค่าความเป็นกรด-เบส
ppb	ส่วนในพันล้านส่วน
SEI	Secondary Electron Image
SEM	Scanning Electron Microscopy
STEM	Scanning-transmission electron micropy
STP	Standard Temperature and Pressure
TEM	Transmission Electron Microscopy
TG/DSC	Thermogravimetric/Differential Scanning Calorimetry
UV LEDs	ไดโอดเปล่งแสงยูวี
XRD	X-ray Diffraction
ZnO	ซิงก์ออกไซด์