

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



248695

ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถเร่งปฏิกิริยาคีวแสงของ
อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีบด-เจดแบบคัลแปร

ทฤษฎี พงษ์วัน

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2555



248695

ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ
อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบดัดแปร



พฤษัย พงษ์วัน

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2555

ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ
อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบดัดแปร

พฤษัย พงษ์วัน

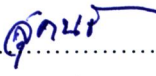
วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. อุดม ศรีโยธา


.....
อาจารย์ ดร. นัสดา เวชชากุล


.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุคนธ์ พานิชพันธ์


.....กรรมการ
อาจารย์ ดร. นุรภัทร์ อินทรีย์สังวร

16 มีนาคม 2555

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการช่วยเหลือแนะนำ ให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาทั้งทางด้านวิชาการและทางปฏิบัติของ ดร.นัสดา เวชชากุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุดม ศรีโฆธา รองศาสตราจารย์ ดร. สุคนธ์ พานิชพันธ์ อาจารย์ ดร. นัสดา เวชชากุล และอาจารย์ ดร. บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร ที่ให้ความกรุณาและเสียสละเวลาในการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอบคุณ สมาชิก Nanoscience Research Laboratory ทุกคน และบุคคลผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อ บิดา มารดา ผู้ซึ่งให้กำเนิด ให้ความรัก ความเมตตา ให้การอบรมสั่งสอน และให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้ตลอดมา

พฤชัย พงษ์วัน

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์

ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถเร่ง
ปฏิกิริยาดำแสงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
ที่สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบดัดแปร

ผู้เขียน

นายพฤษัย พงษ์วัน

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. นัคดา เวชชากุล

บทคัดย่อ

248695

อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 0.5–7.0 โดยอะตอม และเจือด้วยทองแดงร้อยละ 0.5–5.0 โดยอะตอม ได้สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบดัดแปร เทคนิคการหาลักษณะเฉพาะทางกายภาพ ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เทคนิคบีอีทีสำหรับหาพื้นที่ผิวจำเพาะ เทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี และเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์พบว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างมีโครงสร้างเป็นแบบเฟสผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ โดยที่ปริมาณเฟสอะนาเทสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือด้วยเหล็กและทองแดง จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างนั้นมีลักษณะคล้ายทรงกลม โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กมีขนาดอยู่ระหว่าง 6–40 นาโนเมตร และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงมีขนาดอนุภาคนาโนระหว่าง 10–45 นาโนเมตร และทุกตัวอย่างมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 87–134 ตารางเมตรต่อกรัม จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดงมีการดูดกลืนแสงในช่วงของแสงวิสิเบิล การศึกษาการเร่งปฏิกิริยาดำแสงในการย่อยสลายกรดออกซาลิกและกรดฟอริกภายใต้แสงวิสิเบิล พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดงมีประสิทธิภาพสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Degussa P25)

Thesis Title	Effect of Transition Metal Ions on Photocatalytic Ability of Titanium Dioxide Nanoparticles Synthesized by the Modified Sol-Gel Method
Author	Mr. Paruchai Pongwan
Degree	Master of Science (Materials Science)
Thesis Advisor	Dr. Natda Wetchakun

ABSTRACT

248695

Bare TiO_2 , Fe-doped TiO_2 , and Cu-doped TiO_2 nanoparticles with different doping amounts of nominal Cu in the range of 0.5–5.0 at% and nominal Fe in the range of 0.5–7.0 at% were synthesized by the modified sol-gel method. The samples were physically characterized in order to obtain the correlation between structure and photocatalytic properties by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), Brunauer, Emmett and Teller (BET), UV-vis diffuse reflectance spectrophotometry (UV-vis DRS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). XRD results indicated that phase structures of all samples were the mixture of anatase and rutile phases. The content of anatase phase in TiO_2 nanoparticles increased with increasing doping amount of Fe and Cu. TEM and SEM images revealed that the shape of all samples were spherical with the average particle size in the range of 6–40 nm for Fe-doped TiO_2 and 10–45 nm for Cu-doped TiO_2 . Specific surface areas of all samples were found in the range of 87–134 m^2/g . The results from UV-vis reflectance spectra clearly indicated the shift of absorption band edge towards visible region upon doping TiO_2 with Fe and Cu. Photocatalytic activity of all samples was examined by studying the mineralization of oxalic and formic acids under visible light irradiation. The results clearly showed that Fe-doped TiO_2 and Cu-doped TiO_2 sample exhibited higher activity than bare TiO_2 and TiO_2 commercial (Degussa P25).

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา	5
2.1.1 นิยาม	5
2.1.2 ชนิดของการเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา	5
2.1.3 เทอมที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา	7
2.1.4 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส	11
2.1.5 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	12
2.1.6 พลังงานแสง	15
2.2 ข้อมูลพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.2.1 สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	18
2.3 วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	19
2.3.1 วิธีการตกตะกอนร่วม	20
2.3.2 วิธีซอล-เจล	20
2.3.3 วิธีไฮโดรเทอร์มอล	20

2.3.4	วิธีการระเหยแห้ง	20
2.3.5	วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	21
2.4	กรรมวิธีทางความร้อน	22
2.4.1	การเผาแคลไซน์	22
2.4.2	การเผาซินเตอร์	23
2.5	หลักการและทฤษฎีสำหรับเทคนิคต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะทางกายภาพ	23
2.5.1	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	23
2.5.2	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
2.5.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์	28
2.5.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	30
2.5.5	การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนโดยวิธี BET	31
2.5.6	การวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	33
2.5.7	การวิเคราะห์โดยเทคนิคอุณหภูมิตวิติเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี	34
2.6	สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3	วิธีการทดลอง	43
3.1	การสังเคราะห์	43
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์	43
3.1.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์	43
3.1.3	การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดงโดยวิธีโซล-เจลแบบคัดแปร	45
3.1.3.1	การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	45
3.1.3.2	การเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดง	45
3.2	วิธีการหาลักษณะเฉพาะและวิธีการวิเคราะห์	48

3.2.1 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค XRD	48
3.2.2 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค SEM และ EDS	48
3.2.3 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค TEM	49
3.2.4 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FTIR	49
3.2.5 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค UV-vis DRS	50
3.2.6 การหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค BET	51
3.3 การทดสอบการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน	51
3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	55
4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดง	55
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	56
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	57
4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	59
4.3 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค UV-vis diffuse reflectance spectrophotometry	62
4.3.1 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค UV-vis DRS ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	62
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค UV-vis DRS ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	65
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ	66
4.4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	68

4.4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	68
4.5 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เทคนิคการกระจายพลังงาน รังสีเอกซ์ (Energy dispersive X-ray spectroscopy with SEM instrument, SEM-EDS)	69
4.5.1 ผลการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค SEM และ เทคนิค SEM-EDS ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์	69
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค SEM และ เทคนิค SEM-EDS ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	71
4.5.3 ผลการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค SEM และ เทคนิค SEM-EDS ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	74
4.6 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องผ่าน(Transmission electron microscopy, TEM)	78
4.6.1 ผลและการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค TEM ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์	78
4.6.2 ผลและการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค TEM ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	79
4.6.3 ผลและการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิค TEM ของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	82
4.7 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalytic activity)	85
4.7.1 การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของกรดออกซาลิก	85
4.7.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำแสง ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	87
4.7.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาดำแสง ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	90
4.7 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)	94

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	100
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	108
ประวัติผู้เขียน	129

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างสารเคมีซึ่งสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยา	6
2.2 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์	7
2.3 เปรียบเทียบการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์	8
2.4 สมบัติทั่วไปทางกายภาพและเชิงกลของไทเทเนียมไดออกไซด์	17
2.5 คุณสมบัติทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	18
4.1 ลักษณะทางกายภาพ และน้ำหนักของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ บริสุทธิ์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและทองแดง	55
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจือด้วยเหล็กที่ปริมาณต่างๆ กับค่ามุม 2θ	57
4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรหน่วยเซลล์ของโครงสร้างเฟสของ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	57
4.4 องค์ประกอบเฟส และขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	58
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจือด้วยทองแดงที่ปริมาณต่างๆ กับค่ามุม 2θ	60
4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรหน่วยเซลล์ของโครงสร้างเฟสของ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	60
4.7 องค์ประกอบเฟส ขนาดผลึก และพื้นที่ผิวจำเพาะของ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่เคลือบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	61
4.8 แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	64
4.9 แถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	67
4.10 พื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	68
4.11 พื้นที่ผิวจำเพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	69

4.12 ขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	74
4.13 องค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	74
4.14 ขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยแดง	74
4.15 องค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เจือด้วยทองแดง	78
4.16 ข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของกรดออกซาลิก	86
4.17 สรุปความถี่และชนิดของการสั่นในอินฟราเรดสเปกตรัมของกรดออกซาลิก และกรดฟอรั่มิก	98

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 เปรียบเทียบพลังงานของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	9
2.2 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	11
2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ถูกกระตุ้นด้วยแสง	12
2.4 กลไกของการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะ	14
2.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	16
2.6 องค์ประกอบหลักของรังสียูวี	17
2.7 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของการเผาแคลไซน์	22
2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์	24
2.10 องค์ประกอบของเครื่อง SEM	25
2.11 สัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับวัสดุตัวอย่าง	26
2.12 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่าง ที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ	28
2.13 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน	29
2.14 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	30
2.15 กราฟการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับของแก๊สด้วยวิธี BET	30
2.16 กราฟที่ได้จากการคำนวณในเส้นตรงของสมการ	32
2.17 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง	35
2.18 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	36
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับสังเคราะห์ด้วยวิธีซอล-เจล	46
3.2 ลำดับขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีซอล-เจล	47
3.3 แผนผังของ photoreactor	51
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	56

4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	59
4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	63
4.4 สเปกตรัมการหาแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	64
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	65
4.6 สเปกตรัมการหาแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทางการค้า (Degussa P25)	66
4.7 ภาพถ่าย SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์	70
4.8 ภาพถ่าย SEM และ สเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 0.5 โดยอะตอม	71
4.9 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 1.0 โดยอะตอม	71
4.10 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยอะตอม	72
4.11 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 5.0 โดยอะตอม	72
4.12 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 7.0 โดยอะตอม	73
4.13 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงร้อยละ 0.5 โดยอะตอม	75
4.14 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงร้อยละ 1.0 โดยอะตอม	75

4.15 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงร้อยละ 2.0 โดยอะตอม	76
4.16 ภาพถ่าย SEM และสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงร้อยละ 5.0 โดยอะตอม	76
4.17 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์	78
4.18 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 0.5 โดยอะตอม	79
4.19 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 1.0 โดยอะตอม	80
4.20 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 2.0 โดยอะตอม	80
4.21 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กร้อยละ 5.0 โดยอะตอม	81
4.22 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ร้อยละ 0.5 โดยอะตอม	82
4.23 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ร้อยละ 1.0 โดยอะตอม	83
4.24 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ร้อยละ 2.0 โดยอะตอม	83
4.25 ภาพถ่าย TEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ร้อยละ 5.0 โดยอะตอม	84
4.26 Calibration curve สำหรับหวัตรวจวัดปริมาณคาร์บอน	86
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก	87
4.28 ความสัมพันธ์ของ C/C_0 กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก ในการย่อยสลายกรดออกซาลิก	88
4.29 ความสัมพันธ์ของ C/C_0 กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็ก ในการย่อยสลายกรดฟอรั่มิก	89
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	90

4.31 ความสัมพันธ์ของ C/C_0 กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ในการย่อยสลายกรดออกซาลิก	91
4.32 ความสัมพันธ์ของ C/C_0 กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ในการย่อยสลายกรดฟอร์มิก	92
4.33 FT-IR spectra ของตัวอย่าง Bare TiO_2 , Bare TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยา กับกรดออกซาลิก และ Bare TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับกรดฟอร์มิก เปรียบเทียบกับ FT-IR spectra ของกรดออกซาลิกและกรดฟอร์มิก	95
4.34 FT-IR spectra ของตัวอย่าง 5.0Fe/ TiO_2 , 5.0Fe/ TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยา กับกรดออกซาลิก และ 5.0Fe/ TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับกรดฟอร์มิก เปรียบเทียบกับ FT-IR spectra ของกรดออกซาลิกและกรดฟอร์มิก	96
4.35 FT-IR spectra ของตัวอย่าง 2.0Cu/ TiO_2 , 2.0Cu / TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยา กับกรดออกซาลิก และ 2.0Cu / TiO_2 ที่ทำปฏิกิริยากับกรดฟอร์มิก เปรียบเทียบกับ FT-IR spectra ของกรดออกซาลิกและกรดฟอร์มิก	97

อักษรย่อและสัญลักษณ์

TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์
at %	ร้อยละโดยอะตอม
e^-	อิเล็กตรอน
h^+	โฮล
$\text{OH}^\bullet$	ไฮดรอกซิลเรดิคัล
OH^-	ไฮดรอกไซด์ไอออน
$\text{O}_2^{\bullet -}$	ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล
H_2O	น้ำ
CO_2	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
T_R	อุณหภูมิห้อง
T_C	อุณหภูมิเพาเคิลไชน์
XRD	X-ray Diffraction spectroscopy
TEM	Transmission electron microscopy
SEM	Scanning electron microscopy
EDS	Energy dispersive spectrometry
BET	Brunauer Emmett and Teller
UV-vis DRS	UV-vis Diffuse Reflectance Spectrophotometry
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectrophotometry
JCPDS	Joint Committee Powder Diffraction Standards
E_g	Band gap energy
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
keV	กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
nm	นาโนเมตร
$^\circ\text{C}$	องศาเซลเซียส
$\mu\text{g C}$	ไมโครกรัมคาร์บอน
μL	ไมโครลิตร