

การนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GOLD RECOVERY FROM CIRCUIT BOARD WASTEWATER USING COUPLED
WO₃ PHOTOCATALYSTS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์
โดย	น.ส.สัจพร สังขนาค
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชีระนันท์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร)	

สัจพจน์ สังขนาต : การนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์. (GOLD RECOVERY FROM CIRCUIT BOARD WASTEWATER USING COUPLED WO₃ PHOTOCATALYSTS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เก็จวลี พฤกษาพร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.มะลิ ทุนสม

งานวิจัยนี้ศึกษากัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ (2.5 – 25 โดยน้ำหนัก) พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (ประมาณ 7.02 – 11.2) ชนิดของสารล้าโฮล (เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล) ปริมาณสารล้าโฮล (ร้อยละ 10 – 30 โดยโมล) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1.0 – 2.5 กรัมต่อลิตร) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (5.0ZW) สามารถนำกลับทองได้มากที่สุดคือร้อยละ 99.87 ภายใน 5 ชั่วโมง ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์เท่ากับ 11.21 ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW มีปริมาณที่ว่างออกซิเจนและมีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชัน (Heterojunction) ที่เหมาะสมส่งผลให้อัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลลดลง รวมทั้งมีตำแหน่งแถบพลังงานเหมาะสมกับช่วงของศักย์ไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบเชิงซ้อนทองไซยาไนด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีเสถียรภาพคงที่แม้ผ่านการใช้งานซ้ำ 6 ครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6470068323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Coupled WO₃ photocatalysts Zinc oxide Photocatalytic gold recovery Gold plating wastewater Wastewater treatment

Satjaporn Sangkhanak : GOLD RECOVERY FROM CIRCUIT BOARD WASTEWATER USING COUPLED WO₃ PHOTOCATALYSTS. Advisor: Assoc. Prof. KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D. Co-advisor: Prof. MALI HUNSOM, Ph.D.

This research was carried out to recover gold from printed circuit board wastewater using coupled WO₃ photocatalysts. The investigated parameters were the ZnO contents coupled with WO₃ (2.5 – 25 wt.%), initial pH of wastewater (7.02 – 11.2), type of hole scavenger (methanol, ethanol and iso-propanol), hole scavenger concentration (10 – 30 vol.%) and photocatalyst loading (1.0 – 2.5 g/l). It was found that the ZnO/WO₃ photocatalyst synthesized with 5 wt.% of ZnO (5.0ZW) showed the highest gold recovery of 99.87% within 5 h, at initial pH of wastewater of 11.21, ethanol concentration of 20 vol.%, photocatalyst loading of 2 g/l and light intensity 3.57 mW/cm². An improved photocatalytic activity of 5.0ZW photocatalyst was attributed to the synergetic effect of oxygen vacancies and the constructed heterojunction which can suppress the rate of electron-hole recombination. Besides, the presence of appropriate band alignment with respect to the reduction potential of gold cyanide-complexes promoted the photocatalytic reaction. The 5.0ZW photocatalyst exhibited a high stability even at 6 cycles.

Field of Study: Chemical Technology

Academic Year: 2022

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี หากปราศจากความกรุณา เมตตา และความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พงกษาทร และศาสตราจารย์ ดร.มะลิ ทุ่งสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อมูล แนวทาง คำแนะนำ คำปรึกษา และทักษะกระบวนการคิดที่เป็นประโยชน์อย่างมากแก่ผู้วิจัย ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุดด้วยความทุ่มเทของท่านอาจารย์ทั้งสอง ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร ที่กรุณาตอบรับการรับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ โดยกรรมการสอบทุกท่านได้ช่วยกันวัดผล ตรวจสอบ และตั้งข้อสังเกตที่ทำให้ผู้วิจัยได้ตระหนักไตร่ตรองในงานวิจัยมากยิ่งขึ้น ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยมหิดล (โครงการเลขที่ N42A650341) ที่ได้อุดหนุนทุนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านคณาจารย์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยไม่มากก็น้อยด้วยความเมตตาและความเอาใจใส่ ขอขอบพระคุณ ดร.นภาพรธรณ คันธกุฎี นักวิจัยหลังปริญญาเอก และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับการให้บริการเป็นอย่างดี ทำให้การทำงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง นิสิตระดับปริญญาโท-เอกทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่ผู้วิจัย สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่มอบความรัก การสนับสนุน ความหวังใจ และเป็นกำลังใจสำคัญให้ผู้วิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จเป็นเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สัจจพร สังขนาค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง	ง
กิตติกรรมประกาศ..... จ	จ
สารบัญ..... ฉ	ฉ
สารบัญตาราง..... ฅ	ฅ
สารบัญรูปภาพ..... ญ	ญ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่สำคัญ..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 3	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 30	30
2.1 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์..... 30	30
2.2 การผลิตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์..... 31	31
2.3 การผลิตแผงวงจรพิมพ์..... 32	32
2.3.1 การชุบโลหะและการชุบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์..... 34	34
2.4 น้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์และการจัดการ..... 36	36
2.5 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis process)..... 38	38
2.6 ทังสเทนไดรอกไซด์ (Tungstane oxide; WO ₃)..... 40	40
2.6.1 ข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทังสเทนไดรอกไซด์..... 41	41

2.6.2 การประยุกต์และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	42
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับโลหะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	45
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
3.1 วัตถุประสงค์.....	49
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบคั่ว.....	51
3.5.2 การทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	52
3.5.3 การฟื้นฟูสภาพและทดสอบกัมมันตภาพในการนำกลับทองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO ₃ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว.....	53
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
4.1 สมบัติของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์.....	55
4.2 สัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	56
4.3 กัมมันตภาพในการนำกลับทองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคั่ว ZnO/WO ₃	68
4.3.1 ผลของปริมาณสารคั่วซิงค์ออกไซด์.....	68
4.3.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย.....	72
4.3.3 ผลของชนิดสารล้าไฮล.....	73
4.3.4 ผลของความเข้มข้นของสารล้าไฮล.....	75
4.3.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	76
4.4 เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO ₃	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78

5.1 สรุปผลการทดลอง	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก	85
ประวัติผู้เขียน.....	93



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ประเภทของโลหะหนักและฟิเอชการตกตะกอน [7]	37
ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรมพิมพ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	56
ตารางที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO WO ₃ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO ₃	62



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 อุตสาหกรรมแผงวงจรไฟฟ้า [1].....	30
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างการผลิตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [2].....	32
ภาพที่ 2.3 แผงวงจรไฟฟ้า [2].....	33
ภาพที่ 2.4 อ่างชุบทองแบบใช้ไซยาไนด์และไม่ใช้ไซยาไนด์ [5]	35
ภาพที่ 2.5 น้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ [6].....	36
ภาพที่ 2.6 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี [8].....	37
ภาพที่ 2.7 กระบวนการเชิงแสงเมื่อมีการฉายแสงลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา [12]	40
ภาพที่ 2.8 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1 [13].....	40
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของทังสเตนไตรออกไซด์ [15]	41
ภาพที่ 2.10 การเจือทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยโลหะ [16].....	42
ภาพที่ 2.11 การเจือทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยอโลหะ [19,20].....	43
ภาพที่ 2.12 การควบคุมสารกึ่งตัวนำทังสเตนไตรออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น [3,21].....	44
ภาพที่ 2.13 สารกึ่งตัวนำที่มีผลนำมาควบคุมกับทังสเตนไตรออกไซด์ [22]	44
ภาพที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แก้วเชิงแสงในตู้ป้องกันแสงยูวี	53
ภาพที่ 3.2 สเปกตรัมของหลอดปรอทความดันไอสูง [35]	54
ภาพที่ 4.1 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์	55
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และ ZnO/ WO_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ซ้าย) และการกระจายตัวของธาตุ (ขวา).....	57
ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/ WO_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยายต่ำ (ซ้าย) และกำลังขยายสูง (ขวา).....	59
ภาพที่ 4.4 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบควบคุม ZnO/ WO_3 ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก.....	61

ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 , ZnO และ ZnO/WO_3 63

ภาพที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N_2 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 , ZnO และ ZnO/WO_364

ภาพที่ 4.7 (ก) การดูดกลืนแสง และ (ข) กราฟ $Tauc$ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO/WO_3 (ค) สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 66

ภาพที่ 4.8 เทคนิคเรโซแนนซ์แม่เหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO/WO_3 67

ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO_3 ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจร.....68

ภาพที่ 4.10 (ก) ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $Au/5.0ZW$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (ข) ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $Au/5.0ZW$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยายสูง (ค) กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $Au/5.0ZW$ และ (ง) สเปกตรัม XPS 71

ภาพที่ 4.11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ $5.0ZW$ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์..... 72

ภาพที่ 4.12 ผลของชนิดสารล้าโฮลต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ $5.0ZW$ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ 74

ภาพที่ 4.13 ผลของปริมาณสารล้าโฮลต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ $5.0ZW$ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ 75

ภาพที่ 4.14 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $5.0ZW$ ต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ $5.0ZW$ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ 76

ภาพที่ 4.15 ผลของร้อยละการนำกลับทองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง $5.0ZW$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.27 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เอทานอลเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร เวลา 5 ชั่วโมง..... 77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผลและทฤษฎีที่สำคัญ

ปัจจุบันตลาดอิเล็กทรอนิกส์กำลังเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อรองรับเทคโนโลยี 5G รวมทั้งยานยนต์อัจฉริยะที่นำไปสู่การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีสินค้าไฮเทคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้ความต้องการแผงวงจรไฟฟ้าและฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงเพื่อรองรับความต้องการการใช้ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เพื่อการบริหารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Cloud computing) และศูนย์รวมข้อมูล (Data center) ในการจัดการกับข้อมูลปริมาณมาก (Big data) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมถึงความต้องการสินค้า เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ และเครื่องอ่านพิกัด (Tablets) โดยมีปัจจัยสนับสนุนจากความจำเป็นที่ต้องทำงานและศึกษาในระยะทางไกลท่ามกลางภาวะโรคระบาด ปัจจุบันชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยมีสัดส่วนการส่งออกร้อยละ 90 - 95 ของปริมาณการผลิต ซึ่งแบ่งออกเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ร้อยละ 29.3 คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ และส่วนประกอบอื่นๆ ร้อยละ 21.9 แผงวงจรไฟฟ้าร้อยละ 19.6 อุปกรณ์กึ่งตัวนำ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) และไดโอด (Diodes) ร้อยละ 7.0 แผงวงจรร้อยละ 3.6 และอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ร้อยละ 18.7 [1] อุตสาหกรรม HDD มูลค่าส่งออกเติบโตโดดเด่นกว่าอิเล็กทรอนิกส์ประเภทอื่น เนื่องจากไทยเป็นฐานการผลิตเพื่อส่งออกที่สำคัญของบริษัทต่างชาติที่เข้ามาขยายการลงทุนในไทยอย่างต่อเนื่อง จากการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมผลิตวงจรทำให้กำลังการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สูงขึ้นและส่งผลให้มึน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตตามมา โดยเฉพาะน้ำเสียจากกระบวนการชุบ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสารเคมีและการตกค้างของไอออนโลหะหลายชนิดโดยเฉพาะไอออนทองคำที่ใช้ในการทำเส้นเชื่อม แม้ไอออนของทองคำส่วนใหญ่จะถูกนำกลับด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสและการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ก็ยังมีไอออนทองคำบางส่วนเจือปนในน้ำเสียที่ปล่อยจากกระบวนการ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการนำกลับทองคำด้วยกระบวนการเชิงแสง (Photocatalytic process) เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถดำเนินการได้เมื่อใช้แสงอาทิตย์เป็นตัวกระตุ้นจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำและสามารถทำงานได้ในทุกสภาพแวดล้อมจึงง่ายต่อการควบคุมกระบวนการ

กระบวนการเชิงแสงประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีย่อยหลายปฏิกิริยาซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแสงและตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) ในการแยกหรือนำกลับโลหะประกอบด้วยหลายขั้นตอน คือการดูดกลืนพลังงานโฟตอนของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเชิงแสงหรือสารกึ่งตัวนำ (S) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแสงที่ตกกระทบมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ โดยอิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปที่แถบการนำ (Conduction band) และทิ้งโฮล (Hole, h^+) หรือหลุมอิเล็กตรอนไว้ (ปฏิกิริยาที่ (1.1)) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่ไปตำแหน่งกัมมันต์ (Active site) บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและไอออนของโลหะเป็นผลิตภัณฑ์ในระบบที่มีสารประกอบทองในรูปของทองไซยาไนด์ ($[Au(CN)_2]^-$) อิเล็กตรอนที่แถบนำจะทำปฏิกิริยากับ $[Au(CN)_2]^-$ เป็น $(CN)^-$ และโลหะทอง (Au) เกาะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังปฏิกิริยาที่ (1.2) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์จะออกซิไดซ์ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ $(CN)^-$ เป็น $(OCN)^-$ และน้ำ ดังปฏิกิริยาที่ (1.3) - (1.4)



ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบันเพื่อใช้ในการนำกลับทองจากน้ำเสีย การผลิตแผงวงจรรวม คือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ และทนทานต่อภาวะการทำงาน [2] อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจาก TiO_2 จะไม่ดูดกลืนแสงที่ตามองเห็น (Visible light) แต่จะดูดกลืนเฉพาะแสงยูวีเท่านั้น และมีอัตราการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮล ($e^- - h^+$ recombination) สูง นอกจากนี้ TiO_2 ยังมีราคาสูงเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตโนไดรอกไซด์ (WO_3) เพื่อใช้ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรรวม เนื่องจาก WO_3 มีแถบช่องว่างพลังงานที่แคบกว่า TiO_2 จึงดูดกลืนแสงได้ในช่วงที่ตามองเห็นและช่วงยูวีเล็กน้อย ราคาถูก มีความเป็นพิษต่ำ ทนทานต่อภาวะการทำงาน และยังไม่มีการวิจัยที่ผ่านมาศึกษาการนำกลับทองจากน้ำเสียชุบโลหะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 อย่างไรก็ตาม WO_3 มีอัตราการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮล (h^+) สูง เพื่อเพิ่มกัมมันตภาพในการทำงานจึงมีการนำมาคู่ควบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงตัวอื่น โดยงานวิจัยนี้ นำ WO_3 มาคู่ควบกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจาก ZnO มีแถบช่องว่างพลังงานแคบครอบคลุมย่านไฟฟ้ารีดักชันของทองไซยาไนด์ ($[Au(CN)_2]^-$) และมีพื้นที่ผิวสูง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลและศึกษากัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ ทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีกัมมันตภาพสูงสุด

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษา ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.4.2 จัดหาอุปกรณ์ และสารเคมี

1.4.3 วิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์ก่อนนำมาทดสอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ได้แก่ ชนิดของโลหะ ความเข้มข้นของโลหะ และพีเอช (pH) ของน้ำเสีย

1.4.4 สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มัล

ตัวแปรต้น - ปริมาณของซิงค์ออกไซด์ (ร้อยละ 2.5 – 25 โดยน้ำหนัก)

ตัวแปรตาม - กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

- สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
- องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของวัสดุด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟลโอสโคปีเล็กรอนด้วยรังสีเอ็กซ์
- การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง
- สัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- การเกิดโครงสร้างบกพร่องด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานส์มิสชัน
- พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน

- การตรวจสอบโครงสร้างของโมเลกุลด้วยรามานสเปกโตรสโคปี
- การเปล่งแสงของสารด้วยโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโตรสโคปี
- การดูดซับเรโซแนนซ์ของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์พาราแมกเนติกเรโซแนนซ์

1.4.4 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีกัมมันตภาพสูงสุด

ตัวแปรต้น - พีเอชของน้ำเสีย (ประมาณ 7.02 – 11.2)

- ชนิดของสารล่าโฮล (เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล)

- ปริมาณสารล่าโฮล (ร้อยละ 10 – 30 โดยโมล)

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1.0 – 2.5 กรัมต่อลิตร)

ตัวแปรตาม - กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์

1.4.5 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ที่มีกัมมันตภาพสูงสุด

1.4.6 อภิปราย/วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง เขียนวิทยานิพนธ์ และเขียนบทความวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

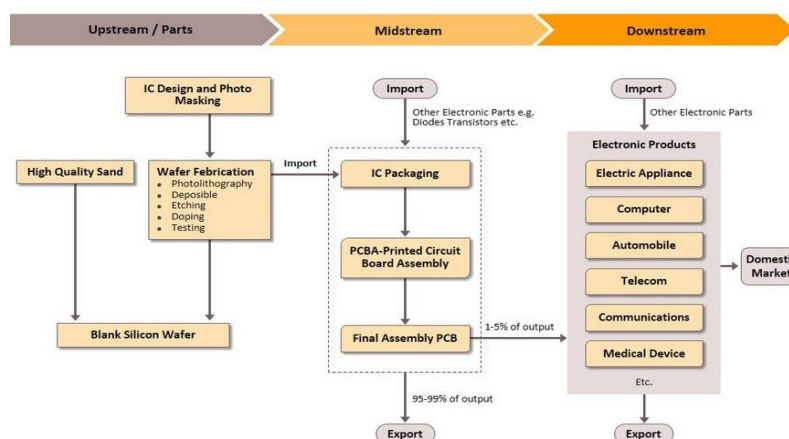
ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีกัมมันตภาพสูงในการนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยในปี 2564-2566 คาดว่าจะกลับมาขยายตัว เนื่องจากการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อรองรับเทคโนโลยี 5G รวมทั้งยานยนต์อัจฉริยะที่นำไปสู่การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีสินค้าไฮเทคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต หรือ Internet of Things (IoT) ทำให้ความต้องการแผงวงจรรไฟฟ้า (Integrated Circuit : IC) และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive : HDD) เติบโตขึ้นมาก โดยเฉพาะ HDD ที่มีความจุสูงเพื่อรองรับความต้องการการใช้งาน Cloud computing และ Data center ในการจัดการกับ Big data ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมถึงความต้องการสินค้า เช่น คอมพิวเตอร์ และโทรศัพท์มือถือ โดยมีปัจจัยสนับสนุนจากความจำเป็นที่ต้องทำงานและศึกษาในระยะทางไกลท่ามกลางภาวะโรคระบาด [1] ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 อุตสาหกรรมแผงวงจรรไฟฟ้า [1]

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 2515 ซึ่งรัฐบาลเริ่มมีนโยบายส่งเสริมการลงทุนผ่านการให้สิทธิประโยชน์ต่างๆ ทั้งทางด้านภาษีและไม่ใช่ภาษี โดยคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (Board of Investment : BOI) เพื่อดึงดูดนักลงทุนต่างชาติ โดยช่วงปี 2515-2535 ภาครัฐส่งเสริมการลงทุนในการผลิตเพื่อการส่งออก นักลงทุนต่างชาติจึงทยอยเข้ามาลงทุน และตั้งฐานการผลิตขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อาทิ แผงวงจรรไฟฟ้า (Integrated Circuit : IC) แผงวงจรรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive : HDD) ฟลอปปีดิสก์ (Floppy Disk) มอเตอร์ไฟฟ้า สายไฟและสายเคเบิล [3]

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก นอกจากการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการภายในประเทศแล้ว ยังส่งออกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นระดับต้น ๆ ของเอเชียอีกด้วย

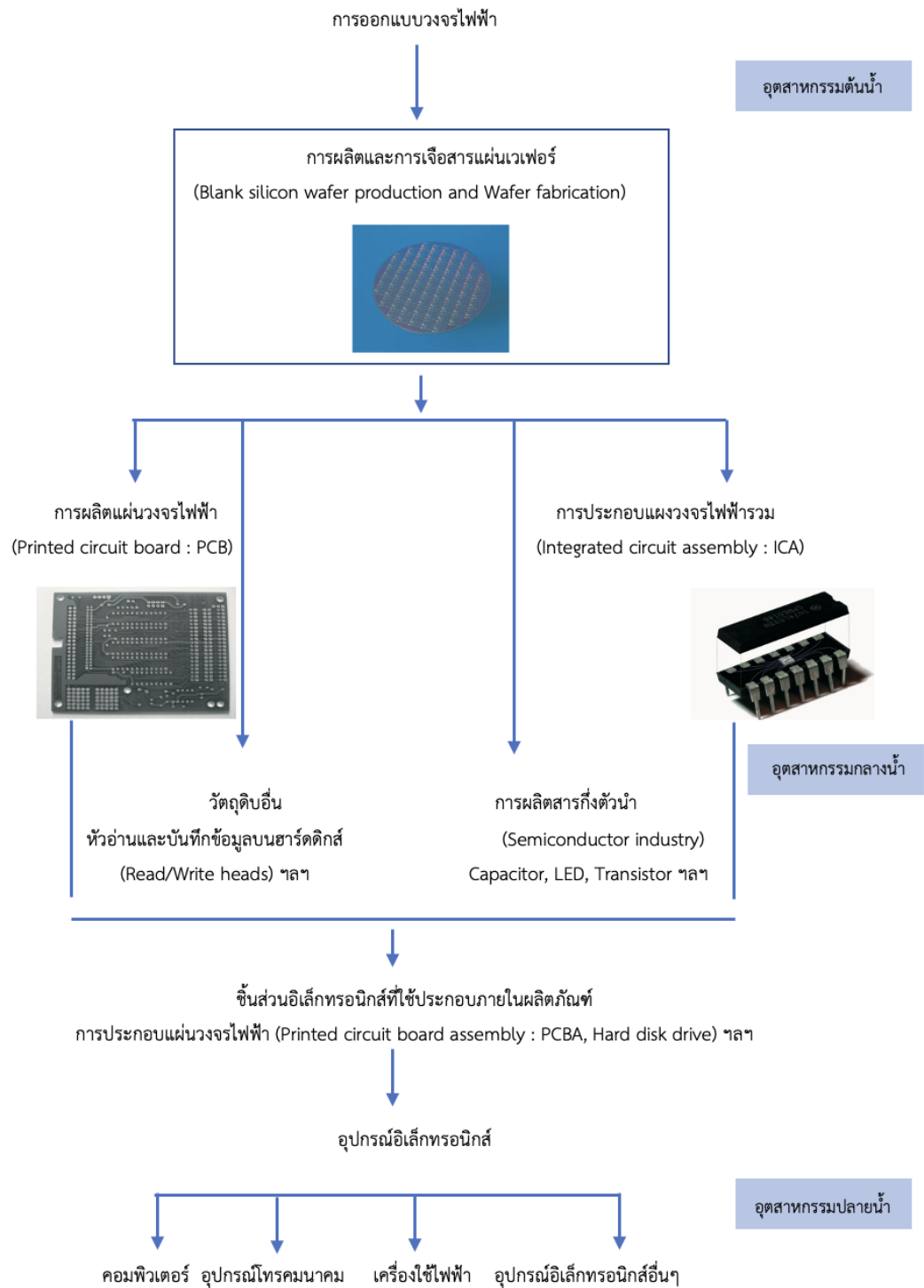
2.2 การผลิตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สามารถแบ่งตามโครงสร้างการผลิตได้เป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมปลายน้ำ ดังภาพที่ 2.2

อุตสาหกรรมต้นน้ำประกอบด้วยการออกแบบวงจรไฟฟ้า การผลิตและการเจือสารแผ่นเวเฟอร์ (Blank silicon wafer production and wafer fabrication)

อุตสาหกรรมกลางน้ำประกอบด้วยการประกอบแผงวงจรไฟฟ้า (Integrated circuit assembly : ICA) และการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า (Printed circuit board : PCB) หรือที่เรียกว่าแผงวงจรพิมพ์ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ซึ่งเมื่อนำมาประกอบรวมเข้าด้วยกันจะได้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ

อุตสาหกรรมปลายน้ำเป็นการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อผลิตเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น การประกอบแผงวงจรไฟฟ้า (Printed circuit board assembly : PCBA) ฮาร์ดดิสก์ โทรทัศน์ เครื่องปรับอากาศ โทรศัพท์มือถือ กล้องดิจิทัล ฯลฯ โดยขั้นตอนการประกอบอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจะแตกต่างกันไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์

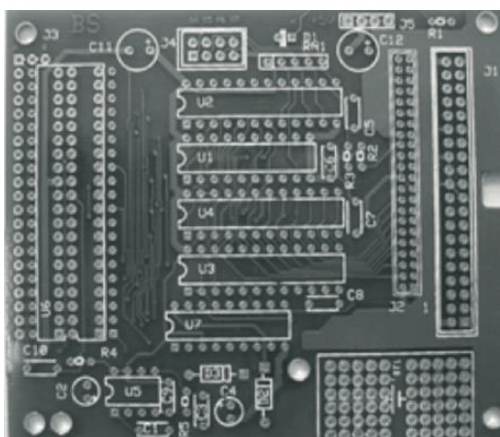


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างการผลิตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [2]

2.3 การผลิตแผงวงจรพิมพ์

การผลิตแผงวงจรพิมพ์หรือแผ่นปริ้นซ์หรือแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า [2] คือการออกแบบและการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า โดยการนำแผ่นฉนวนเคลือบด้วยทองแดง (Copper clad laminate : CCL) มา

ผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อทำให้เกิดลายวงจรไฟฟ้าขึ้น แผ่นวงจรไฟฟ้านี้เป็นที่ยึดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และเชื่อมโยงวงจรไฟฟ้าระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้ามีการพัฒนามากขึ้นจากเดิมที่เป็นการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าชนิดหน้าเดียว ก็พัฒนาการผลิตเป็นแผ่นวงจรไฟฟ้าชนิดสองหน้า การผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าชนิดหลายชั้น (Multi-layer PCB) และการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าแบบ Flexible ซึ่งการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าทุกชนิดเป็นการผลิตที่ใช้ความละเอียดสูง



ภาพที่ 2.3 แผ่นวงจรไฟฟ้า [2]

กระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้าชนิดสองหน้า ประกอบด้วย

- การตัดแผ่นฉนวนเคลือบทองแดง (Shear laminate) หรือเรียกอีกชื่อว่าแผ่นลามิเนต ให้มีขนาดเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- การเจาะรู (Drilling) เป็นการเจาะรูขนาดต่างๆ ตามแบบที่ต้องการ และขัดแผ่นเพื่อลบปากรูเจาะให้เรียบร้อย
- การชุบด้านในของรูเจาะ เป็นการชุบด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อให้สารประกอบตัวนำไฟฟ้า (Conductive polymer) เคลือบที่ผนังด้านในของรูเจาะ
- การชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า (Electroless copper) คือการทำให้ทองแดงปกคลุมทั่วทั้งแผ่นลามิเนต รวมถึงด้านในของรูเจาะโดยกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า เมื่อผ่านขั้นตอนนี้ด้านในของรูเจาะสามารถนำไฟฟ้าได้
- การขึ้นลายวงจร โดยนำแผ่นลามิเนตมารีดฟิล์มไวแสง (Dryfilm) ทั้งสองด้าน หลังจากนั้นนำแผ่นต้นแบบลายเส้นวงจร (Artwork) มาทาบบนแผ่นลามิเนต ทำการฉายแสงยูวีลงไปบนแผ่นลามิเนต เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้ลายเส้นวงจรที่มีลักษณะเหมือนแผ่นต้นแบบ
- การชุบลายเส้น (Pattern plating) เป็นการชุบทองแดงที่ลายเส้นวงจรและด้านในของรูเจาะให้หนาขึ้นด้วยไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการเคลือบดีบุกที่ลายเส้นวงจรดังกล่าว

- การกัดทองแดงและการลอกดีบุก (Etching and stripping) นำแผ่นลามิเนตมากัดทองแดง ส่วนที่ไม่ต้องการออก ส่วนที่เป็นลายเส้นวงจรยังคงอยู่ เนื่องจากถูกเคลือบไว้ด้วยดีบุก หลังจากนั้นจึงทำการลอกดีบุกที่เคลือบไว้
- การตรวจสอบ (Automatic optical inspection)
- การพิมพ์เขียว (Solder mask printing) โดนใช้หมึกพิมพ์ Solder mask ชนิดไวแสง (Wet film) มารีดที่แผ่นลามิเนต นำแผ่นต้นแบบพิมพ์เขียว (Artwork solder mask) มาทาบบนแผ่นลามิเนต ทำการฉายแสง UV เมื่อได้พิมพ์เขียวตามที่ต้องการแล้วจึงทำการล้างฟิล์มไวแสงออกด้วยน้ำยา Wet film developing
- การชุบขาด้วยทอง (Gold finger plating) ด้วยกระบวนการชุบทางเคมีและไฟฟ้า
- การพิมพ์สีปิดที่ขาทอง (Peelable ink printing) เพื่อป้องกันตะกั่วเข้าไปติดในทอง
- การชุบตะกั่ว (Hot air leveling) โดยนำแผ่นลามิเนตไปจุ่มในอ่างตะกั่วหลอมเหลว
- การตัดแผ่น ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ
- การทดสอบทางด้านไฟฟ้า (Electrical testing)
- การตรวจสอบคุณภาพขั้นสุดท้าย (Final inspection)
- การบรรจุ (Packing)

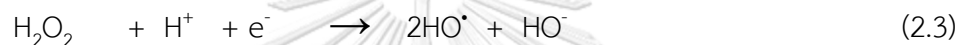
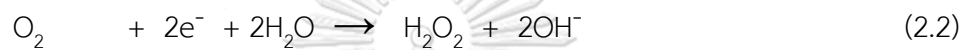
2.3.1 การชุบโลหะและการชุบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

การชุบโลหะคือกระบวนการทำให้โลหะที่ต้องการไปเคลือบเป็นชั้นบางๆ บนชิ้นงานโลหะที่ต้องการเคลือบผิว เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ให้กับชิ้นงานที่ต้องการเคลือบผิว โลหะที่ใช้เคลือบผิวนั้นมีหลากหลายชนิด เช่น ทองคำ (Gold), เงิน (Silver), ทองแดง (Copper), โรเดียม (Rhodium), โครเมียม (Chromium), สังกะสี (Zinc), นิกเกิล (Nickel), ดีบุก (Tin) และแคดเมียม (Cadmium) เป็นต้น การชุบโลหะแบ่งเป็นการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electroplating) และการชุบโลหะโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electroless plating) [3] การชุบโลหะนั้นมีประโยชน์เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติบางประการต่อชิ้นงานที่ต้องการชุบเคลือบผิว เช่น การเพิ่มความแข็งของผิวชิ้นงาน การเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน การเสียดสี และการกัดกร่อน การลดแรงเสียดทานบนพื้นผิว การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าของชิ้นงาน การเพิ่มความสามารถในการฉีดยึดพ่นสี หรือแม้กระทั่ง เพื่อเพิ่มความสวยงามของชิ้นงาน [4]

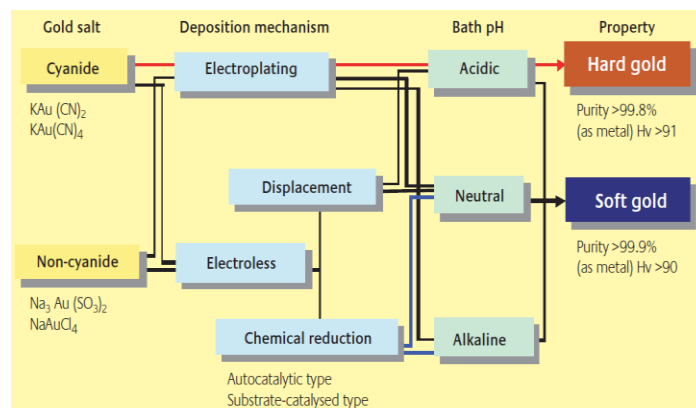
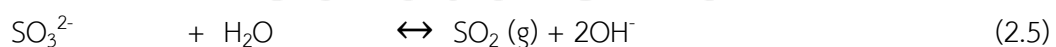
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นิยมชุบทองลงบนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเชื่อมต่อวัสดุกึ่งตัวนำและทรานซิสเตอร์ เนื่องจากทองมีข้อดีคือ สภาพนำไฟฟ้าสูง ทนทานต่อการทำปฏิกิริยากับอากาศ และมีความอยู่ตัวสูง การชุบทองบนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีทั้งการชุบบนแบบแบบใช้กระแสไฟฟ้า และแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า [5] การชุบแต่ละประเภทจะมี 2 แบบ คือ การชุบบนแบบใช้

ไซยาไนด์ (Cyanide-based gold plating) และการชุบแบบไม่ใช่ไซยาไนด์ (Non cyanide-based gold plating) ดังแสดงในภาพที่ 2.4

• การชุบทองแบบใช้ไซยาไนด์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการชุบทองแบบดั้งเดิม และที่มีการพัฒนามาเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน กระบวนการนี้ให้ชิ้นงานที่มีฟิล์มทองคำที่มีสมบัติทางกายภาพและเสถียรภาพดี มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน อ่างชุบทองประเภทไซยาไนด์จะใช้โพแทสเซียมไซยาไนด์ (K[Au(CN)₂]) เป็นสารเคมีตั้งต้นในการทำงาน อ่างชุบประเภทนี้จะทำงานได้ดีที่พีเอชที่เป็นกรด เป็นกลาง หรือเป็นด่าง ให้ฟิล์มทองคำแบบแข็ง หรืออ่อนก็ได้ ดังสมการที่ (2.1) – (2.3)



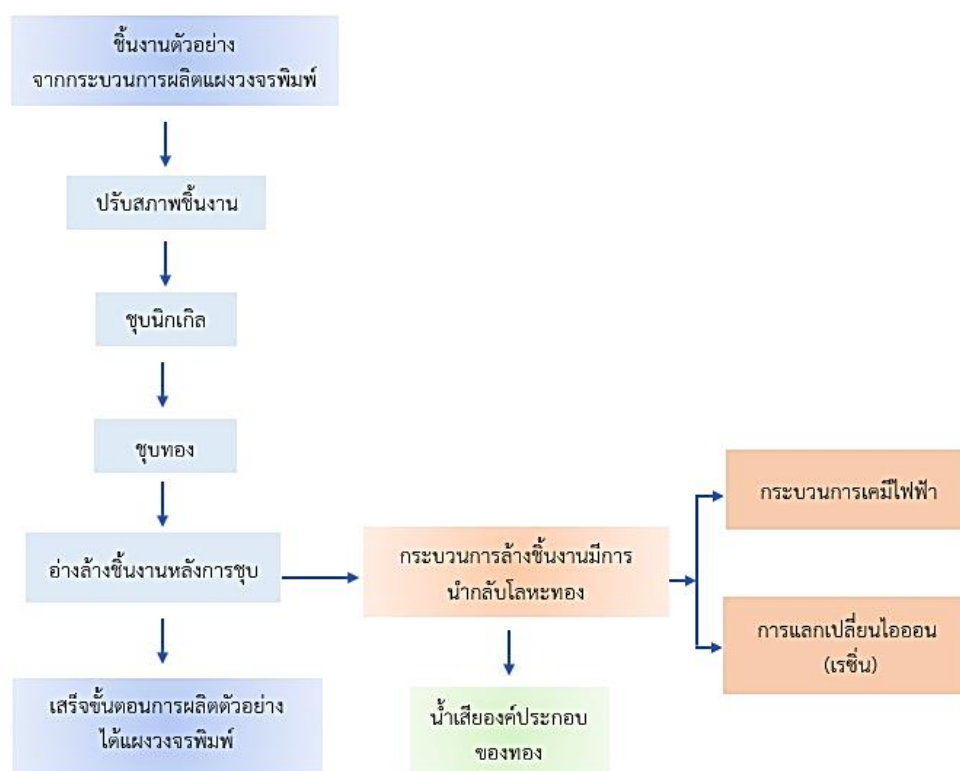
• การใช้อ่างชุบแบบไม่ใช่ไซยาไนด์จะใช้สารในกลุ่มซัลไฟต์ (Au(I)-sulfite complex) หรือทองในรูปแบบของเกลือ (Na[AuCl₄] หรือ Na₃[Au(S₂O₃)₂]) แทนโพแทสเซียมไซยาไนด์ การชุบด้วยวิธีนี้มีความเป็นพิษน้อยมากแต่ลักษณะทองที่ชุบได้จะอ่อนนุ่มมากกว่าประเภทแรกจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมกับพวกแผงวงจร อย่างไรก็ตามอ่างชุบแบบไม่ใช่ไซยาไนด์จะประสบปัญหาความคงตัวของน้ำในอ่างชุบไม่เพียงพอสำหรับการชุบเวลาที่ใช้งานจริง จึงทำให้เกิดขอบเขตสำหรับการใช้งานที่ถูกจำกัด อ่างชุบแบบไม่ใช่ไซยาไนด์จะทำงานได้ที่พีเอช (pH) ที่เป็นกลางหรือเป็นด่างเท่านั้น จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นฟิล์มทองคำอ่อน ดังสมการที่ (2.4) – (2.5)



ภาพที่ 2.4 อ่างชุบทองแบบใช้ไซยาไนด์และไม่ใช่ไซยาไนด์ [5]

2.4 น้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์และการจัดการ

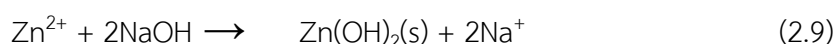
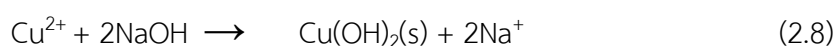
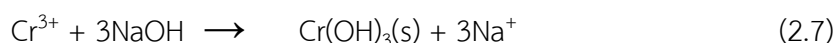
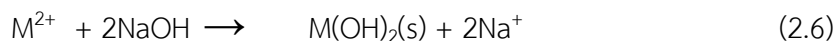
กระบวนการผลิตของแผงวงจรพิมพ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตมากขึ้นตามมา โดยเฉพาะน้ำเสียจากกระบวนการชุบชั้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการปนเปื้อนของไอออนของโลหะที่ใช้ในการชุบชั้นงาน เช่น เหล็ก นิกเกิล สังกะสี ทองแดง รวมถึงทอง แม้ว่าบริษัทผู้ผลิตจะมีการนำกลับไอออนทองจากน้ำเสียดังกล่าวด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการนำกลับด้วยกระแสไฟฟ้า (Electric treatment) หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange process) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 แต่ก็ยังมีไอออนของโลหะตกค้างในน้ำเสีย โดยน้ำเสียดังกล่าวมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8 – 8.0 มีไอออนของทอง เหล็ก นิกเกิล สังกะสี และทองแดง หรือไอออนของโลหะอื่นที่ใช้ในกระบวนการ [6]



ภาพที่ 2.5 น้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ [6]

การจัดการโลหะที่ตกค้างในน้ำเสียสามารถดำเนินการได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้ คือ กระบวนการตกตะกอน (Precipitation) โดยนำน้ำทิ้งแต่ละประเภทมารวมกันเพื่อกำจัดพวกโลหะหนักทั้งหมดทิ้งไปด้วยโซดาไฟเพื่อให้เกิดการตกตะกอน [7] ดังปฏิกิริยา (2.6) – (2.9) และผ่านน้ำนี้ไปยังถังตกตะกอน และปรับค่าพีเอชให้เป็นกลางก่อนที่จะทิ้งระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป น้ำที่ผ่านขบวนการบำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรม จึงเป็นการลดมลภาวะทาง

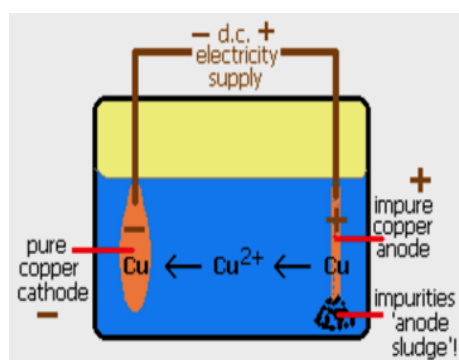
น้ำ ช่วยรักษาสภาวะแวดล้อมของแหล่งน้ำธรรมชาติให้คงอยู่ต่อไป [8] ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงพีเอชการตกตะกอนของไอออนของโลหะชนิดต่างๆ



ตารางที่ 2.1 ประเภทของโลหะหนักและพีเอชการตกตะกอน [7]

ประเภทโลหะหนัก	ช่วงพีเอชการตกตะกอน
ทองแดง (Cu^{2+})	7 - 12 ไม่มีการละลายกลับ
นิกเกิล (Ni^{2+})	9 - 10 ไม่มีการละลายกลับ
โครเมียม (Cr^{3+})	8 - 10 (ละลายกลับที่พีเอชมากกว่า 11)
สังกะสี (Zn^{2+})	9 - 11 (ละลายเล็กน้อยพีเอชมากกว่า 11)
เหล็ก (Fe^{2+})	7.5 - 10 (ละลายกลับพีเอชมากกว่า 11)

เทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมีเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำกลับโลหะจากน้ำเสีย กระบวนการนี้จะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้า (Electrolytic cell) ที่มีแผ่นขั้วบวก (Anode) และแผ่นขั้วลบ (Cathode) วางเรียงสลับกันไปมี แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (Rectifier) เพื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับ เป็นกระแสตรง เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านขั้วบวกและขั้วลบที่จุ่มในสารละลาย (Electrolyte) ของโลหะที่ต้องการแยกสกัดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไอออนโลหะในสารละลายกลายเป็นโลหะ เกาะที่ขั้วลบ ตัวอย่างของเซลล์ไฟฟ้าสำหรับการแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี แสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การแยกสกัดโลหะด้วยเทคโนโลยีโลหะวิทยาไฟฟ้าเคมี [8]

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของไหลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัส และเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของไหลนั้นจึงเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสาร (Mass-transfer) มาสะสม (Accumulation) ที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวโดยให้สารละลายที่มีตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ไหลสัมผัสกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) องค์ประกอบแต่ละชนิดของสารละลายจะมีความสามารถในการกระจายที่ผิว และเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับ แต่การดูดซับไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายเกิดจากการดูดซับหรือการตกตะกอนที่พื้นผิวหรือกระบวนการพอลิเมอไรเซชันหรือกระบวนการอื่นๆที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวแล้วโดยทั่วไปจะใช้คำว่า การซึมซับ (Sorptions) [9]

2.5 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalysis process)

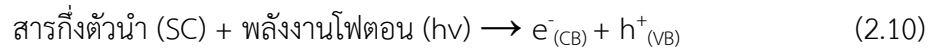
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงถือว่าเป็นกระบวนการที่กำลังเป็นที่นิยมและเป็นทางเลือกในการนำกลับโลหะมีค่า เช่น ทองคำ และเงิน เป็นต้น [10] รวมถึงสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียให้มีความเข้มข้นลดลง กระบวนการเชิงแสงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีรีดักชัน/ออกซิเดชันขั้นสูง มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว [11] ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีความเป็นพิษเลย ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงถูกจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้ 2 ประเภทคือ

(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

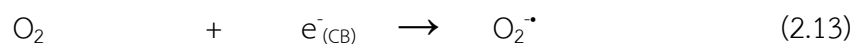
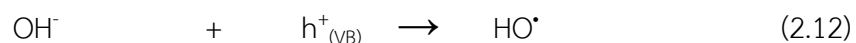
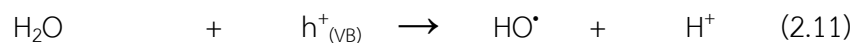
เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนจะถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่กึ่งตัวนำ ซึ่งส่วนบนของสารกึ่งตัวนำเรียกว่าแถบการนำ (Conduction band : CB) และส่วนล่างเรียกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band : VB) ซึ่งทั้งสองจะถูกคั่นด้วยแถบช่องว่างพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไป - มา ระหว่างแถบพลังงานดังกล่าวโดยกระบวนการมีรายละเอียดดังนี้ [12]

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำได้รับพลังงานโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ ($e^-_{(CB)}$) จะถูกกระตุ้นไปอยู่ที่แถบการนำเกิดหลุมอิเล็กตรอนหรือโฮลที่แถบเวเลนซ์ ($h^+_{(VB)}$) ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

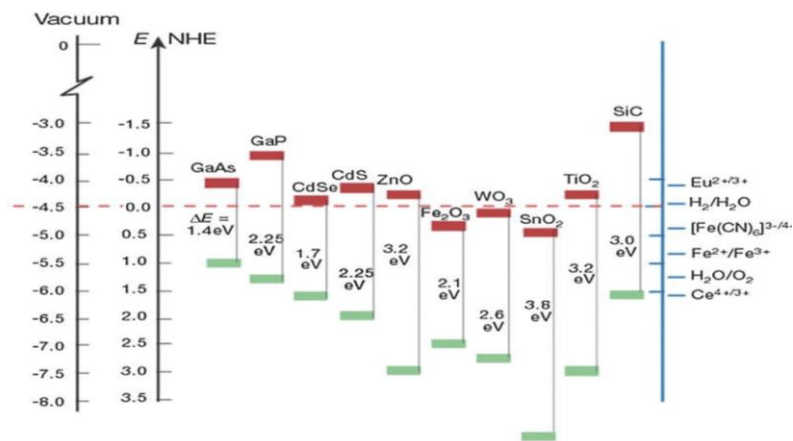
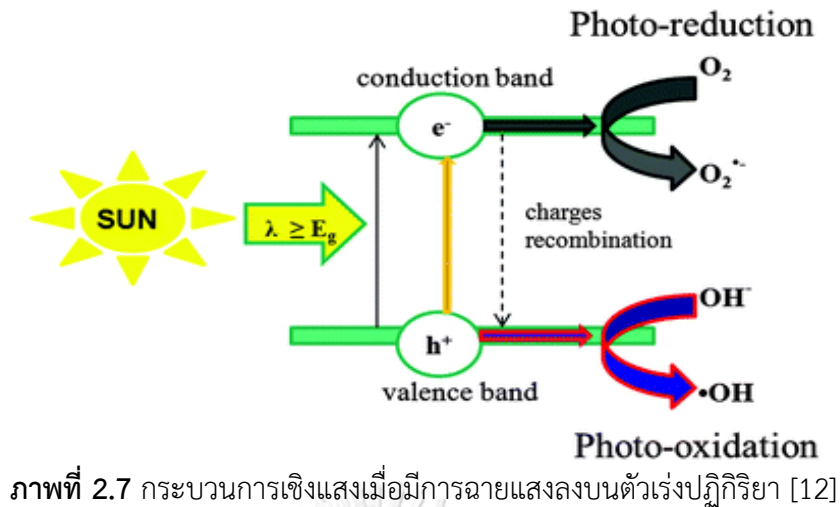


อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำ ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสูงสุดของแถบเวเลนซ์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลสามารถเกิดการรวมตัวกันอีกครั้งได้ แต่ถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นถูกกักไว้ที่ผิวของของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากความบกพร่องของผิว (Surface defect) จะช่วยยับยั้งหรือลดอัตราการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล

- การเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transport) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กจะสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้ ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุในสร้างกึ่งตัวนำขนาดนาโนเมตรจะแตกต่างกับสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดใหญ่
- การดูดซับน้ำบนผิวอนุภาคโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีสมบัติในการชอบน้ำ (Hydrophilic property) หรือสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic property) ภายใต้การฉายแสงซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่แสดงประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง โดยถ้าผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความไม่ชอบน้ำปฏิกิริยาระหว่างโฮลและน้ำจะเกิดขึ้นง่าย และทำให้เกิดการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล
- การเกิดเรดิคัล โดยโฮลที่ว่างในแถบเวเลนซ์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังแสดงในสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ ส่วนตัวอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปที่แถบการนำไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ดังแสดงในสมการที่ (2.13)



ส่วนใหญ่แล้วในการทำกระบวนการปฏิกิริยาเชิงแสงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของแข็ง และสารตั้งต้นอยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว เนื่องจากง่ายต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย [13] โดยโครงสร้างอนุภาคตัวกลางแสดงดังภาพที่ 2.7 ซึ่งค่าของช่องว่างของพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีค่าช่องว่างของพลังงานแตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.8



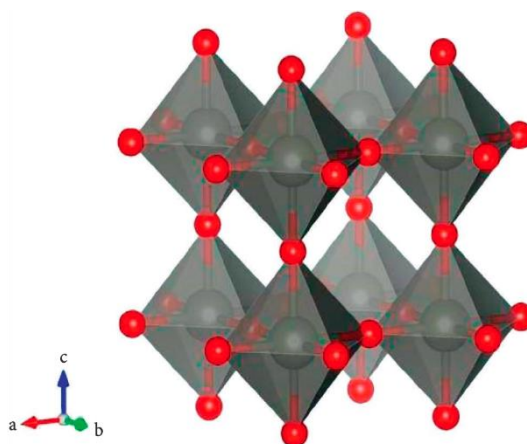
ภาพที่ 2.8 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1 [13]

2.6 ทังสเตนไดรอกไซด์ (Tungstane oxide; WO₃)

ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO₃) ประกอบด้วยออกซิเจนและโลหะทรานซิชัน มีสีเหลือง ราคาถูก มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเชิงแสงที่ดี สามารถดูดกลืนแสงทั้งในช่วงยูวีและช่วงแสงที่ตามองเห็น [14] เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานแคบ (2.6 – 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์) ปัจจุบันนิยมใช้กับงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซอร์ทรอจจับแก๊ส เนื่องจากทังสเตนไดรอกไซด์มีประโยชน์หลากหลายในการใช้งาน สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย เช่น กระบวนการโซลเจล (Sol-gel) การระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) การแอนโนไดเซชัน (Anodization) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame spray pyrolysis) เป็นต้น [15]

ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกของทังสเตนไดรอกไซด์ (WO₃) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบมอนอคลินิก (Monoclinic structure) ที่อุณหภูมิ 17–330 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลวที่ 1473

องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 1700 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มวลอะตอมเท่ากับ 231.84 กรัมต่อโมล ส่วนโครงสร้างอื่นของทังสเตนไตรออกไซด์ คือเตตระโกนอล ที่อุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียส ออโธรอมบิก (Orthorhombic structure) 330–740 องศาเซลเซียส และไตรคลินิก (Triclinic structure) -50–17 องศาเซลเซียส โดยโครงสร้างที่พบบ่อยที่สุดของทังสเตนไตรออกไซด์ คือ มอนอคลินิก [15]



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของทังสเตนไตรออกไซด์ [15]

2.6.1 ข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทังสเตนไตรออกไซด์

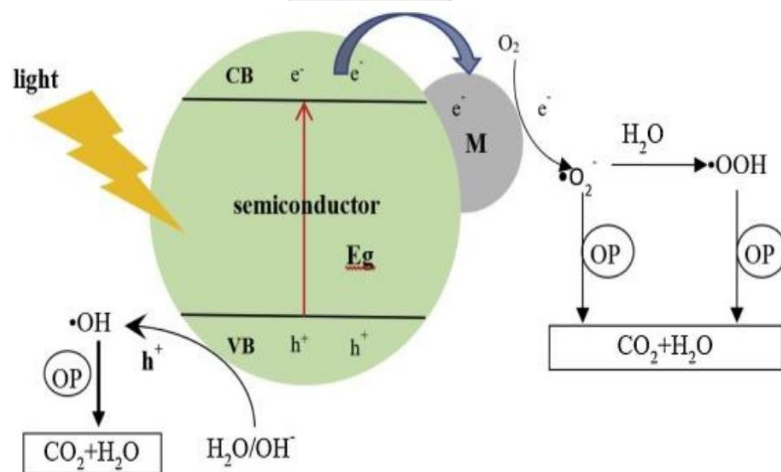
แม้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำทังสเตนไตรออกไซด์จะมีข้อดีในการทำงานมากมาย แต่ก็มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ อัตราการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮลสูง เนื่องจากความไม่เสถียรของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำทำให้อิเล็กตรอนเกิดการคายพลังงานเพื่อตกกลับลงมายังแถบเวเลนซ์เหมือนเดิม และมีตำแหน่งพลังงานของแถบเวเลนซ์และแถบนำเป็นบวกจึงไม่เหมาะกับการเร่งปฏิกิริยารีดักชันที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทังสเตนไตรออกไซด์นี้ เช่น การเจือทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยโลหะ (Metal doping) การเจือทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยอโลหะ (Non-metal doping) หรือการคู่ควบ (Coupling) สารกึ่งตัวนำทังสเตนไตรออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ซึ่งวิธีทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทังสเตนไตรออกไซด์ให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและที่ตามองเห็นได้เสถียรมากขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอัตราการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล [16]

2.6.2 การประยุกต์และพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์

เพื่อลดข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น [17] จึงมีการพัฒนาตัวเร่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเชิงแสงมากมาย เช่น

- การเจือทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ด้วยโลหะ

การเจือทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ด้วยโลหะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเชิงแสงของทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ได้ โดยลดอัตราการเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮล และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากธาตุที่เป็นโลหะสามารถสร้างชั้นระดับพลังงานย่อยหรือระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ซึ่งพลังงานเฟอร์มีของโลหะมีความเป็นบวกมากกว่าแถบการนำไฟฟ้าของทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ [16] ทำให้เมื่ออิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ถูกกระตุ้นไปบนแถบการนำไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนย้ายมายังโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 จากนั้นจะเกิดการปรับระดับพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์และโลหะให้เท่ากันเกิดกำแพงชอททกี (Schottky barrier) ที่ช่วยป้องกันการย้อนกลับไปรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนที่ถูกย้ายมายังโลหะและโฮลบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ [18]

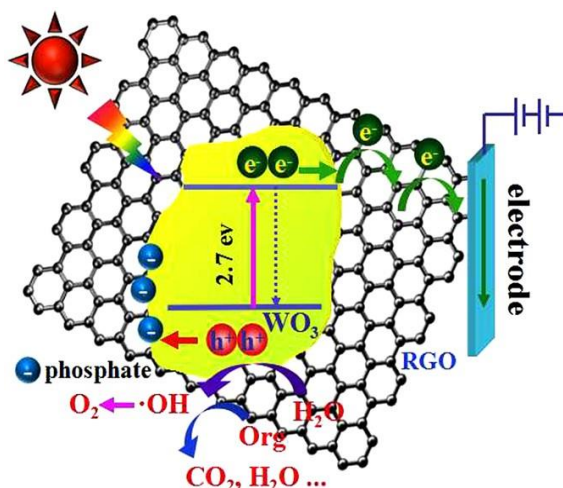


ภาพที่ 2.10 การเจือทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ด้วยโลหะ [16]

- การเจือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ด้วยโลหะ

การเจือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนด์ทรานสไพร์ด้วยโลหะที่มีค่าพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy) และอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) สูง เช่น ไนโตรเจน (N) คาร์บอน (C) โบรอน (B) ซัลเฟอร์ (S) ฟลูออรีน (F) และคลอรีน (Cl) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11 สามารถ

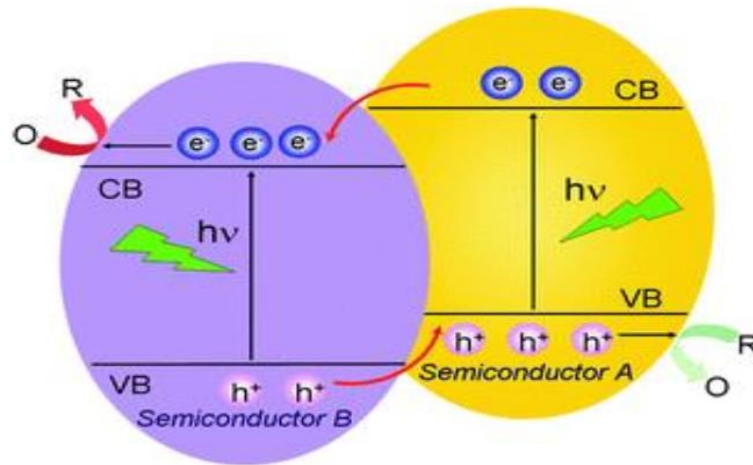
ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ และช่วยลดอัตราการเกิดการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล [19] การเจือด้วยโลหะส่งผลให้แถบเวเลนซ์มีการเลื่อนขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนไดรออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานแคบลง [20]



ภาพที่ 2.11 การเจือทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยโลหะ [19,20]

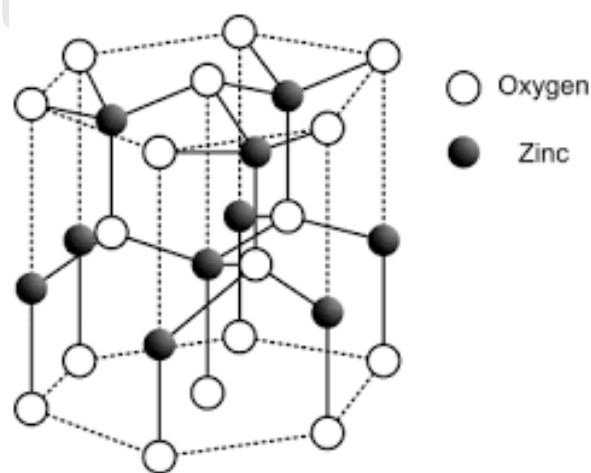
- การควบคุมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนไดรออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

การควบคุมสารกึ่งตัวนำทั้งสแตนไดรออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำอื่นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดีขึ้น [3] เนื่องจากความแตกต่างของแถบช่องว่างพลังงานระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและโฮลระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสอง โดยสารกึ่งตัวนำที่มีแถบการนำไฟฟ้าเป็นลบมากกว่าจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ส่วนสารกึ่งตัวนำที่มีแถบการนำไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) หรือสารกึ่งตัวนำที่มีแถบเวเลนซ์เป็นลบมากกว่าจะทำการย้ายโฮลไปที่สารกึ่งตัวนำอีกตัวที่มีแถบเวเลนซ์เป็นลบมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.12 จึงเป็นผลให้ช่วยลดอัตราการเกิดการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล อีกทั้งถ้าสารกึ่งตัวนำมีแถบช่องว่างพลังงานกว้างจะส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้นได้ [21]



ภาพที่ 2.12 การคู่ควบสารกึ่งตัวนำทั้งสแตนด์ทรานซิชันไดรอกไซด์กับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น [3,21]

ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาคู่ควบกับทั้งสแตนด์ทรานซิชันไดรอกไซด์ ซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 มีพื้นที่ผิวสูง มีแถบพลังงานกว้าง คือ จะมีค่าพลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงยูวี ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้างนี้จะมีประสิทธิภาพสูงมาก เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้ในอุณหภูมิที่สูงๆ ดีกว่า ซิงก์ออกไซด์จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ทำให้เปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่นสั้น ดังนั้นซิงก์ออกไซด์จึงได้รับความสนใจในการนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปล่งแสงความยาวคลื่นสั้น นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในด้านการสลายของสีย้อม การบำบัดน้ำเสีย เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊ส เป็นต้น [22]



ภาพที่ 2.13 สารกึ่งตัวนำที่มีผลนำมาคู่ควบกับทั้งสแตนด์ทรานซิชันไดรอกไซด์ [22]

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับโลหะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ [22, 23] ดังนี้

- แลบช่วงศักย์ไฟฟ้า (Effect of potential) การนำกลับโลหะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีศักย์ไฟฟ้าของกระบวนการรีดอกซ์ทั้งในฝั่งของรีดักชันและออกซิเดชันของคูโลหะที่เหมาะสม โดยต้องมีแลบการนำมีค่าเป็นลบมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชัน และมีค่าแลบเวเลนซ์ที่เป็นบวกมากกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- การมีออกซิเจนละลายน้ำ กระบวนการนำกลับโลหะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงฝั่งรีดักชันจะต้องกำจัดออกซิเจน เพราะออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะกลายเป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนำกลับไอออนโลหะลดลง การลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะช่วยให้อัตราการนำกลับไอออนโลหะสูงขึ้น อัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่ออกซิเจนต่ำลง การลดปริมาณออกซิเจนในน้ำสามารถดำเนินการได้โดยการป้อนไนโตรเจนในน้ำระหว่างการทำปฏิกิริยา
- ชนิดของแสง การใช้แสงยูวียังมีข้อจำกัดเนื่องจากการดูดกลืนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการใช้ปริมาณสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มอัตราการสร้างคูอิเล็กตรอนและโฮลเพื่อช่วยในกระบวนการนำกลับโลหะ
- ค่าพีเอช ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในสารละลายมีค่าแตกต่างกันมีผลมาจากปริมาณเกลือโลหะ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น การดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย ค่าพีเอชจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าโดยกระบวนการนำกลับโลหะในกรณีที่พีเอชเป็นเบสจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แลบเวเลนซ์คือมีโฮลเกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์เรดิคัล ส่วนแลบการนำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันอิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับโลหะจะช่วยในกระบวนการนำกลับโลหะได้มากขึ้น ส่วนค่าพีเอชที่เป็นกรดจะทำให้ไฮโดรเจนไอออนในสารละลายจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นไฮโดรเจนแก๊ส

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Serpone และคณะ [24] ศึกษาการสลายตัวของไซยาไนด์ (CN^-) และการนำกลับทองจากสารละลายที่มีไซยาไนด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ภายใต้แสงยูวี ($\lambda \geq 210$ นาโนเมตร) หรือเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ($\lambda \geq 30$ นาโนเมตร) พบว่าการสลายตัวของไซยาไนด์เกิดได้ดีที่พีเอชสูงกว่า 9.3 การเติม H_2O_2 ลงในน้ำเสียที่มีไซยาไนด์ทำให้ CN^- เปลี่ยนเป็น NH_3 และ CO_2 ซึ่งเกิดได้ทั้งในภาวะที่มีและไม่มีแสงยูวี โดยอัตราการสลายตัวของไซยาไนด์ในภาวะที่มีแสงยูวีจะเร็วกว่าอัตราการสลายตัวของไซยาไนด์ในภาวะที่ไม่มีแสงยูวีประมาณ 10 เท่า และการนำกลับทองจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ

สารละลายมีค่าพีเอชต่ำภายหลังการสลายตัวของไซยาไนด์และการแยก H_2O_2 ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากระบบ

Stroyuk และคณะ [25] ศึกษาการลดทอง (Au(I)) จากสารละลาย $KAu(CN)_2$ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnS และใช้ Na_2SO_3 เป็นสารล่อโฮล พบว่าความสามารถในการลดทองจากสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมากขึ้น โดยจลนศาสตร์การลดทองจากสารละลายในระบบดังกล่าวมีค่าคงที่ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับ (Reversible reaction) กล่าวคือ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันระหว่าง $[Au(CN)_2]^-$ และอิเล็กตรอนที่แถบนำ ทำให้เกิดการพอกพูนของทองบนตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของ Au/ZnS ในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Au/ZnS กับโฮลที่แถบเวเลนซ์ จึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในภาวะสมดุล (Equilibrium process) โดยเมื่อใช้ ZnS เท่ากับ 0.001 โมลต่อลิตร จะสามารถนำกลับทองได้ 7.5×10^{-5} โมลต่อลิตร เมื่อใช้ $KAu(CN)_2$, Na_2SO_3 และสารเพิ่มความเสถียร (SPPH) ความเข้มข้น 2×10^{-4} , 0.01 และ 5×10^{-3} โมลต่อลิตร ตามลำดับ

Zeng และคณะ [26] ศึกษาการนำกลับทองจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองอยู่ในรูปสารประกอบทองไทโอซัลเฟต ($Au(S_2O_3)_2^{3-}$) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ตัวแปรที่ศึกษา คือ เวลาสำหรับการนำกลับทอง (0 - 48 ชั่วโมง) ความเข้มข้นของทองในรูปทองไทโอซัลเฟต (100-600 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ (7.0 - 11.0) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง MoS_2 สามารถนำกลับทองได้ร้อยละ 98.8 ภายใน 24 ชั่วโมง และการนำกลับทองจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่เวลา 48 ชั่วโมง เมื่อมีความเข้มข้นของทองในสารละลายเท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 11 ค่าความจุสูงสุดของการนำกลับทองเท่ากับ 7656.7 มิลลิกรัมต่อกรัม

Kunthakudee และคณะ [27] ศึกษาการนำกลับทองจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปราศจากไซยาไนด์ด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของสารกึ่งตัวนำ (TiO_2 , WO_3 , CeO_2 , Bi_2O_3 และ Nb_2O_5) ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ (3.2 - 10.0) และชนิดและปริมาณของสารเชิงซ้อน ($Na_2S_2O_3$, Na_2SO_3) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีกัมมันตภาพสูงสุดในการนำกลับทองทั้งในกรณีที่มีสารเชิงซ้อนและไม่มีสารเชิงซ้อนคือ TiO_2 เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง โดยการนำกลับทองจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์สมดุลภายใน 15 นาที ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 4 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 4.1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำ TiO_2 ที่ถูกใช้ในการนำกลับทอง (Au/TiO_2) ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พบว่า Au/TiO_2 ที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสารเชิงซ้อนมีกัมมันตภาพในการเร่งปฏิกิริยาการนำกลับทองสูงกว่า Au/TiO_2 ที่ได้จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารเชิงซ้อน

Changlin และคณะ [28] ศึกษาการสลายเมทิลออเรนจ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทั้งสแตนไดรออกไซด์/สังกะสีออกไซด์คอมโพสิต (WO_3/ZnO) ตัวแปรที่ศึกษา คือ เวลาที่ใช้ในการสลายเมทิลออเรนจ์ ปริมาณ WO_3 บน ZnO (ร้อยละ 1, 2, 4 และ 8 โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิการเผา (400-800 องศาเซลเซียส) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3/ZnO ที่มีทั้งสแตนไดรออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และเตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถสลายเมทิลออเรนจ์ได้สูงสุดร้อยละ 66.18 ที่เวลา 5 ชั่วโมง เนื่องจากการเติม WO_3 ลงใน ZnO จะช่วยยับยั้งการเพิ่มขนาดของอนุภาค ZnO ทำให้พื้นผิวและจำนวนหมู่ OH เพิ่มขึ้น และยังช่วยยับยั้งอัตราการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล กัมมันตภาพในการเร่งปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น

Albiter และคณะ [29] ศึกษา กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแกรฟีน/ไทเทเนียมไดออกไซด์คอมโพสิต (rGO/TiO_2 P25) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 P25) เพื่อการสลายไซยาไนด์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนัก) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง rGO/TiO_2 P25 ที่มีทองร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมีกัมมันตภาพในการสลายไซยาไนด์สูงกว่า TiO_2 P25 โดย rGO/TiO_2 P25 สามารถสลายไซยาไนด์ได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 3 ชั่วโมง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 12 เนื่องจากการเติม rGO ลงบน TiO_2 P25 จะทำให้เกิดพันธะเคมี Ti-O-C และช่วยให้การพอกพูนของผลิตภัณฑ์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น กัมมันตภาพในการเร่งปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น

Kunthakudee และคณะ [30] ศึกษาการนำกลับทองจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทองบนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Au/TiO_2) ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณทองบน TiO_2 (ร้อยละ 0.1 – 1.0 โดยน้ำหนัก) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (0.5 – 2.0 กรัมต่อลิตร) และชนิดของสารละลาย (เมทานอล เอทานอล โพรพานอล กลีเซอรอล) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทองบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีทองร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ($\text{Au}_{0.5}/\text{TiO}_2$) มีกัมมันตภาพสูงสุดในการนำกลับทอง เนื่องจากมีปริมาณทองที่เหมาะสมในการส่งเสริมการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทอง คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้น 3.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้เมทานอลเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตรเป็นสารละลาย ซึ่งสามารถนำกลับทองได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 20 นาที

Park และคณะ [31] ศึกษา กัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Solution-combustion method (SCM) สำหรับการนำกลับทองจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ที่สังเคราะห์จากสังกะสีในเตรทและไกลซีนจะมีขนาดผลึกประมาณ 30 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวเฉพาะประมาณ 120 ตารางเมตรต่อกรัม มีช่องว่างของระดับพลังงานเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ในภาวะที่ไม่มีสารละลาย ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธี SCM สามารถนำกลับทองได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 45 นาที ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO เชิงพาณิชย์สามารถนำกลับทองได้ร้อยละ 17 ที่ภาวะเดียวกัน โดยกัมมันตภาพในการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธี SCM จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเมทานอลเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นสารล่าโฮล โดยสามารถนำกลับทองได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 30 นาที หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการเติมสารล่าโฮลจะช่วยเพิ่มกัมมันตภาพในการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ที่เตรียมด้วยวิธี SCM ร้อยละ 33

Figueroa และคณะ [32] ศึกษาการนำกลับแร่เงินและทองจากสารละลายไซยาไนด์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและการตกตะกอน ตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ (9.0 – 12.0) เวลาที่ใช้ในการนำกลับโลหะ พบว่า กระบวนการเคมีไฟฟ้าสามารถนำกลับทองและเงินได้ร้อยละ 92 และ 95 ที่เวลา 20 นาที ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และปริมาณโซเดียมคลอไรด์ 4 กรัมต่อลิตร ส่วนการตกตะกอนสามารถนำกลับตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และเหล็กได้แต่ละอย่างร้อยละ 99 ที่เวลา 15 นาที ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 3-4

Song และคณะ [33] ศึกษาการนำกลับโลหะมีค่าจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทไซยาไนด์โดยการสกัดแยกไอออน (Extraction) ด้วยสาร Trioctylmethyl ammonium chloride (N263), Tributyl phosphate (TBP), n-Octanol-sulfonated kerosene ในอัตราส่วนร้อยละ x:20:10 ตัวแปรที่ศึกษา คือความเข้มข้นของ Tributyl phosphate (TBP, x) (ร้อยละ 0 - 30 โดยปริมาตร) ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ (10.0 – 14.0) เวลาในการนำกลับทอง (0 - 10 นาที) อุณหภูมิ (5.0 – 65.0 องศาเซลเซียส) พบว่าการใช้สารสกัดที่มี TBP เข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะสามารถแยกสกัดสังกะสีและเหล็กได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 5 นาที ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 14 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และสามารถแยกสกัดทองแดง สังกะสี และเหล็กได้ร้อยละ 99.2 99.8 และ 98.5 ตามลำดับ

Rakhila และคณะ [34] ศึกษาการนำกลับแร่เงินและทองจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยการดูดซับด้วยดินเหนียวคอมโพสิต พบว่า การดูดซับแร่เงินและทองจะเข้าสู่ภาวะสมดุลตั้งแต่ช่วง 2 ชั่วโมง ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับทองเท่ากับ 108.25 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนค่าความจุสูงสุดของการดูดซับเงินเท่ากับ 85 มิลลิกรัมต่อกรัม ความสามารถในการกู้คืนเงินเท่ากับร้อยละ 76.47 ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเท่ากับร้อยละ 79.85

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลเพื่อใช้ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ด้วยกระบวนการเชิงแสง และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ที่มีกัมมันตภาพสูงสุด วัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

3.1 วัสดุดิบ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรจากขั้นตอนการล้างจากกระบวนการชุบ ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผู้ผลิตแผงวงจรรายหนึ่งภายในประเทศ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (WO_3 , $\geq 99\%$, Sigma Aldrich)
2. สังกะสีไนเตรต ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.8%, Kemaus)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , 99.7%, AR grade, Merck)
4. ไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, 99.7%, AR grade, QRec)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl , 37%, Merck)
6. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, 99.9%, AR grade, QRec)

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น ME204, Mettler Toledo)
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) (รุ่น PLF160/9B, PROTHERM)
3. ปีกเกอร์ ขนาด 50 และ 250 มิลลิลิตร (Pyrex)
4. กระบอกตวง ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร (Witeg)
5. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น IQ150-77 (IQ Scientific)
6. เครื่องกวานสารแบบแม่เหล็ก รุ่น MGS-1001 (LMS)
7. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร (Witeg)
8. เครื่องกวานสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน รุ่น MSH-300 (Biosan)

9. หลอดปรอทความดันไอสูง (High pressure mercury lamp, รุ่น RUV 533 BC)
10. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (รุ่น 5804R, Eppendorf)
11. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (Shaking water bath รุ่น WSB-45 230 V, Witeg)
12. เครื่องปฏิกรณ์แก้วทรงกระบอกหน้าต่างควอตซ์
13. ขวดแกลลอนพลาสติก HDPE พร้อมจุกและฝาปิด
14. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
15. ตู้ป้องกันแสงยูวี (UV-protected box)
16. โถดูดความชื้น (Desiccator)
17. ถ้วยเผาสาร (Crucible)
18. โกร่งบดสารเซรามิกและแท่งแก้ว
19. เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล (Teflon-lined stainless-steel autoclave)
20. เตาอบลมร้อน (Hot air oven รุ่น ESCO, Isotherm)

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer รุ่น D2 Phaser, Bruker)
2. เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ (UV visible near infrared spectrometer รุ่น Lambda 950, Perkin Elmer)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer รุ่น JSM-7610FPlus และ ULTIM MAX 65, JEOL)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิซชัน (Transmission electron microscopy รุ่น JEM-3100F, JEOL)
5. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค (Brunauer-emmett-teller รุ่น Tristar II3020, Micromeritics)
6. เครื่องวิเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติบริเวณพื้นผิวของวัสดุ (X-ray photoelectron spectroscopy รุ่น Axis Ultra, Kratos)
7. การวิเคราะห์หาความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Raman spectroscopy รุ่น T64000, Horiba)
8. การวิเคราะห์สมบัติทางแสง (Photoluminescence spectrophotometer รุ่น LS-55, Perkin Elmer)

9. ศึกษาสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะและอนุมูลอินทรีย์ (Electron paramagnetic resonance รุ่น EMXmicro, Bruker)
10. การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเทคนิคเฟลมอะตอมมิแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตเมทรี (Flame atomic absorption spectrometry; Flame-AAS รุ่น A Analyst 200+ flas 400, Perkin-Elmer)
11. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะ (Inductively coupled plasma-optical emission spectrometer; ICP-OES รุ่น NexION 2000, Perkin Elmer)

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบคู่ควบ

1. ชั่งน้ำหนัก $Zn(NO_3)_2$ โดยคิดเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของ ZnO จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มัล (Teflon-lined stainless-steel autoclave) ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการเติมน้ำดีไอ (DI water) 50 มิลลิลิตร และเติมโพรพานอล 11.4 มิลลิลิตร
2. ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารลงไปในเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กจนละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. ชั่งน้ำหนัก WO_3 2 กรัม ใส่ลงในข้อ 2. แล้วนำไปปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจนละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน
4. หยดกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน
5. นำเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มัลเข้าอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เครื่องปฏิกรณ์เย็น
6. นำสารที่ได้เทใส่หลอดเพื่อปั่นเหวี่ยงแยกตะกอน ใช้หลอดดูดน้ำบริเวณชั้นบนออก และล้างด้วยเอทานอลอย่างน้อย 5 ครั้ง เพื่อกำจัดกรดไฮโดรคลอริกส่วนเกินออก
7. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
8. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ใส่ถ้วยเผาสารและเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำแบบคู่ควบ WO_3 ที่มี ZnO ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (5.0ZW)
9. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำแบบคู่ควบที่ได้เก็บในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งาน

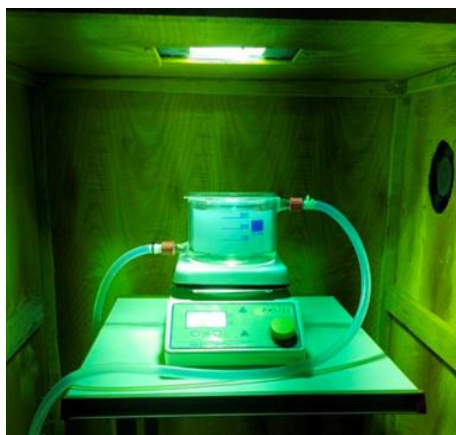
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-9 โดยเปลี่ยนปริมาณ ZnO ตามร้อยละบน WO_3 ที่ต้องการ

3.5.2 การทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

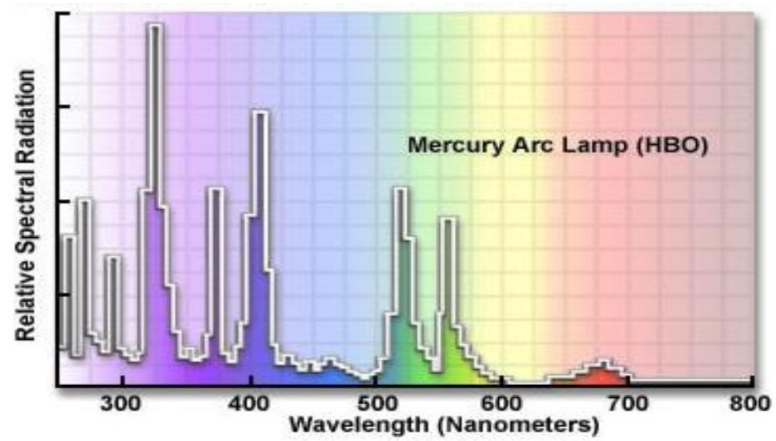
1. บรรจุตัวอย่างน้ำเสียของการผลิตแผงวงจรพิมพ์ ปริมาตร 248 มิลลิลิตร ลงในเครื่องปฏิกรณ์ แก้วปริมาตร 400 มิลลิลิตร
2. เติมเอทานอลปริมาตร 62 มิลลิลิตร ลงในสารละลายดังกล่าว (คิดเป็นความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร)
3. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ในข้อ 3.5.1 ปริมาณ 0.6 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่มี น้ำตัวอย่าง (คิดเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2 กรัมต่อลิตร) และประกอบเครื่อง ปฏิกรณ์แก้วเข้ากับหน้าต่างควอตซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.1
4. นำเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่ทำการประกอบเสร็จแล้วไปปั่นกวนด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที ในตู้ป้องกันแสงยูวี พร้อมกับเปิดเครื่องทำน้ำเย็นที่ควบคุมให้ น้ำมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 30 - 32 องศาเซลเซียส ให้ไหลผ่านด้านนอกเครื่องปฏิกรณ์แก้ว และเปิดพัดลมที่ช่วยระบายความร้อน หลังจากครบเวลา 30 นาที เก็บตัวอย่างใส่หลอดเก็บ ตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร
5. เปิดแสงยูวีที่มีแหล่งกำเนิดจากหลอดปรอทความดันไอสูง (แสดงสเปกตรัมในภาพที่ 3.2 [35]) เพื่อทำปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นเวลา เก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จน ครบ 7 ชั่วโมง
6. นำหลอดเก็บตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 11,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อแยก ของแข็งออกแล้วนำน้ำบริเวณชั้นบนไปวัดความเข้มข้นทองโดยใช้เทคนิคเฟลมอะตอมมิกแอบซอร์พชัน
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 9.12 เป็นพีเอช 7.02 - 11.2
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนชนิดสารละลายจากเอทานอลเป็นเมทานอลและ ไอโซโพรพานอล ตามลำดับ
9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลที่ใส่เป็นความเข้มข้น ร้อยละ 10 - 30
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบของ ZnO/WO_3 จากใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 1.0 - 2.5 กรัมต่อลิตร

3.5.3 การฟื้นฟูสภาพและทดสอบกัมมันตภาพในการนำกลับของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1. บรรจุตัวอย่างน้ำเสียของการผลิตแผงวงจรพิมพ์ ปริมาตร 248 มิลลิลิตร ที่พีเอช 11.20 ลงในเครื่องปฏิกรณ์แก้วปริมาตร 400 มิลลิลิตร
2. เติมเอทานอลปริมาตร 62 มิลลิลิตร ลงในสารละลายดังกล่าว
3. ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่กัมมันตภาพสูงสุดจากการทดสอบในข้อ 3.5.2 ปริมาณ 0.6 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่มีน้ำเสียตัวอย่าง (คิดเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2 กรัมต่อลิตร) และประกอบเครื่องปฏิกรณ์แก้วเข้ากับหน้าต่างควอตซ์
4. นำเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่ทำการประกอบเสร็จแล้วไปปั่นกวนด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที ในตู้ป้องกันแสงยูวี พร้อมกับเปิดเครื่องทำน้ำเย็นที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 30 - 32 องศาเซลเซียส ให้ไหลผ่านด้านนอกเครื่องปฏิกรณ์แก้ว และเปิดพัดลมที่ช่วยระบายความร้อน หลังจากครบเวลา 30 นาที เก็บตัวอย่างใส่หลอดเก็บตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร
5. เปิดแสงยูวีที่มีแหล่งกำเนิดจากหลอดปรอทความดันไอสูงเพื่อทำปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง
6. แยกน้ำเสียออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 11,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง นำน้ำบริเวณชั้นบนไปวัดความเข้มข้นทองโดยใช้เทคนิคฟลอมอะตอมมิกแอบซอร์พชัน
7. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 2 ครั้ง และอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (ข้อ 7) จนถึงการใช้ซ้ำครั้งที่ 5



ภาพที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แก้วเชิงแสงในตู้ป้องกันแสงยูวี



ภาพที่ 3.2 สเปกตรัมของหลอดปรอทความดันไอสูง [35]



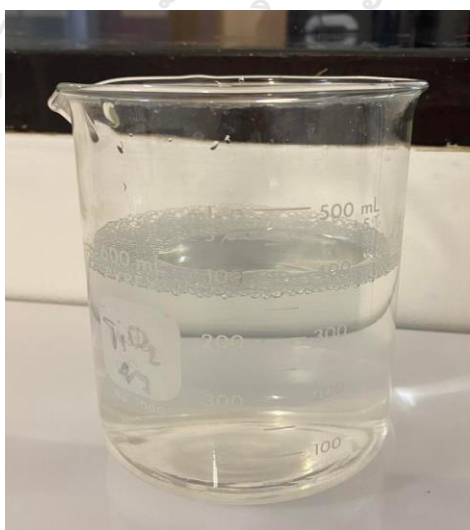
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบทั้งสแตนไดรออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ที่นำมาคู่ควบกับ WO_3 ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ควบที่มีกัมมันภาพสูงสุด ตัวแปรที่ศึกษาคือ ค่าพีเอชของน้ำเสียในช่วง 7.02 – 11.2 ชนิดของสารล้าโฮล ได้แก่ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล ปริมาณสารล้าโฮลในช่วงร้อยละ 10 – 30 โดยโมล และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 1.0 – 2.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทผลิตแผงวงจรพิมพ์แห่งหนึ่งภายในประเทศ มีสีใส ชุ่นเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณสารที่พบในน้ำเสีย โดยน้ำเสียมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9.02 - 9.11 มีไอออนทองอยู่ในช่วง 6-10 มิลลิกรัม/ลิตร และไอออนของโลหะชนิดอื่น เช่น ไอออนโพแทสเซียมประมาณ 0.20285 มิลลิกรัม/ลิตร ไอออนนิกเกิลประมาณ 0.00047 มิลลิกรัม/ลิตร ไอออนไทเทเนียมน้อยกว่า 0.00009 มิลลิกรัม/ลิตร และไอออนทองแดงน้อยกว่า 0.00006 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพที่ 4.1 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

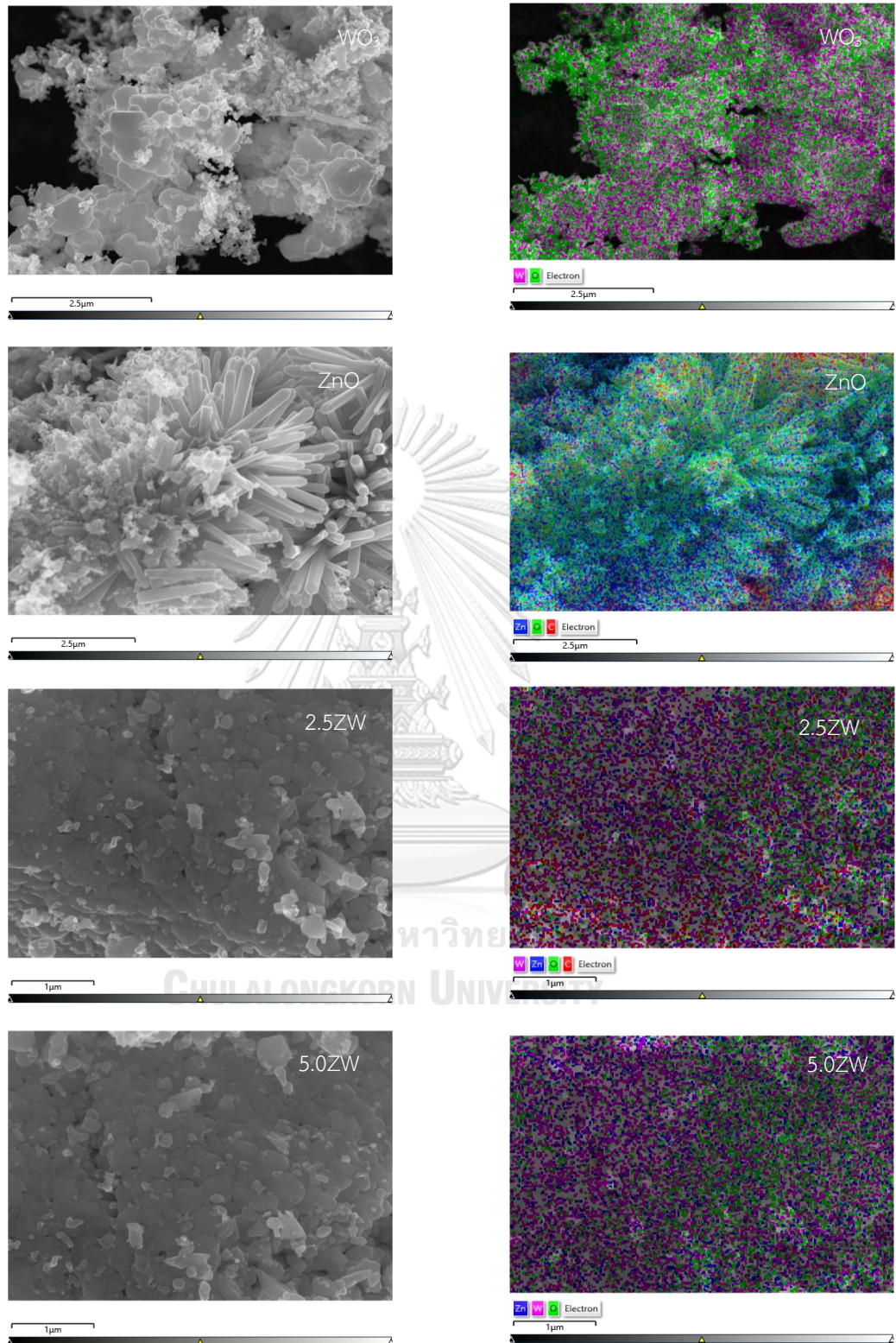
สมบัติ	ค่า
พีเอช	9.02 – 9.11
ไอออนทอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	6 – 10
ไอออนโพแทสเซียม (มิลลิกรัม/ลิตร)	< 0.20285
ไอออนไทเทเนียม (มิลลิกรัม/ลิตร)	< 0.00009
ไอออนทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร)	< 0.00006
ไอออนนิกเกิล (มิลลิกรัม/ลิตร)	< 0.00047

4.2 สันฐานวิทยาและสมบัติเชิงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

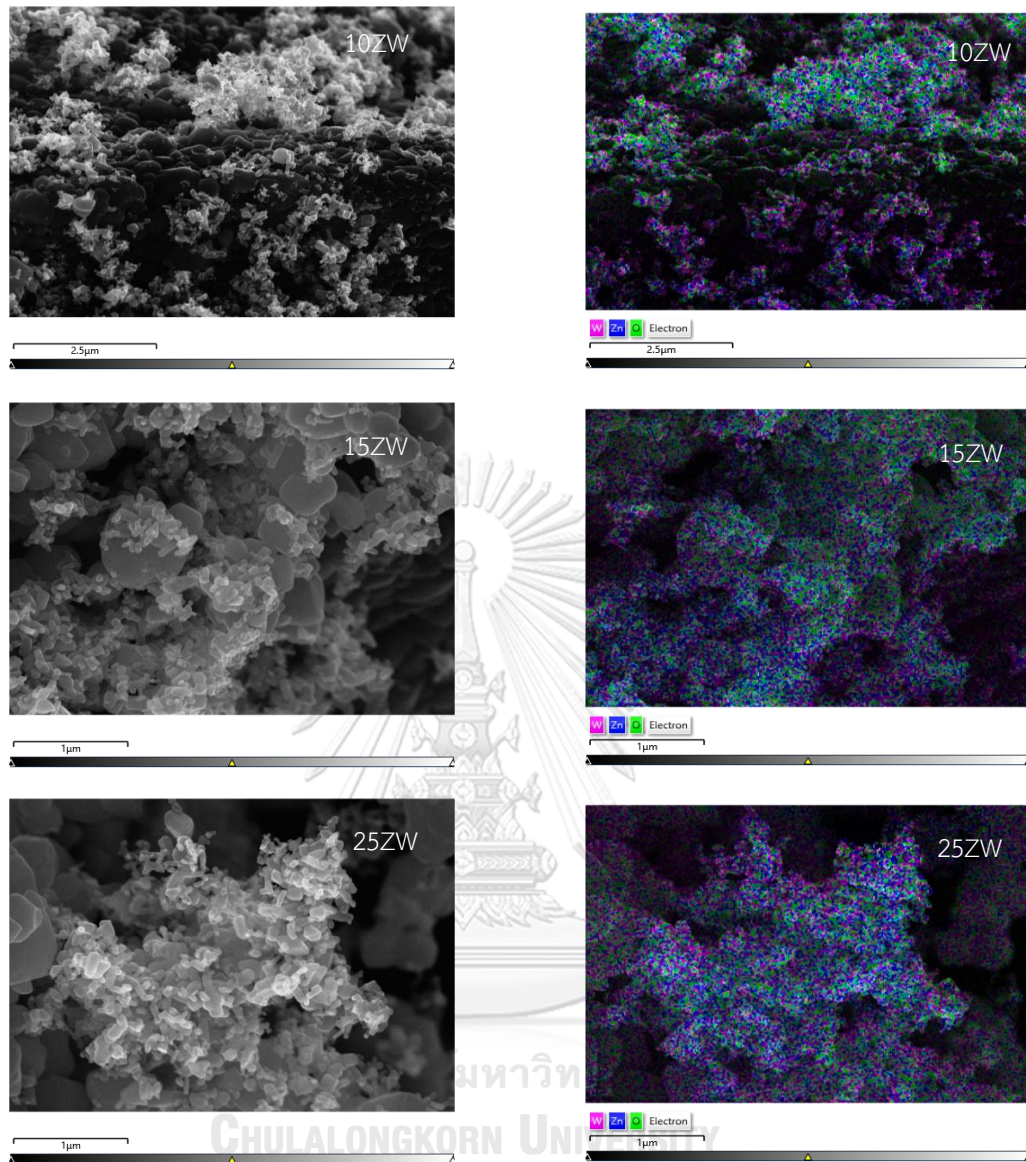
งานวิจัยในส่วนนี้จะศึกษาสมบัติและกัมมันตภาพในการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ เชิงพาณิชย์

ภาพที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและธาตุเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำแบบคูกวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (SEM-EDX) ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ พบว่าภาพจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นได้ชัดว่ามีสารกึ่งตัวนำกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ โดยเมื่อใส่ปริมาณตัวเร่งเชิงแสง ZnO เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ ZnO กระจายอยู่บนพื้นผิวดังตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ เพิ่มมากขึ้นด้วย และจากผลของ EDX พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคูกว ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนักที่เตรียมได้มีการกระจายตัวที่เหมาะสม

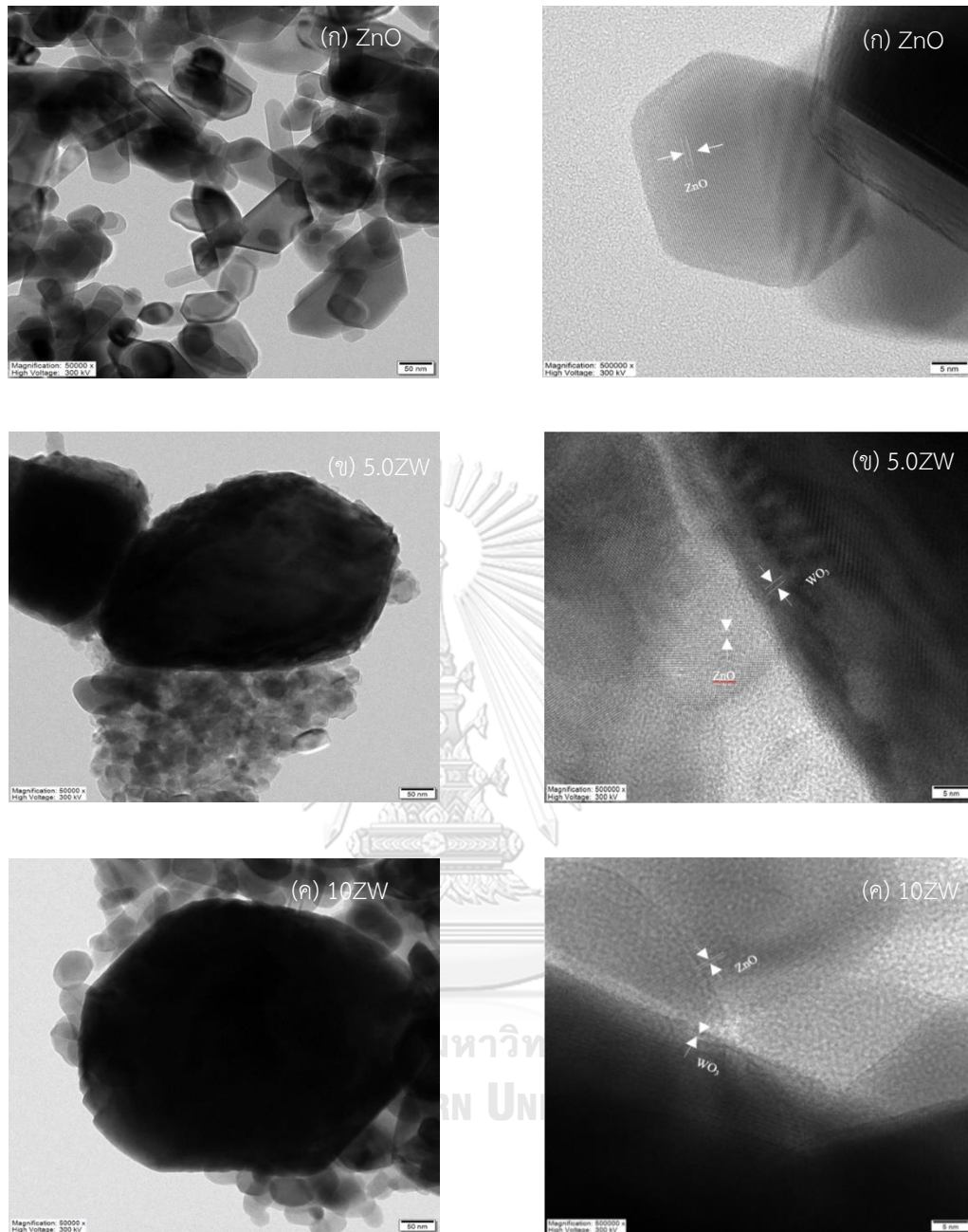
ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO และ ZnO/WO₃ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าภาพถ่ายที่กำลังขยายต่ำแสดงให้เห็นถึงการพอกพูนของ ZnO ส่วนใหญ่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ (รูปซ้าย) และภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงแสดงถึงการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค ZnO และ WO₃ อย่างชัดเจน (รูปขวา) โดย ZnO มีขนาดแลตทิซประมาณ 0.280 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับ ZnO ระนาบ (100) และ WO₃ มีขนาดแลตทิซประมาณ 0.335 นาโนเมตรซึ่งสอดคล้องกับ WO₃ ระนาบ (111) ส่วนภาพถ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/WO₃ จะแสดงให้เห็นว่าอนุภาค ZnO ได้เกาะติดอยู่กับ WO₃ และพบขนาดแลตทิซประมาณ 0.280 และ 0.335 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลลัพธ์ข้างต้นยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/WO₃ มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังค์ชัน [36]



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และ ZnO/ WO_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ซ้าย) และการกระจายตัวของธาตุ (ขวา)



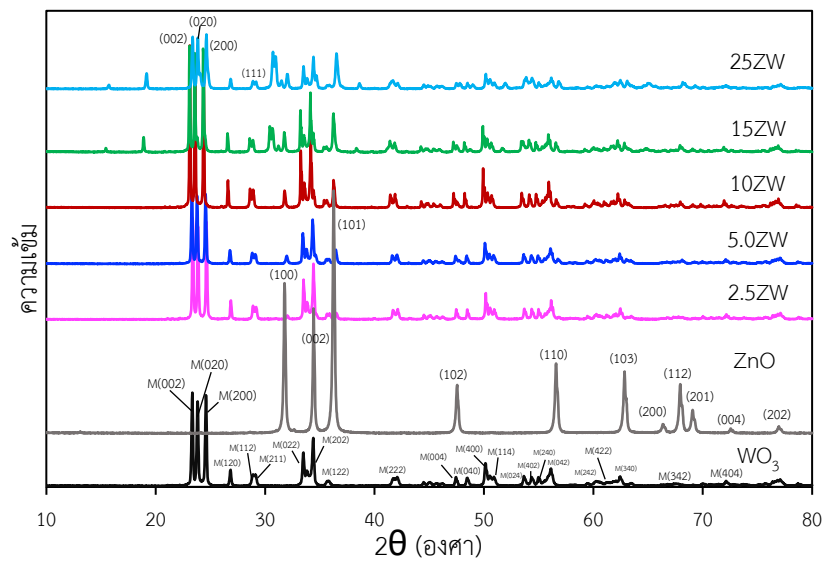
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃, ZnO และ ZnO/WO₃ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ซ้าย) และการกระจายตัวของธาตุ (ขวา) (ต่อ)



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยายต่ำ (ซ้าย) และกำลังขยายสูง (ขวา)

ภาพที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์วัฏภาคและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ZnO และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ แสดงยอดกราฟการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 23.48°, 23.86°, 24.33°, 26.96°, 34.24°, 36.05°, 49.24° และ

56.39° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (002), (020), (200), (120), (022), (202), (140), และ (420) ตามลำดับ (JCPDS file no. 43-1035) แสดงว่า WO₃ เซิงพาณิชย์มีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกแบบมอนอคลินิก ส่วนกราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสง ZnO แสดงยอดกราฟการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.79°, 34.40°, 36.27°, 47.55°, 56.54°, 62.89°, 67.90° และ 69.34° โดยสอดคล้องกับระนาบผลึก (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ตามลำดับ (JCPDS file no. 78-3323) แสดงว่า ZnO มีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal crystal structure) สำหรับกราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสง ZnO/WO₃ มีการปรากฏยอดกราฟทั้งของ WO₃ และ ZnO อย่างชัดเจน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก แสดงยอดกราฟที่สอดคล้องกับยอดกราฟของ ZnO อย่างชัดเจน โดยเฉพาะตำแหน่งที่ 2θ เท่ากับ 36.27° โดยสอดคล้องกับระนาบผลึก (101) ซึ่งเป็นยอดกราฟหลักของ ZnO ลักษณะของยอดกราฟที่ปรากฏในกราฟ XRD มีลักษณะที่แหลม แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกสูง อีกทั้งไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่งของยอดกราฟ แสดงว่า ZnO ไม่ได้เข้าไปแทรกตัวในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสง WO₃ เพียงแต่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวเท่านั้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารกึ่งตัวนำ ZnO ส่งผลให้ความสูงของยอดกราฟสารกึ่งตัวนำ ZnO เพิ่มขึ้น ดังนั้น ZnO มีการกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของ WO₃ ได้ดี แสดงว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลเกิดเป็นสารประกอบนาโน (Nanocomposite) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ควบจริงตามต้องการ แต่กรณีในตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ ZnO เท่ากับ 15 แสดงยอดกราฟการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 30.50° และ 30.74° ตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ ZnO เท่ากับ 25 แสดงยอดกราฟการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 30.74° และ 31.02° ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 15 และ 25 สอดคล้องกับระนาบผลึก (111) (JCPDS file no. 15-0774) [37] แสดงถึงยอดกราฟของ ZnWO₄ เพิ่มขึ้นมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเซิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่ร้อยละ 2.5 5.0 และ 10



ภาพที่ 4.4 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบคูกั่วบ ZnO/WO_3 ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก

ขนาดผลึก (Crystallite size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคูกั่วบ ZnO/WO_3 สามารถคำนวณได้จากสมการของ Debye-Scherrer ตามสมการที่ (4.1) [41]

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ	D	คือ	ขนาดผลึก (นาโนเมตร; nm)
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ($\text{Cu K}\alpha = 0.15406 \text{ nm}$)
	β	คือ	ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของยอดกราฟ (FWHM)
	θ	คือ	มุมของแบร็ก (Bragg's angle)

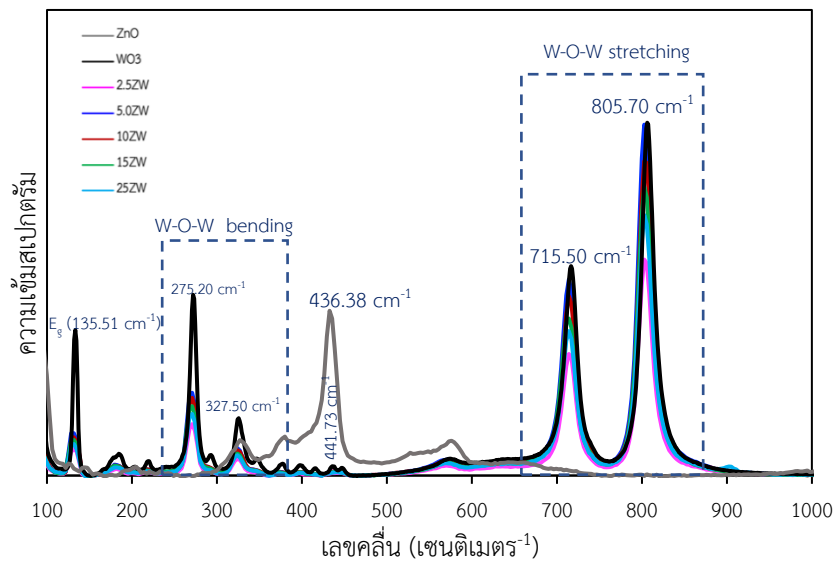
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคูกั่วบ ZnO/WO_3 ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO มีขนาดผลึก เท่ากับ 52.62 และ 42.18 นาโนเมตร และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคูกั่วบ ZnO/WO_3 ที่ร้อยละ 2.5 5.0 10 15 และ 25 โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกทั้ง 2 ชนิด ใกล้เคียงกับขนาดผลึกของสารเดี่ยวแต่ละตัว

ตารางที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO WO₃ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา เชิงแสง	ขนาดผลึกของ (นาโนเมตร) ^ก		สมบัติเชิงพื้นผิว			แถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
	ZnO	WO ₃	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./กรัม)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	
WO ₃	-	52.62	1.624	0.037	8.840	2.66
ZnO	42.18	-	2.249	0.130	17.784	3.24
2.5ZW	43.04	52.62	1.995	0.014	5.238	2.96
5.0ZW	43.25	52.63	1.871	0.028	7.935	2.96
10ZW	45.47	52.62	2.517	0.034	14.74	2.96
15ZW	43.00	52.64	2.519	0.020	17.331	2.71
25ZW	43.95	52.63	2.810	0.032	21.075	2.73

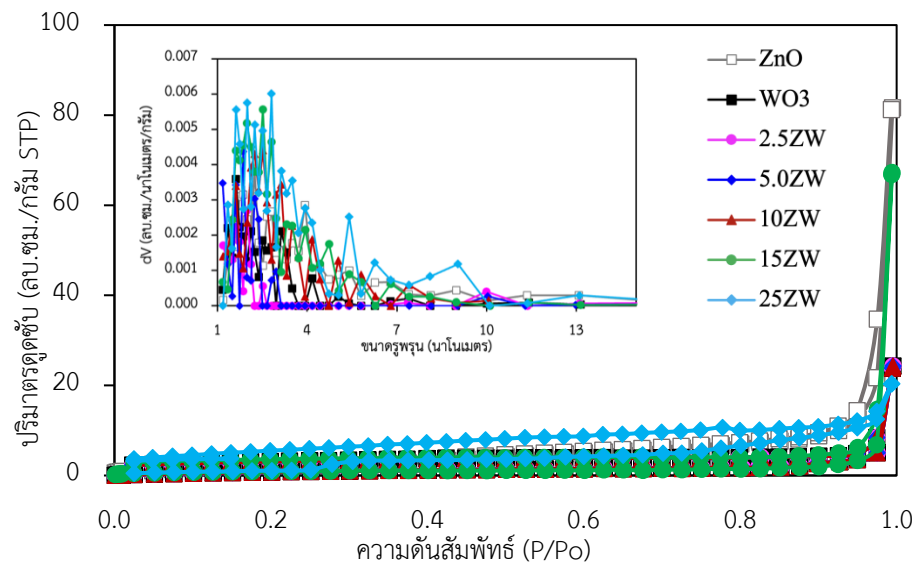
^ก คำนวณจากสมการของ Debye-Scherrer ที่ระนาบ (101) และ (002) สำหรับ ZnO และ WO₃ ตามลำดับ

ภาพที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ZnO และ ZnO/WO₃ พบว่าสเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO แสดงยอดกราฟที่ตำแหน่ง 436.38 เซนติเมตร⁻¹ ส่วนสเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ แสดงยอดกราฟที่ตำแหน่ง 275.20 และ 327.50 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงภาวะดัด (Bending mode) ของ W-O-W และยอดกราฟที่ตำแหน่ง 715.50 และ 805.70 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงภาวะยืด (Stretching mode) ของ W-O-W [42, 43] ส่วนสเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ แสดงจุดสูงสุดที่ 135.51 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นใน WO₃ [19, 38, 39] จุดสูงสุดทั้งสองปรากฏที่เลขคลื่น 135.51 และ 441.73 เซนติเมตร⁻¹ ใน ZnO/WO₃ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของอะตอมสังกะสี (Zn) และโครงตาข่ายย่อยออกซิเจน (O) ตามลำดับ จุดสูงสุดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 441.73 เซนติเมตร⁻¹ ยืนยันว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ (Wurtzite) เมื่อพิจารณาตำแหน่งยอดกราฟ W-O-W ของ ZnO/WO₃ จะเกิดการเลื่อนของตำแหน่งยอดกราฟไปทางลบเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากเกิดปริมาณที่ว่างออกซิเจน (Oxygen vacancies) [39]



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมรามานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ZnO และ ZnO/WO₃

ภาพที่ 4.6 แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N₂ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ZnO และ ZnO/WO₃ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N₂ ชนิด III ตามการจำแนกของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนต่ำ [40] ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N₂ ชนิด III แสดงถึงลักษณะเฉพาะของการดูดซับและการคายซับของความไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนต่ำและตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N₂ ชนิด III ตามลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของการดูดซับและการคายซับของโครงสร้างวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีความพรุนต่ำดังแสดงในภาพแทรกของภาพที่ 4.6 ค่าพื้นที่ผิวขนาด และปริมาตรรูพรุนของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ และ ZnO/WO₃ มีสมบัติเชิงพื้นที่ผิวค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO มีสมบัติเชิงพื้นที่ผิวที่ดีกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาสูง ประสิทธิภาพในการแยกอิเล็กตรอนและโฮลจะสูง ซึ่งมักส่งผลเชิงบวกต่อกัมมันตภาพในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง



ภาพที่ 4.6 ไอโซเทอรั่มการดูดซับและการคายซับแก๊ส N_2 ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 , ZnO และ ZnO/WO_3

ภาพที่ 4.7 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO/WO_3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 สามารถการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความสามารถในการดูดกลืนแสงทั้งแสงยูวี และแสงมองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นต่ำ (Short wavelength visible light) ในขณะที่ตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันแต่สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้มากกว่าและดูดกลืนแสงมองเห็นได้น้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของ ZnO ที่อยู่ในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 ซึ่งสามารถดูดกลืนได้เฉพาะแสงยูวีเท่านั้น [23] ค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถคำนวณได้จากการนำข้อมูลการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยามาคำนวณตามสมการของ $Tauc$ [9, 10] ดังสมการ (4.2) และแสดงเป็นกราฟ $Tauc$ ($Tauc$'s plot) แสดงในภาพที่ 4.7(ข) กราฟ $Tauc$ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO/WO_3 โดยจากภาพจะเห็นว่าเมื่อลากเส้นตรง (เส้นปะ) ไปตัดแกน x จะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Bandgap energy) สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 แต่ต่ำกว่า ZnO กล่าวคือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2.5ZW 5.0ZW 10ZW 15ZW และ 25ZW ค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.96 2.96 2.96 2.71 และ 2.73 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO ค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.24 อิเล็กตรอนโวลต์ (ตารางที่ 4.2) ภาพที่ 4.7(ค) สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 พบว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW มีค่าต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ZnO 2.5ZW 10ZW 15ZW และ 25ZW แต่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW มีอัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO 2.5ZW 10ZW 15ZW และ 25ZW

$$(\alpha hv)^n = A(hv - E_g) \quad (4.2)$$

เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

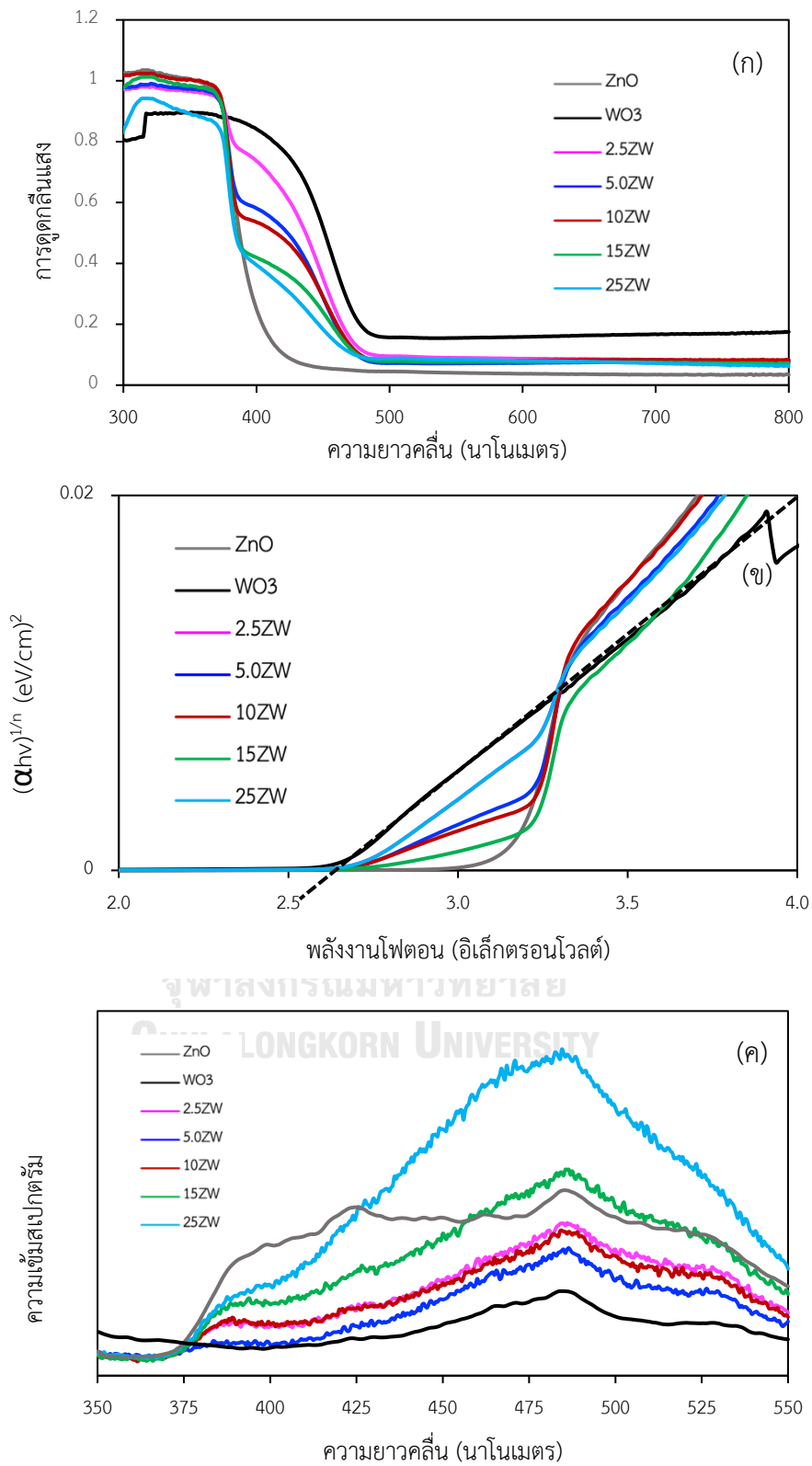
hv คือพลังงานโฟตอน

A คือค่าคงที่

E_g คือค่าแถบช่องว่างพลังงาน

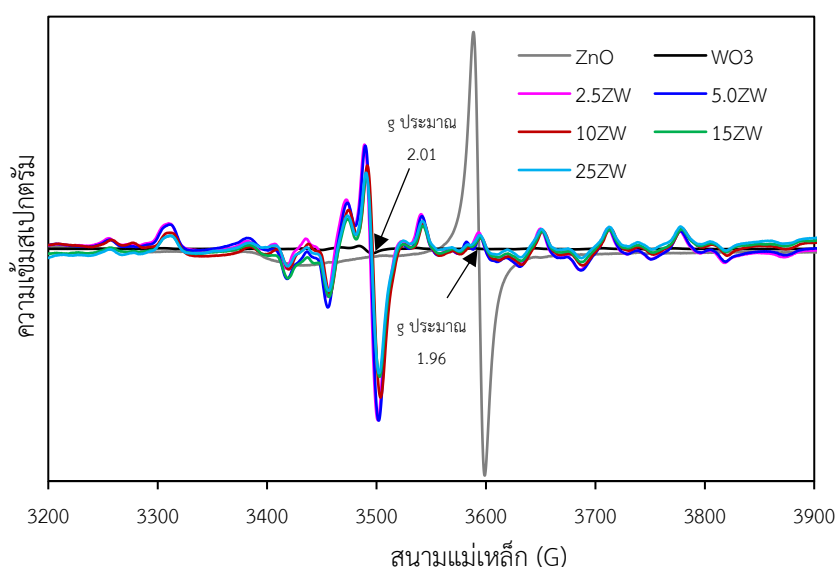
n คือแฟกเตอร์ของค่าแถบช่องว่างพลังงาน





ภาพที่ 4.7 (ก) การดูดกลืนแสง และ (ข) กราฟ Tauc ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ และ ZnO/WO₃ (ค) สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃

ภาพที่ 4.8 แสดงผลจากเทคนิคเรโซแนนซ์แม่เหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 ZnO และ ZnO/WO_3 เป็นการวัดอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ (Unpaired electron) เพื่อตรวจสอบถึงความบกพร่องและสารเจือปนที่เกิดจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กสูงจะบอกถึงการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนสูง [41] พบว่าสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO WO_3 และ ZnO/WO_3 ปรากฏชัดเจนที่ค่า g (g value) ประมาณ 1.96 2.01 และ 2.01 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancy) [39] ที่เกิดขึ้นในผลึก โดยความเข้มของสัญญาณแสดงถึงปริมาณตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในผลึกโดยสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กของ ZnO มีความเข้มสูงมากแสดงว่ามีปริมาณที่ว่างออกซิเจนในโครงสร้างมาก ในทางกลับกันสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กของ WO_3 มีความเข้มต่ำมาก บ่งชี้ถึงการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนน้อยมาก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO_3 แสดงสัญญาณการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงบ่งบอกถึงการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนในโครงสร้างของทั้งสองสแตนด์ตรอนไฮดรอกไซด์จากการสังเคราะห์จะเห็นว่า 2.5ZW และ 5.0ZW มีความเข้มของสัญญาณสูงกว่าตัวเร่งเชิงแสงตัวอื่นๆ แสดงถึงการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกัน โดยการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงทำหน้าที่เป็นหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (Electron trap) [41] ซึ่งช่วยให้อัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลต่ำ กว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO 2.5ZW 10ZW 15ZW และ 25ZW

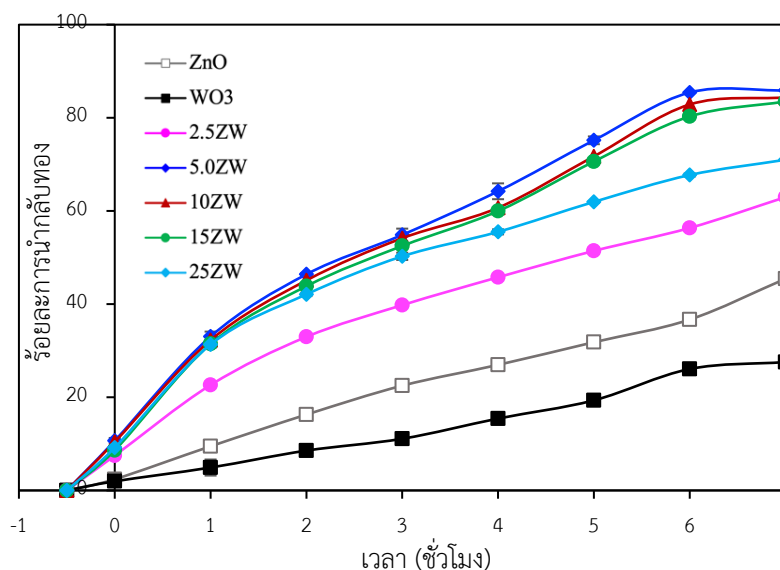


ภาพที่ 4.8 เทคนิคเรโซแนนซ์แม่เหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO_3 และ ZnO/WO_3

4.3 กัมมันตภาพในการนำกลับทองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃

4.3.1 ผลของปริมาณสารคู่ควบซิงค์ออกไซด์

ภาพที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบคู่ควบ ZnO/WO₃ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยในการทดสอบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่มีร้อยละ ZnO ในช่วง 2.5 – 25 โดยน้ำหนัก ค่าพีเอช 9.02 ปริมาณสารล้าไฮดร้อลละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ มีความสามารถในการนำกลับทองได้ร้อยละ 27.56 ที่เวลา 7 ชั่วโมง ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO มีความสามารถในการนำกลับทองได้ร้อยละ 45.45 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 2.5ZW 5.0ZW 10ZW 15ZW และ 25ZW พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงดังกล่าวมีกัมมันตภาพในการนำกลับทองร้อยละ 62.97 85.88 84.38 83.51 และ 70.99 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจร

จากผลทดสอบกัมมันตภาพในการนำกลับทอง พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำแบบคู่ควบ ZnO/WO₃ สามารถเพิ่มกัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ และ ZnO โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำแบบคู่ควบ 5.0ZW มีการนำกลับทองได้มากที่สุด อันดับถัดมา คือ 10ZW 15ZW 25ZW และ 2.5ZW ตามลำดับ จากการคำนวณดังสมการ (4.3) และ (4.4) [36] โดยใช้ผลจากภาพที่ 4.7 (ก)

และ 4.7 (ข) พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ขอบของแถบเวเลนซ์ของ ZnO มีค่า 2.92 อิเล็กตรอนโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ขอบของแถบการนำของ ZnO มีค่า -0.32 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ขอบของแถบเวเลนซ์ของ WO₃ มีค่า 3.43 อิเล็กตรอนโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่ขอบของแถบการนำของ WO₃ มีค่า 0.77 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นแถบเวเลนซ์ของ ZnO จะตกคร่อมช่วงของศักย์ไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบเชิงซ้อนทองไซยาไนด์ เมื่อกระตุ้น ZnO/WO₃ ด้วยแสงยูวีจะทำให้อิเล็กตรอนถ่ายโอนจากแถบนำของ WO₃ ไปที่แถบวาเลนซ์ของ ZnO อิเล็กตรอนที่จะเกิดและปฏิกิริยารีดักชันของ [Au(CN)₂]⁻ จะเกิดขึ้นที่แถบนำของ ZnO ส่วนสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แถบเวเลนซ์ของ WO₃ [36] จากผลของเทคนิคเรโซแนนซ์แม่เหล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW ที่มีความเข้มของสัญญาณสูงกว่าตัวเร่งเชิงแสงตัวอื่นๆ แสดงถึงการมีปริมาณที่ว่างออกซิเจนที่มากกว่า ทำให้อัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงตัวคู่ควบตัวอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃ (ภาพที่ 4.7(ค)) กัมมันตภาพในการเกิดปฏิกิริยานำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW จึงสูงกว่า

$$E_{VB} = X_e + 0.5E_g - E_e \quad (4.3)$$

$$E_{CB} = X_e - 0.5E_g - E_e \quad (4.4)$$

เมื่อ E_{VB} คือศักย์พลังงานที่ขอบของแถบเวเลนซ์

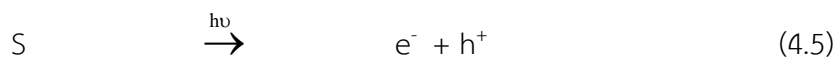
E_{CB} คือศักย์พลังงานที่ขอบของแถบการนำ

X_e คืออิเล็กโตรเนกาติวิตีของ ZnO และ WO₃ ค่าประมาณ 5.80 และ 6.60 ตามลำดับ

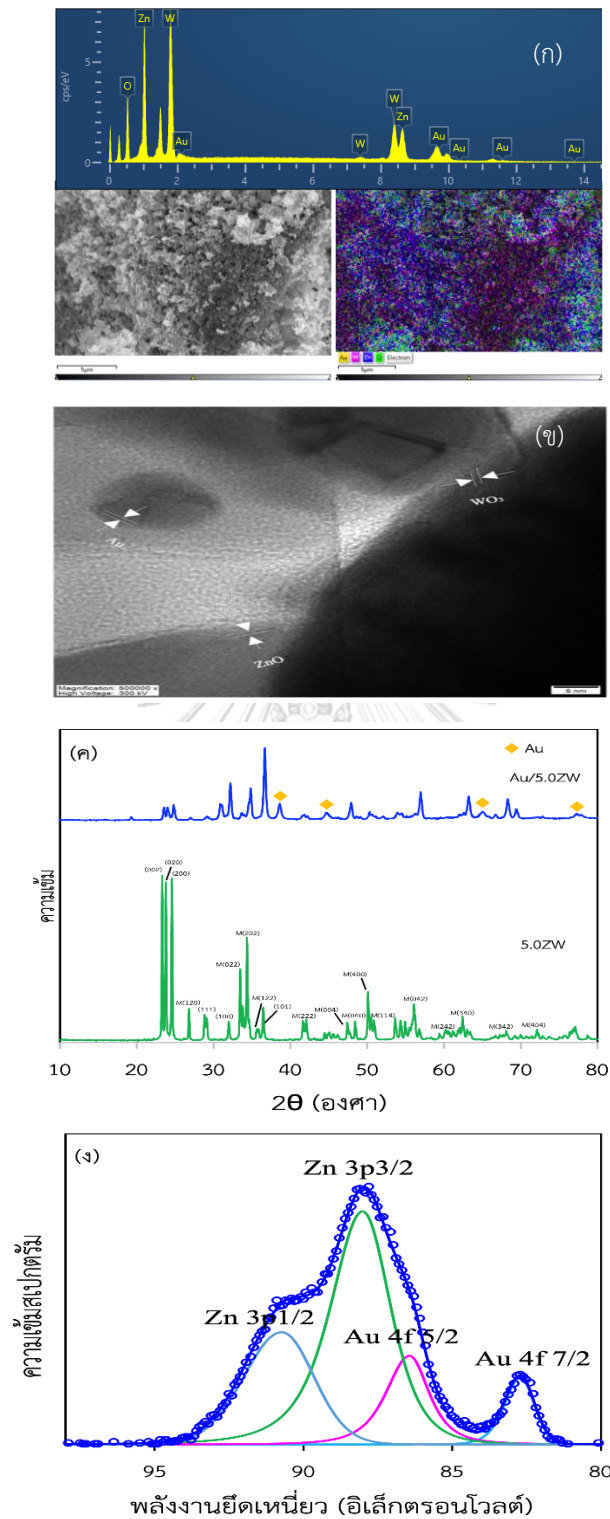
E_g คือช่องว่างพลังงาน

E_e คือพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระค่าประมาณ 4.5 อิเล็กตรอนโวลต์

กลไกการแยกหรือการนำกลับโลหะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงหรือสารกึ่งตัวนำ (S) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแสงที่ตกกระทบมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ โดยอิเล็กตรอน (Electron, e⁻) ที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปที่แถบการนำ (Conduction band) และทิ้งโฮล (Hole, h⁺) หรือหลุมอิเล็กตรอนไว้ (ปฏิกิริยาที่ (4.5)) (2) อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่ไปตำแหน่งกัมมันต์ (Active site) บนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และ (3) ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและไอออนของโลหะเป็นผลิตภัณฑ์ ในระบบที่มีสารประกอบทองในรูปของทองไซยาไนด์ ([Au(CN)₂]⁻) อิเล็กตรอนที่แถบนำจะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดไซยาโนออเรตหรือสารประกอบทองในรูปของทองไซยาไนด์เป็นไซยาไนด์และโลหะทอง (Au) เกาะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังปฏิกิริยาที่ (4.6) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์จะออกซิไดซ์ไฮดรอกไซด์ไอออนเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับไซยาไนด์เป็นไซยาเนตและน้ำ ดังปฏิกิริยาที่ (4.7)-(4.8)



ภาพที่ 4.10 แสดงการมีอยู่ของอนุภาคทองบนตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ จากผลภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/5.0ZW ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ พบว่าอนุภาคของทองมีการกระจายตัวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW อย่างสม่ำเสมอ (ภาพที่ 4.10(ก)) จากผลภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/5.0ZW ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยายสูง (ภาพที่ 4.10(ข)) พบว่ามีขนาดแลตทิซที่ชัดเจนที่ 0.280 0.335 และ 0.240 สอดคล้องกับ ZnO ในระนาบ (100) WO₃ ในระนาบ (111) และ Au ในระนาบ (111) ตามลำดับ จากการวิเคราะห์วิภาคและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบคู่ควบ Au/5.0ZW ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) (ภาพที่ 4.10(ค)) พบว่ามีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบมอนอคลินิกของ WO₃ กับเฮกซะโกนอลของ ZnO และยังพบยอดกราฟการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.26, 44.47°, 64.72° และ 77.74° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับของอนุภาคทอง (PDF 01-077-9662) และจากสเปกตรัม XPS จะเห็นว่ามีความเข้มของยอดกราฟ Au 4f ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบสูงสุดอยู่ที่ 87.80 อิเล็กตรอนโวลต์ (ภาพที่ 4.10(ง)) เมื่อทำการแยกส่วนของยอดกราฟ (Deconvolution) จะปรากฏยอดกราฟย่อยทั้งหมด 4 ยอดกราฟ ที่ตำแหน่ง Au 4f_{7/2} (82.73 อิเล็กตรอนโวลต์), Au 4f_{5/2} (86.43 อิเล็กตรอนโวลต์), Zn 3p_{3/2} (88.01 อิเล็กตรอนโวลต์) และ Zn 3p_{1/2} (90.73 อิเล็กตรอนโวลต์) และมีระยะห่างระหว่างยอดกราฟ Au 4f เท่ากับ 3.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของทองในสถานะโลหะ (Metallic state) [42] โดยการเลื่อนตำแหน่งของยอดกราฟ Au 4f ไปทางด้านลบเมื่อเทียบกับตำแหน่งยอดกราฟมาตรฐานของ Au 4f_{7/2} (84.00 อิเล็กตรอนโวลต์) และ Au 4f_{5/2} (87.70 อิเล็กตรอนโวลต์) [43] แสดงถึงอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งมากระหว่าง Au และ ZnO [44]



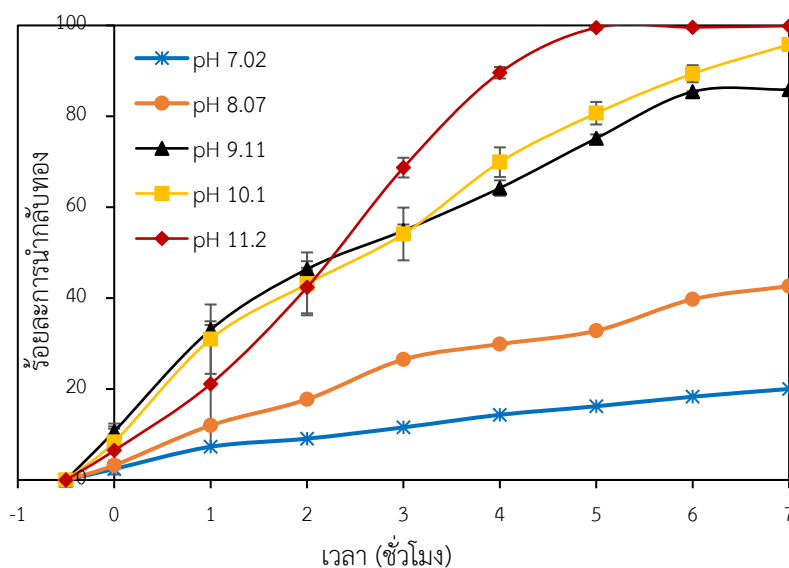
ภาพที่ 4.10 (ก) ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/5.0ZW ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (ข) ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/5.0ZW ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่กำลังขยายสูง (ค) กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง Au/5.0ZW และ (ง) สเปกตรัม XPS

4.3.2 ผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

ภาพที่ 4.11 แสดงผลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยในการทดสอบใช้น้ำเสียที่ค่าพีเอช 7.02 – 11.2 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (NaOH) ในการปรับค่าพีเอช ปริมาณเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าการเพิ่มค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับทอง กล่าวคือร้อยละการนำกลับทองจะมีค่าเท่ากับ 20.02 42.65 85.88 95.79 และ 99.87 ที่พีเอช 7.02 8.07 9.11 10.1 และ 11.2 ตามลำดับ ที่เวลา 7 ชั่วโมง เนื่องจากกลไกการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์แสดงในงานวิจัยที่ผ่านมา [45] พบว่าไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะมีผลต่อกัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์ กล่าวคือไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับโซลตั้งปฏิกิริยา (4.9) ส่งผลให้โซลที่เกิดขึ้นถูกใช้ในระบบ อัตราการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนและโซลจึงลดลง กัมมันตภาพในการนำกลับทองจึงสูงขึ้น



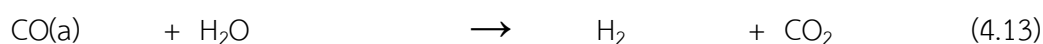
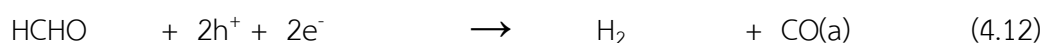
โดยกัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ที่พีเอช 11.2 ให้ค่าการนำกลับทองร้อยละ 99.87 แสดงว่าปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำเสียที่พีเอชในช่วงดังกล่าวมีเพียงพอในการทำปฏิกิริยาและไม่ได้เป็นตัวควบคุมกัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์



ภาพที่ 4.11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์

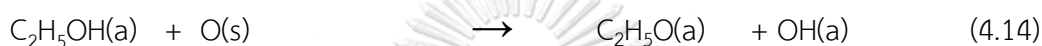
4.3.3 ผลของชนิดสารละลาย

ภาพที่ 4.12 แสดงผลของชนิดสารละลายต่อสัมประสิทธิ์การนำกลับของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยในการทดสอบใช้น้ำเสียที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11.2 ปริมาณสารละลายร้อยละ 20 โดยปริมาตร โดยสารละลายที่ใช้ คือ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าการใช้เอทานอลเป็นสารละลายสามารถนำกลับของได้ร้อยละ 100 ซึ่งสูงกว่าการไม่ใช้สารละลาย โดยการไม่ใช้สารละลายสามารถนำกลับของได้เพียงร้อยละ 64.91 ส่วนการใช้เมทานอลและไอโซโพรพานอลเป็นสารละลายสามารถนำกลับของได้ร้อยละ 83.38 และ 79.37 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการมีสารละลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำกลับของ [45, 46] ทั้งนี้การใช้เอทานอลเป็นสารละลายทำให้ประสิทธิภาพในการนำกลับของมากที่สุด เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าของออกซิเดชันของเมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล คือ 0.016, 0.084 และ 0.105 V/NHE ตามลำดับ [47] โดยปกติสารที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดออกซิเดชันน้อยจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนหรือสารละลายที่ดี [46-48] แต่เมทานอลไม่เหมาะกับการนำกลับของ เพราะเมทานอล (CH_3OH) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์เป็นอนุผลิตภัณฑ์ของเมทานอล ($\text{H}_2\text{C}^+\text{OH}$) ดังปฏิกิริยา (4.10) หลังจากนั้นอนุผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮดรอกไซด์ (OH^-) และไฮดรอกไซด์เป็นไฮโดรเจน (H_2) และฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) ดังปฏิกิริยา (4.11) ซึ่งฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) เกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์และอิเล็กตรอนได้เป็นไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังปฏิกิริยา (4.12) ปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ได้ออกมาเป็นไฮโดรเจน (H_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังปฏิกิริยา (4.13) โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และฟอร์มัลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นมักจะดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและขัดขวางการทำปฏิกิริยาการนำกลับของ [46, 47]

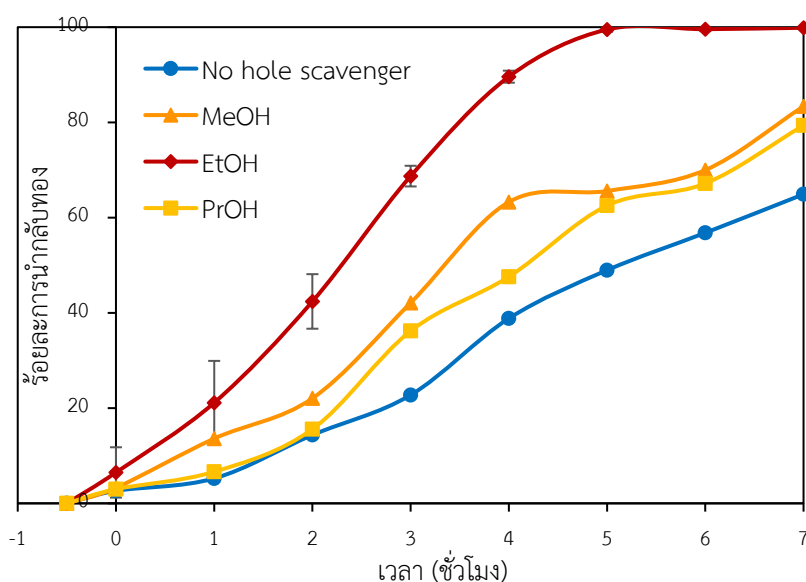


จากงานวิจัยสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้สารละลายเป็นเอทานอลดังปฏิกิริยา (4.14) - (4.15) [47] จะไม่มีอิเล็กตรอนถูกใช้ในปฏิกิริยา ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงที่ไปกระตุ้นสารกึ่งตัวนำจะเข้าไปทำปฏิกิริยารีดักชันเกิดการนำกลับของได้มากขึ้น นอกจากนี้สารละลายยัง

สามารถดูดซับและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพื่อช่วยลดปริมาณออกซิเจนในน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ [49, 50] ดังนั้นโอกาสของการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนที่ละลายน้ำและอิเล็กตรอนจึงลดลง โดยกลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลและโฮลแสดงดังปฏิกิริยา (4.14) – (4.16) กล่าวคือเอทานอลจะดูดซับบนระนาบของ WO_3 แยกตัวเป็นสารเอทอกไซด์ (C_2H_5O) และไฮดรอกไซด์ (OH) ดังปฏิกิริยา (4.14) [49] ในภาวะที่มีแสงกระตุ้นที่มีพลังงานที่เพียงพอ สารเอทอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโฮลได้เป็นอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Oxy radical, $CH_3C\cdot HO$) ดังปฏิกิริยา (4.15) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อเนืองกับโฮลได้เป็นสารแอซีทอลดีไฮด์ (C_2H_4O) ดังปฏิกิริยา (4.16) [50, 51]ทำให้อัตราการนำกลับไอออนโลหะสูงขึ้น [45]



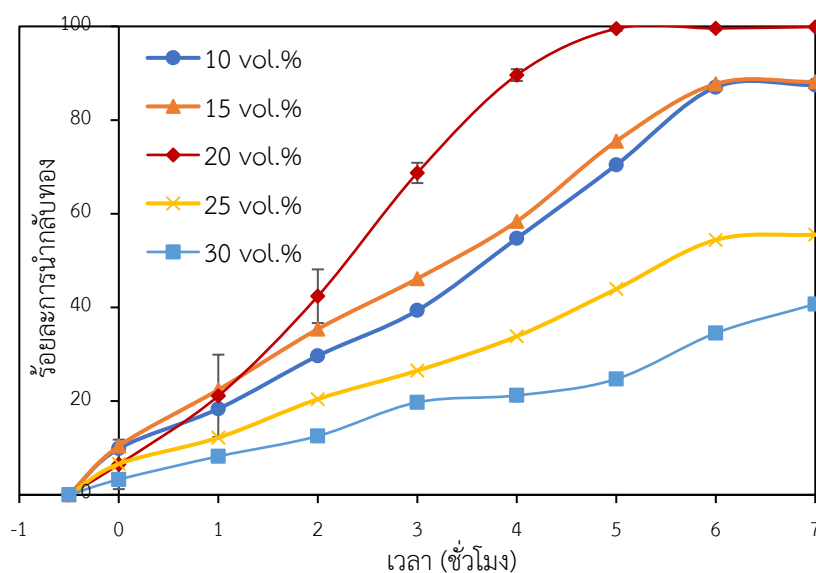
ส่วนไอโซโพรพานอลมีค่าศักย์ไฟฟ้าของออกซิเดชันสูง โมเลกุลขนาดใหญ่เป็นสายโซ่จึงเกิดการขัดขวางการทำปฏิกิริยา ปริมาณนำกลับทองจึงน้อยกว่าเอทานอล และเมทานอล



ภาพที่ 4.12 ผลของชนิดสารล่าโฮลต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควม 5.0ZW ในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์

4.3.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮล

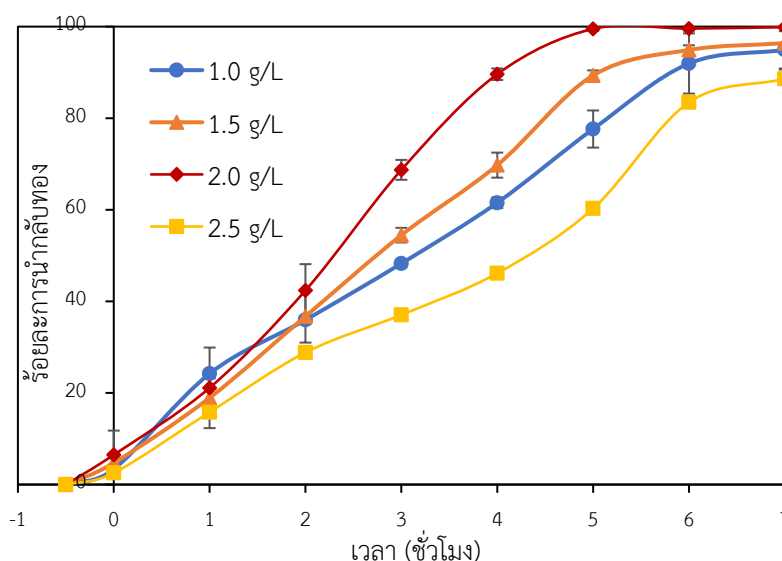
ภาพที่ 4.13 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮลต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยในการทดสอบใช้น้ำเสียที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11.2 ใช้เอทานอลเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 15 20 25 และ 30 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าร้อยละการนำกลับของจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจนถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลมากกว่าร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะส่งผลทำให้กัมมันตภาพในการนำกลับของลดลง กล่าวคือปริมาณสารละลายไฮลชนิดเอทานอล ร้อยละ 10 15 20 25 และ 30 โดยปริมาตร จะสามารถนำกลับของได้ร้อยละ 87.47 88.15 99.87 55.55 และ 40.71 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้สารละลายไฮลในกระบวนการเชิงแสงมากเกินไปจะทำให้เกิดการดูดซับเอทานอลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นแบบแข่งขันและขัดขวางกันเอง กัมมันตภาพในการทำปฏิกิริยากับไฮลจึงลดลง [52, 53] และหากใช้ความเข้มข้นของสารละลายไฮลน้อยเกินไปอัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและไฮลจะสูงขึ้นประสิทธิภาพในการนำกลับโลหะจึงลดลง ดังนั้นค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮลที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.13 ผลของปริมาณสารละลายไฮลต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์

4.3.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาพที่ 4.14 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW ในช่วง 1.0 – 2.5 กรัมต่อลิตร ต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ โดยในการทดสอบใช้น้ำเสียที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 11.2 ใช้เอทานอลเป็นสารล่าโฮล ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าร้อยละการนำกลับของจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW จนถึง 2 กรัมต่อลิตร เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มบริเวณกัมมันต์ (Active site) ในการทำปฏิกิริยา กัมมันตภาพในการนำกลับของจึงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW มากกว่า 2 กรัมต่อลิตร จะส่งผลทำให้กัมมันตภาพในการนำกลับของลดลง เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปทำให้เกิดการกระเจิงของแสง (Light scattering) [54] หรือการบดบังกันเอง (Self-shading) [55, 56] ทำให้แสงกระทบพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง กัมมันตภาพในการนำกลับของจึงลดลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW ที่เหมาะสมในการนำกลับของในภาวะที่ศึกษาคือ 2 กรัมต่อลิตร

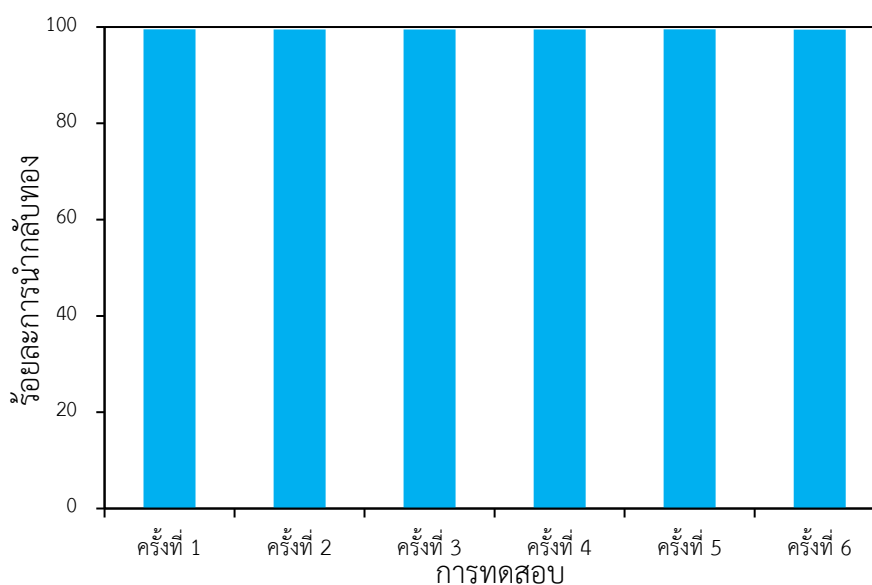


ภาพที่ 4.14 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW ต่อกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW ในการนำกลับของจากน้ำเสียการผลิตแผงวงจรพิมพ์

4.4 เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO/WO₃

ภาพที่ 4.15 แสดงร้อยละการนำกลับของด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW ที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยในการทดสอบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ 5.0ZW น้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 11.2 ปริมาณสารล่าโฮลชนิดเอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.27 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่ง

ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถนำกลับทองได้ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 98.80 ที่เวลา 5 ชั่วโมง เมื่อผ่านการใช้งานซ้ำถึง 6 ครั้ง (งานวิจัยด้านนี้จะศึกษาการใช้งานซ้ำประมาณ 5-6 ครั้ง) แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW มีเสถียรภาพสูงในการนำกลับทอง โดยปริมาณทองที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา 5.0ZW สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ด้วยการชะละลายด้วยกรดกัดทอง [46] ทำให้ได้ไอออนของทองในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการชุบในอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรพิมพ์ได้อีกครั้ง



ภาพที่ 4.15 ผลของร้อยละการนำกลับทองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 5.0ZW ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.27 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เอทานอลเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร เวลา 5 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง มีข้อสรุปดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ ทุกชนิดมีกัมมันตภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์ด้วยกระบวนการเชิงแสงสูงกว่า ZnO และ WO₃
2. ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/WO₃ ที่มี ZnO ร้อยละ 5 โดยมวล (5.0ZW) มีประสิทธิภาพในการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์มากที่สุด คือร้อยละ 99.87 ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์เท่ากับ 11.2 ปริมาณสารล้าไฮลชนิดเอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัมต่อลิตร ความเข้มแสง 3.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และเวลา 7 ชั่วโมง และมีเสถียรภาพในการนำกลับทองครั้งที่ผ่านการใช้งานซ้ำ 6 ครั้ง
3. ปัจจัยที่ผลต่อการเพิ่มกัมมันตภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงคู่ควบ ZnO/WO₃ คือการมีอยู่ของช่องว่างออกซิเจน การมีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังชันที่เหมาะสมส่งผลให้อัตราการรวมตัวกลับระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลลดลง และการมีตำแหน่งแถบพลังงานเหมาะสมกับช่วงของศักย์ไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบเชิงซ้อนทองไซยาไนด์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษากัมมันตภาพการนำกลับทองจากน้ำเสียจากการผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดอื่น เช่น

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง WO₃ ด้วยวิธีการเจือด้วยโลหะ เนื่องจากเป็นอีกวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ และช่วยลดอัตราการเกิดการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล [3, 22]
- เพิ่มการคู่ควบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกึ่งตัวนำจาก 1 ชนิด เป็น 2 ชนิด เพื่อลดอัตราการเกิดการรวมตัวกลับของคู่อิเล็กตรอนและโฮล
- ศึกษาวิธีการนำกลับทองด้วยวิธีอื่นควบคู่ไปกับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เช่น การดูดซับ เป็นต้น

บรรณานุกรม

1. krungsri, *electronics industries*. 2021, business trendition: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/hi-tech-industries/electronics/io/io-Electronics-21>.
2. M., W.a.A., *Gold Plating*. Products Finishing Magazine, 1997.
3. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, การอนุรักษ์พลังงานสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. 2006.
4. M., G., *Photoelectrochemical Cells*. Nature, 2001. **414**: p. 338-344.
5. P., N.S.a.H., *CEO personality, strategic flexibility, and firm performance: The case of the Indian business process outsourcing industry*. Academy of Management Journal, 2010. **53(5)**: p. 1050–1073.
6. บริษัทสตาร์สไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย), น้ำเสียจากการผลิตแผงวงจร 2020.
7. G., D., *Alternative Technology for Recycling and Treatment of Hazardous wastes, Toxic Substances Control Division*. Department of Health Services U.S.A., 1986.
8. บริษัทสตาร์สไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย), การประกอบธุรกิจของแต่ละผลิตภัณฑ์ 2012.
9. Sundarabhaya N., P.E., *Industrial Wastewater Pretreatment*. Vermont Environmental Protection Agency, U.S.A.
10. X., F.A.a.Z., *Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches*. C. R. Chimie 2006. **9**: p. 750-760.
11. Fujishima A., T.N.R., and Donald A. Tryk., *Titanium dioxide photocatalysis*. Journal of photochemistry and photobiology C, 2000. **Photochemistry reviews** (1.1): p. 1-21.
12. สีคง, ล., ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตแคตะลิสต์. พิมพ์ครั้งที่ 1, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2017.
13. Carp O., H.C.L.a.R.A., *Photoinduced reactivity of titanium dioxide*. Progress in Solid State Chemistry, 2004. **32**: p. 33-177.
14. Machulek A., O.S.D., Osugi M., Ferreira V., Quina F., Dantas R., Oliveira S.,

- Casagrande G., Anaissi F., Silva V., Cavalcante R., Gozzi F., Ramos D., Rosa A., Santos A.P., Castro D. and Nogueira J., *Application of Different Advanced Oxidation Processes for the Degradation of Organic Pollutants*. 2013: p. 141-166.
15. Liu H., G.W., Li Y., He S. and He C., *Photocatalytic degradation of sixteen organic dyes by TiO_2/WO_3 -coated magnetic nanoparticles under simulated visible light and solar light*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018. **6**: p. 59-67.
 16. C., Z.X.a.L., *Photocatalytic water splitting on metal oxide based semiconductor photocatalysts in: J.C. Védrine (Ed.) Metal Oxides in Heterogeneous Catalysis*. Elsevier, 2018: p. 355-399.
 17. Etacheri V., V.C.D., Schneider J., Bahnemann D. and Pillai S.C. , *Visible-light activation of WO_3 photocatalysts: Advances in theory and experiments*. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2015. **25**: p. 1-29.
 18. R., D.L.G.a.K., *A review on non metal ion doped titania for the photocatalytic degradation of organic pollutants under UV/solar light: Role of photogenerated charge carrier dynamics in enhancing the activity*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2013. **140-141**: p. 559-587.
 19. Huang F., Y.A.a.Z.H., *Influences of Doping on Photocatalytic Properties of WO_3 Photocatalyst*. 2016.
 20. Gupta B., M.A.A., Matthews T., Dash S. and Tyagi A. , *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2016. **58**: p. 1366-1375.
 21. Islam S., N.S., Kim D.Y. and Rankin S., *Synthesis and Catalytic Applications of Non-Metal Doped Mesoporous Tungstane*. *Inorganics*, 2017. **5**.
 22. Kim H. K., S.H.S.a.S.B.K., *Microstructural and thermoelectric characteristics of zinc oxide-based thermoelectric material fabricated using a spark plasma sintering process*. *J. Am. Ceram. Soc.* , 2005. **88**: p. 628-632.
 23. กนกวรรณ กอบกุลธนชัย, การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2009.

24. Serpone N., B.E., Barbeni M., Pelizzetti E., Pichat P., Hermann J.M. and Fox M.A. , Journal of photochemistry and photobiology C, 1987. **36**: p. 373-388.
25. Stroyuk A., R.A., Korzhak A. and Kuchmii S.J. , Journal of Nanoparticle Research, 2007. **9**: p. 1027-1039.
26. Zeng S., J.F., Yang B. and Song S., *In-situ reduction of gold thiosulfate complex on molybdenum disulfide nanosheets for a highly-efficient recovery of gold from thiosulfate solutions*. Hydrometallurgy, 2020. **195**(105369).
27. Kunthakudee N., P.T., Ramakul P. and Hunsom M., *Photocatalytic Recovery of Gold from a Non-Cyanide Gold Plating Solution as Au Nanoparticle-Decorated Semiconductors*. ACS omega 2022. **7(9)**: p. 7683-7695.
28. Changlin Y. U., K.Y.A.N.G., Qing S. H. U., Jimmy C. Y., Fangfang C. A. O. and Xin L. I. , *Preparation of WO₃/ZnO composite photocatalyst and its photocatalytic performance*. Chinese Journal of Catalysis 2011. **32(3-4)**: p. 555-565.
29. Albiter E., B.-A.J.M., Calzada L. A., García-Valdés J., Valenzuela M. A. and Rojas-García E. , *Enhancing Free Cyanide Photocatalytic Oxidation by rGO/TiO₂ P25 Composites*. Materials 2022. **15(15)**(5284).
30. Kunthakudee N., R.P., Serivalsatit K. and Hunsom M. , *Photosynthesis of Au/TiO₂ nanoparticles for photocatalytic gold recovery from industrial gold-cyanide plating wastewater*. Scientific Reports 2022. **12(1)**: p. 1-16.
31. Park S., Y.K., Park H. J., Lee J. C. and Lee J. H. , *Rapid gold ion recovery from wastewater by photocatalytic ZnO nanopowders*. Journal of electroceramics 2006. **17(2)**: p. 831-834.
32. Figueroa G., V.J.L., Parga J. R., Vazquez V. and Valenzuela A. , *Recovery of gold and silver and removal of copper, zinc and lead ions in pregnant and barren cyanide solutions*. Materials Sciences and Applications, 2015. **6(02)**: p. 171.
33. Song Y., L.Y., He X., Zhang H., Zhou M., and Liu G. , *Recycling of residual valuable metals in cyanide-leached gold wastewater using the N263-TBP system*. Journal of Environmental Chemical Engineering 2021. **9(6)**(106774).
34. Rakhila Y., E.A., Mestari A., Korili S., Abouri M. and Gil A., *Adsorption recovery of Ag (I) and Au (III) from an electronics industry wastewater on a clay mineral composite*. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019.

- 26(6)**: p. 673-680.
35. Mortimer A., M.W.D. *Fluorescence Microscopy: Light Sources*. Molecular Expressions website 2018.
 36. He L., Z.S., Zhang J., Chen G., Meng S., Fan Y., Zheng X. and Chen S. , *Investigation on the mechanism and inner impetus of photogenerated charge transfer in WO₃/ZnO heterojunction photocatalysts*. The Journal of Physical Chemistry C, 2020. **124(51)**: p. 27916-27929.
 37. Yan J., W.T., Wu G., Dai W., Guan N., Li L. and Gong J., *Tungsten oxide single crystal nanosheets for enhanced multichannel solar light harvesting*. Advanced Materials, 2015. **27**: p. 1580-1586.
 38. Hunge Y.M., M.M.A., Mohite V.S., Kumbhar S.S., Deshpande N.G., Rajpure K.Y., Moholkar A.V., Patil P.S. and Bho- sale C.H. , *Photoelectrocatalytic degradation of methyl blue using sprayed WO₃ thin films*. J. Mater. Sci.: Mater. Electron, 2016. **27**: p. 1629.
 39. Hunge Y.M., M.M.A., Moholkar A.V. and Bhosale C.H. , *Photoelectrocatalytic degradation of oxalic acid using WO₃ and stratified WO₃/TiO₂ photocatalysts under sunlight illumination*. Ultrason. Sonochem, 2017. **35**: p. 233.
 40. Thommes M., K.K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J. and Sing K.S. , *Pure Applied Chemistry*, 2015. **87**: p. 1051-1069.
 41. Chen S., X.Y., Xie W., Wang Y., Hu Z., Zhang W. and Zhao H. , *Facile strategy for synthesizing non-stoichiometric monoclinic structured tungsten trioxide (WO_{3-x}) with plasma resonance absorption and enhanced photocatalytic activity*. Nanomaterials, 2018. **8(7)**: p. 553.
 42. Boyen H.G., K.G., Weigl F., Koslowski B., Dietrich C., Ziemann P., Spatz J.P., Riethmuller S., Hartmann C. and Moller M., *Oxidation-resistant gold-55 clusters*. Science, 2002. **297**: p. 1533-1536.
 43. Han S.W., K.Y.a.K.K., *Dodecanethiol-derivatized Au/Ag bimetallic nanoparticles: TEM, UV/VIS, XPS, and FTIR analysis*. Journal of colloid and interface science, 1998. **208**: p. 272-278.
 44. Ma C., W.X., Zhan S., Li X., Liu X., Chai Y., Xing R. and Liu H., *Photocatalytic activity of monosized auzno composite nanoparticles*. Applied Sciences, 2019.

- 9: p. 111.
45. Grieken R.v., A.J., López-Muñoz M.-J. and Marugán J. , *Photocatalytic gold recovery from spent cyanide plating bath solutions*. Gold Bulletin, 2005. **38**.
 46. Denisov N., Y.J.a.S.P., *Effect of different hole scavengers on the photoelectrochemical properties and photocatalytic hydrogen evolution performance of pristine and Pt-decorated TiO₂ nanotubes*. Electrochimica Acta, 2019. **319**: p. 61-71.
 47. Al-Azri Z.H., C.W.-T., Chan A., Jovic V., Ina T., Idriss H. and Waterhouse G.I. , *The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production: Performance evaluation of M/TiO₂ photocatalysts (M= Pd, Pt, Au) in different alcohol–water mixtures*. Journal of catalysis, 2015: p. 355-367.
 48. Chen W.-T., D.Y., Yadav P., Aughterson R.D., Sun-Waterhouse D. and Waterhouse G.I. , *Effect of alcohol sacrificial agent on the performance of Cu/TiO₂ photocatalysts for UV-driven hydrogen production*. Applied Catalysis A: General, 2020. **602**: p. 117703.
 49. Katsiev K., H.G., Alghamdi H., Alsalik Y., Wilson A., Thornton G. and Idriss H., *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017. **121**: p. 2940-2950.
 50. Jovic V., C.W.T., Sun-Waterhouse D., Blackford M.G., Idriss H. and Waterhouse G.I., *Journal of Catalysis*, 2013. **305**: p. 307-317.
 51. H., C.K.A.a.H.I., *The photoreaction of TiO₂ and Au/TiO₂ single crystal and powder surfaces with organic adsorbates. Emphasis on hydrogen production from renewables*. Green Chemistry 2012. **14(2)**: p. 260-280.
 52. Chakrabarti S., C.B., Bhattacharjee S., Ray A.K. and Dutta B.K., *Photoreduction of hexavalent chromium in aqueous solution in the presence of zinc oxide as semiconductor catalyst*. Chemical Engineering Journal, 2009. **153(1-3)**: p. 86-93.
 53. Gomathisankar, P., Noda, T. and Katsumata, H, *Enhanced hydrogen production from aqueous methanol solution using TiO₂/Cu as photocatalysts*. Front. Chem. Sci. Eng., 2014. **8**: p. 197-202.
 54. Pansa-Ngat P., J.T.a.H.M., *Optimal hydrogen production coupled with pollutant removal from biodiesel wastewater using a thermally treated TiO₂ Photocatalyst (P25): influence of the operating conditions*. Nanomaterials, 2018.

- 8(2)**: p. 96.
55. Wang X., S.K.a.L.X.Y., *Photocatalytic hydrogen generation from water under visible light using core/shell nano-catalysts*. *Water Science and Technology*, 2010. **61(9)**: p. 2303-2308.
56. T., K., *Photocatalytic water splitting: quantitative approaches toward photocatalyst by design*. *ACS Catalysis*, 2017. **7(11)**: p. 8006-8022.





ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ก.1 การวิเคราะห์วัฏภาคและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : รุ่น D8 Advance ยี่ห้อ Bruker

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 1.0 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ช่วงมุมการวิเคราะห์ (2θ) : 5 – 90 องศา

ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมองศา (Step size) : 0.019744 องศา

เวลาในการเปลี่ยนระดับ (Step time) : 15.5 วินาที

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (Cu $K\alpha$) : 1.5406 อังสตรอม

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า : 40 กิโลโวลต์

ค่ากระแสไฟฟ้า : 40 มิลลิแอมแปร์

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

ก.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและธาตุเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : JSM-7610FPlus และ ULTIM MAX 65, JEOL ตามลำดับ ยี่ห้อ JEOL

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.5 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

กำลังขยาย : 5,000 เท่า

Landing voltage : 15 กิโลโวลต์

ก.3 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ (UV Visible Near Infrared Spectrometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : รุ่น Lambda 950 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 1.0 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ช่วงความยาวคลื่น : 300 – 900 นาโนเมตร
Interval : 0.1 นาโนเมตร

ก.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope)

รายละเอียดเครื่องมือ : JEM-3100F ยี่ห้อ JEOL

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.1 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

กำลังขยาย : 50,000 เท่า
High voltage : 300 กิโลโวลต์

ก.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค (Brunauer Emmett Teller)

รายละเอียดเครื่องมือ : Tristar II3020 ยี่ห้อ Micromeritics

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.1 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

แก๊ส : ไนโตรเจน

อุณหภูมิ : -195.80 องศาเซลเซียส

ก.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติบริเวณพื้นผิวของวัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy)

รายละเอียดเครื่องมือ : Axis Ultra ยี่ห้อ Kratos

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.1 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตรวจแบบ : Delay line detector (DLD)

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (Al K α) : 1,486.6 อิเล็กตรอนโวลต์

ก.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์หาความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Raman Spectroscopy)

รายละเอียดเครื่องมือ : T64000 ยี่ห้อ Horiba

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 0.5 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ช่วงการวิเคราะห์ : 50 – 4000 เซนติเมตร⁻¹

แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น : 532 นาโนเมตร

กำลังขยาย : 50 เท่า

แผ่นกรอง : ร้อยละ 0.1

ก.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะและอนุมูลอินทรีย์
(Electron Paramagnetic Resonance)

รายละเอียดเครื่องมือ : EMXmicro ยี่ห้อ Bruker

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 2.5 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

สนามแม่เหล็ก : 2500 - 4500

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

ก.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์สมบัติทางแสง (Photoluminescence Spectrophotometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : LS-55 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 1.5 กรัม (แบบผง)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

ความยาวคลื่น : 350 - 550 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นสำหรับการกระตุ้น : 286 นาโนเมตร

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

ก.10 การวิเคราะห์ปริมาณการนำกลับทอง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์โลหะหนักด้วยเทคนิคเฟลมอะตอมมิแอบซอร์พชันสเปคโตรโฟโตเมทรี (Flame Atomic Absorption Spectrometry)

รายละเอียดเครื่องมือ : A Analyst 200+ flas 400 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 5 มิลลิลิตร (แบบน้ำ)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

คอลัมน์ : 04042022_Au method

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

ก.11 การวิเคราะห์ปริมาณการนำกลับทอง

เครื่องมือวิเคราะห์ : วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและโลหะ (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer)

รายละเอียดเครื่องมือ : NexION 2000 ยี่ห้อ Perkin Elmer

ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ : 5 มิลลิลิตร (แบบน้ำ)

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

แก๊ส : อาร์กอน

อุณหภูมิ : อุณหภูมิห้อง

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ปริมาณการนำกลับทอง

เครื่องมือวิเคราะห์ : การวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเทคนิคฟลอมอะตอมมิแอบซอร์ปชันสเปคโตรโฟโตเมทรี
(Flame atomic absorption spectrometry; Flame-AAS รุ่น A Analyst 200+ flas 400, Perkin-Elmer)

คอลัมน์ : 04042022_Au method

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการนำกลับทองของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ZnO

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของไอออนทองในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
-0.5	8.485
0	8.421
1	7.946
2	7.477
3	7.046
4	6.761
5	6.427
6	6.082
7	5.341

ที่เวลา -0.5 ชั่วโมง

เมื่อ ความเข้มข้นทองในสารละลาย = 8.485 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาตรสารละลาย = 0.300 ลิตร

ดังนั้น ปริมาณทองในสารละลาย = ความเข้มข้นทองในสารละลาย × ปริมาตร

$$= 8.485 \times 0.3$$

$$= 2.546 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับทอง} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

$$= \frac{2.546 - 2.546}{2.546} \times 100$$

$$= 0.00$$

เมื่อ m_i คือปริมาณทองในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม)

m_f คือปริมาณในสารละลายหลังทำปฏิกิริยา (มิลลิกรัม)

ที่เวลา 0 ชั่วโมง

เมื่อ ความเข้มข้นทองในสารละลาย = 8.421 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาตรสารละลาย = 0.295 ลิตร

ดังนั้น ปริมาณทองในสารละลาย = ความเข้มข้นทองในสารละลาย \times ปริมาตร

$$= 8.421 \times 0.295$$

$$= 2.484 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับทอง} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

$$= \frac{2.546 - 2.484}{2.546} \times 100$$

$$= 2.41$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ที่เวลา 1 ชั่วโมง

เมื่อ ความเข้มข้นทองในสารละลาย = 7.946 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาตรสารละลาย = 0.290 มิลลิตร

ดังนั้น ปริมาณทองในสารละลาย = ความเข้มข้นทองในสารละลาย \times ปริมาตร

$$= 7.946 \times 0.290$$

$$= 2.304 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับทอง} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

$$= \frac{2.546 - 2.304}{2.546} \times 100$$

= 9.47



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สัจจพร สังขนาค
วัน เดือน ปี เกิด	1 กุมภาพันธ์ 2542
สถานที่เกิด	จันทบุรี
วุฒิการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนศรียานุสรณ์ ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	88/2 ม.9 ต.เขาบายศรี อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี 22120
ผลงานตีพิมพ์	เข้าร่วมการนำเสนอผลงานทางวิชาการในงาน “The 29th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 14th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2023)” ณ โรงแรมแมนดาริน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย