



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมฟิล์มบางจากอนุภาคนาโนทองคำและซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

Preparation of Gold Nanoparticles Embedded ZnO Thin Films for Removal of Heavy Metal from Waste Water

นาย กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์

เลขทะเบียน 149112
วันเดือนปี - 4 ส.ค. 2561

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

b. 12880413

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การเตรียมฟิล์มบางจากอนุภาคนาโนทองคำและซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนัก
ในน้ำเสีย

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ นาย กฤษกร ไส้เจริญรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO/Au เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ในการทดลองนี้เป็นการเตรียมฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO: Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อนำฟิล์มที่เตรียมได้มาศึกษาผลของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกภายใต้การฉายแสงในย่านที่ตามองเห็น แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าหลังจากที่มีการจุ่มแผ่นฟิล์ม ZnO/Au ลงไปในสารละลาย Fe^{2+} ที่ใช้เป็นตัวแทนของโลหะหนักในน้ำเสียเป็นเวลา 90 นาที ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนทองคำเพิ่มขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Fe^{2+} จะลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนทองคำเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO: Au เป็น 1:2 นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งอธิบายได้ว่าการเตรียมฟิล์ม ZnO/Au จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์บนอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงย่านที่ตามองเห็นให้กับสารโฟโตแคตาไลสต์ ZnO ในขณะที่บริเวณรอยต่อระหว่าง ZnO กับ Au จะเกิดปรากฏการณ์ซอดกกีซึ่งนำมาสู่การเพิ่มขึ้นของคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการยับยั้งการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลอีกด้วย

คำสำคัญ: อนุภาคนาโน, โฟโตแคตาไลสต์, พลาสมอนิก, ซอดกกี, สารกึ่งตัวนำ

Research Title: Preparation of Gold Nanoparticles Embedded ZnO Thin Films for Removal of Heavy Metal from Waste Water

Main-Researcher: Mr. Kitsakorn Locharoenrat

Faculty: Science

Department: Physics

ABSTRACT

This research is aimed to prepare and study optical properties ZnO/Au films for removal heavy metal in waste water. In this experiment, ZnO/Au films with ZnO:Au ratios at 1:0, 1:0.5, 1:1 and 1:2 were synthesized by spin-coating method. The obtained films were studied their photocatalytic activities under visible light irradiation and then compared them in terms of the removal of heavy metal in waste water. It was found that after ZnO/Au films were dipped into Fe^{2+} solution as a representative of a heavy metal in waste water for 90 min, optical absorbance of ZnO/Au films are likely to increase when the amount of Au nanoparticles are increased. Optical absorbance of Fe^{2+} solution seem to decrease when the amount of Au nanoparticles are increased. Thus, ZnO/Au films with ZnO:Au ratio at 1:2 is the highest ratio for removal heavy metal in waste water. These are explained that preparation of ZnO/Au films leads to Surface Plasmon Resonance effect on gold nanoparticles, which results in the enhancement absorbance efficiency in visible region of ZnO photocatalyst. On the other hand, the surface contact between ZnO and Au initiates Schottky effect to result in the enhancement and the inhibit recombination of electron - hole pairs.

Keywords: Nanoparticles, Photocatalyst, Plasmonic, Schottky, Semiconductor.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

นาย กฤษกร โล่เจริญรัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก	4
2.2 ซิงค์ออกไซด์	11
2.3 ทองคำ	12
2.4 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบชนิดกึ่ง	13
2.5 เซอร์เฟกพลาสมอนเรโซแนนซ์	18
2.6 กระบวนการเฟนตัน	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.8 เอกสารอ้างอิง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	28
บทที่ 4 ผลการวิจัย	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	47
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย	48

ภาคผนวก	49
ภาคผนวก ก สรุปลำไ้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	49
ประวัติผู้วิจัย	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_M) ของโลหะบางชนิด	17
2.2 ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_S) ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด	17
3.1 ส่วนผสมของฟิล์ม ZnO/Au	33



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	4
2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.3 องค์ประกอบหลักของรังสีอัลตราไวโอเลต	6
2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำ	8
2.5 โครงสร้างผลึกของ ZnO	11
2.6 แถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ	14
2.7 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี	15
2.8 แถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อ $\phi_s < \phi_M$	15
2.9 แถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อ $\phi_M < \phi_s$	16
2.10 กระบวนการสั่นของพลาสมอนสำหรับอนุภาคทรงกลม	18
3.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	28
3.2 แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน	28
3.3 สายใยแก้วนำแสง	29
3.4 อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง	29
3.5 อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม	29
3.6 อุปกรณ์จับยึดภาชนะบรรจุสารละลาย	30
3.7 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์ม	30
3.8 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย	30
3.9 ส่วนประกอบของระบบเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง	32
3.10 อุปกรณ์ในการศึกษากระบวนการโฟโตแคตาไลติก	35
3.11 กล้องจุลทรรศน์	36
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของฟิล์ม ZnO/Au ที่มีอัตราส่วนต่างๆของ ZnO: Au	38
4.2 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+}	39
4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที	40

VIII

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดของฟิล์ม ZnO/Au หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+}	41
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Fe^{2+} หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที	41
4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย Fe^{2+} หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+}	42
4.7 ประสิทธิภาพของฟิล์ม ZnO/Au ในการกำจัดเหล็ก	43
4.8 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสของฟิล์ม ZnO/Au	44
4.9 ปฏิกิริยาการดูดซับที่บริเวณรอยต่อระหว่างซิงค์ออกไซด์กับอนุภาคนาโนทองของฟิล์ม ZnO/Au	45
4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มหลังการกำจัดโลหะหนักและความหนาของแผ่นฟิล์ม	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

สารปนเปื้อนในน้ำเสียถือว่าเป็นปัญหาระดับสากล เนื่องจากไม่ว่าจะเป็นทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม หรือแม้กระทั่งน้ำบาดาล สามารถที่จะได้รับสารปนเปื้อนในรูปแบบของโลหะหนักที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น การบำบัดมลพิษในน้ำเสียด้วยสารโฟโตแคตาลิสต์ภายใต้รังสีแสงอาทิตย์นั้นถือว่าเป็นวิธีการที่สะอาดและเป็นวิธีการที่ปลอดภัยวิธีหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนในรูปแบบโลหะหนักในน้ำเสีย โดยพบว่าในปัจจุบันมีการนำเอาออกไซด์ของโลหะที่มีโครงสร้างระดับนาโนมาใช้ในการเป็นสารโฟโตแคตาลิสต์กันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังมีความต้องการใช้วัสดุประเภทนี้เพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ พร้อมกับมีการปรับปรุงประสิทธิภาพต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลติกที่เพิ่มมากขึ้นไปด้วยเช่นกัน โดยออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงค์ออกไซด์นั้นจัดได้ว่าเป็นสารโฟโตแคตาลิสต์ที่น่าสนใจตัวหนึ่งที่มีช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นอกจากนั้นซิงค์ออกไซด์ยังมีความสามารถในการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกให้ดียิ่งขึ้นไปอีก

นอกจากการใช้โลหะออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลติกแล้ว การใช้โลหะนาโนที่ได้จากโลหะมีตระกูลนั้นสามารถที่จะช่วยส่งผลต่อพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอน-โฮลในแถบวาเลนซ์และแถบการนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ดังกล่าวข้างต้นนั้นให้เพิ่มสูงขึ้นได้ ดังนั้นการใช้โลหะออกไซด์ที่เป็นสารโฟโตแคตาลิสต์ที่ผนวกเข้ากับปรากฏการณ์พลาสมอนิกที่ได้จากโลหะมีตระกูลคาดว่าจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกนั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากเหตุผลบางประการ เช่น ประการแรกคือ Surface Plasmon Resonance ที่ช่วยเหนี่ยวนำการดูดกลืนแสงอันจะส่งผลต่อการถ่ายเทของอิเล็กตรอนจากผิวสัมผัสกันระหว่างโลหะมีตระกูลกับแถบการนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ ประการต่อมาคือ การเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงตลอดจนช่วยในการเพิ่มอัตราการเกิดและอัตราการแยกตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลของโลหะออกไซด์ได้เป็นอย่างดี และประการสุดท้ายก็คือ การกระเจิงแสงจากเรโซแนนซ์โฟตอนจะช่วยให้ระยะทางเดินของโฟตอนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมวัสดุผสมจากอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในรูปแบบของฟิล์ม เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ผลของ

Surface Plasmon Resonance จากอนุภาคนาโนทองนั้นคาดว่าจะช่วยในการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงให้เพิ่มมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมซิงค์ออกไซด์ในรูปแบบของฟิล์มบนกระจกสไลด์
- 1.2.2 เพื่อเตรียมอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในรูปแบบของฟิล์มบนกระจกสไลด์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์ต่อการกำจัดสารพิษอินทรีย์จากน้ำเสีย
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ต่อการกำจัดสารพิษอินทรีย์จากน้ำเสีย
- 1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโลหะหนักระหว่างการใช้และการไม่ใช่อนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการเตรียมสารผสมจากอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในรูปแบบของฟิล์มบนกระจกสไลด์ จากนั้นจะทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารผสมที่เตรียมได้ผ่านการใช้รังสีย่านสเปกตรัมที่มองเห็นที่จะส่งผลต่อความไวของการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียผ่านกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโดยงานวิจัยนี้เป็นการทดลองภายในห้องปฏิบัติการเพื่อจะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวต่อไป

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 12 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2559 ถึง เดือน กันยายน 2560 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ผลงาน/กิจกรรม	เดือน 1-2	เดือน 3-4	เดือน 5-6	เดือน 7-8	เดือน 9-10	เดือน 11-12
1) ศึกษากระบวนการเกิด surface plasmon resonance บนผิวของโลหะมีตระกูลกับโลหะออกไซด์	↔					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เตรียมฟิล์มทดลองจากโลหะทองแบบที่ผสมและแบบที่ไม่ผสมโลหะออกไซด์, ตรวจสอบภาพของฟิล์มตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	↔					
3) ทดสอบผลของความเข้มข้นของโลหะผสมต่อค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง		↔		↔		
4) เก็บผลการทดลองและประมวลข้อมูล				↔		
5) สรุปงานวิจัยพร้อมเขียนรายงาน						↔

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจถึงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มจากอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์
- 1.5.2 เข้าใจถึงกระบวนการ โฟโตแคทาไลติก เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์และปรากฏการณ์ซอดกกี
- 1.5.3 สามารถนำฟิล์มบางจากอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้
- 1.5.4 เป็นข้อมูลทางเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะให้ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการบำบัดน้ำเสีย
- 1.5.5 สามารถนำความรู้พื้นฐานทั้งในสาขาฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มคุณภาพของงานวิจัยและการต่อยอดสู่งานวิจัยเชิงพาณิชย์ต่อไป
- 1.5.6 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

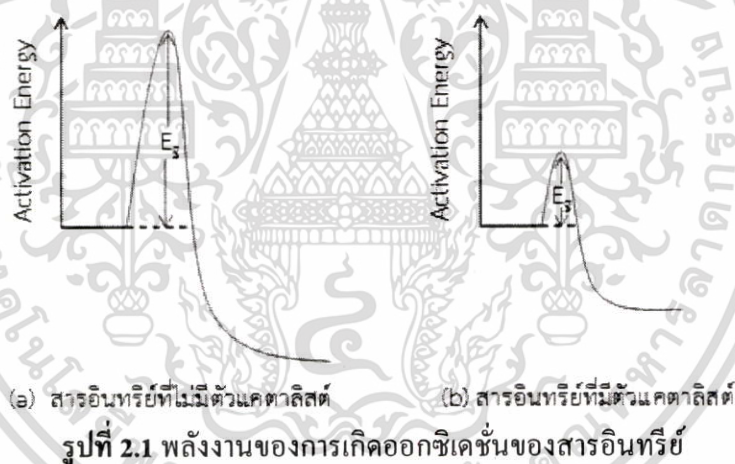
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลติก

2.1.1 หลักการของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส [1]

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกเป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 (a) แสดงพลังงานกระตุ้น (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งพลังงานกระตุ้นจะมีค่ามาก และพลังงานของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าพลังงานของสารอินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ยังคงเท่าเดิมดังรูปที่ 2.1 (b) ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการลดพลังงานกระตุ้นอีกทั้งตัวมันเองยังตอบสนองต่อแสง กล่าวคือจะเกิดการกระตุ้นได้โดยการถ่ายทอดพลังงานที่มีค่ามากกว่าพลังงานแบนด์แก๊ป



ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ
- 2) พลังงานแสงซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) น้ำ
- 4) ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิเดนต์อื่นๆ

2.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคทาไลติกเป็นการให้พลังงานแก่ระบบในรูปของพลังงานฟอตอนมากพอที่จะทำปฏิกิริยาขึ้นได้ ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

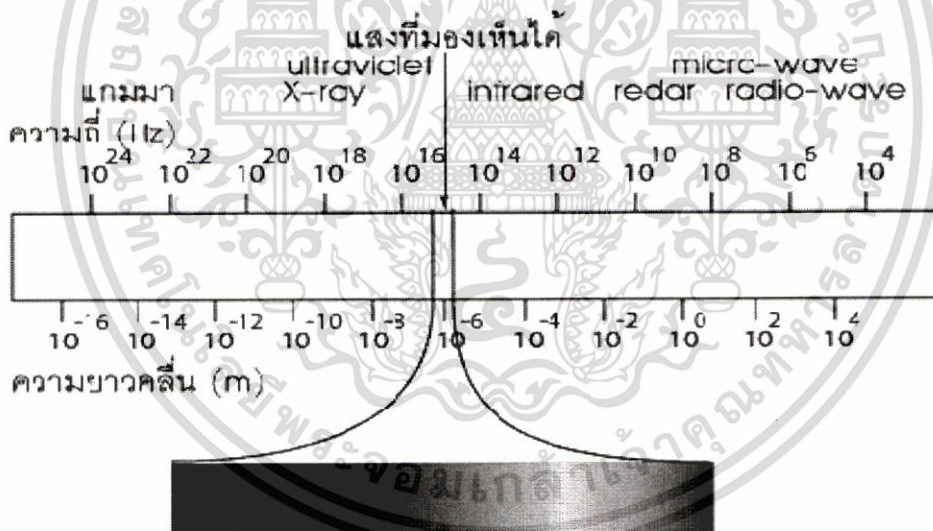
เมื่อ E คือ พลังงานควอนตัม (Quantum energy), จูล

H คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-23} , จูล-วินาที

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิร์ตซ์ หรือ วินาที⁻¹

λ คือ ความยาวของคลื่นแสง, นาโนเมตร

C คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.998×10^8 , เมตร/วินาที



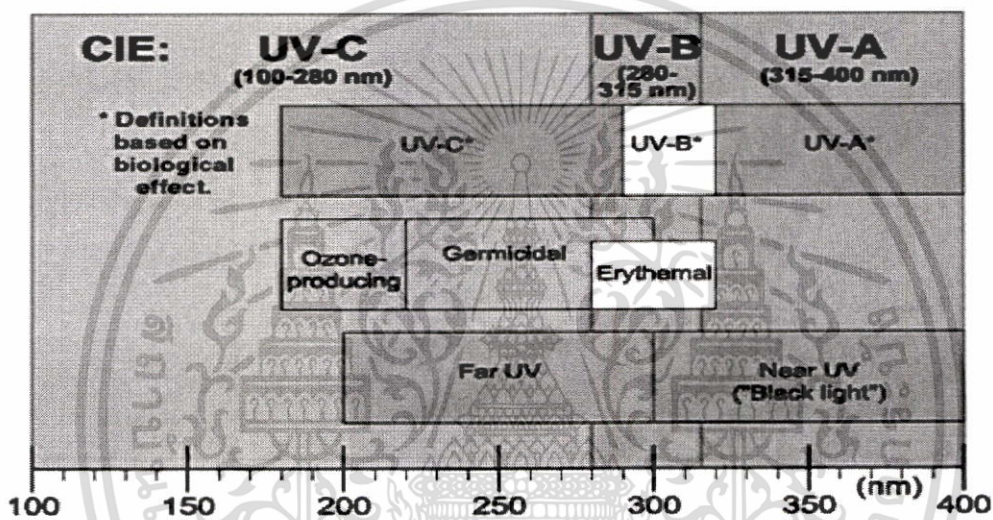
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [2]

รูปที่ 2.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานของแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ต อยู่ในช่วง 100–400 นาโนเมตร สำหรับความยาวคลื่น

แสงที่ตามองเห็นหรือแสงขาว อยู่ในช่วง 380–750 นาโนเมตร รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่

- 1) คลื่นยาว (Long wave UV, UV-A) อยู่ในช่วง 400–320 นาโนเมตร
- 2) คลื่นกลาง (Middle wave UV, UV-B) อยู่ในช่วง 320–280 นาโนเมตร
- 3) คลื่นสั้น (Short wave UV, UV-C) อยู่ในช่วง 280–200 นาโนเมตร

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร มีความสำคัญน้อยมาก เพราะรังสีอยู่ในช่วง Vacuum UV ซึ่งจะถูกดูดกลืนในอากาศจนหมดในช่วงระยะทางสั้นๆ ที่แสงเดินทาง



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ต [3]

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเข้มของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกดูดกลืนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (สูงจากพื้นผิวโลกในช่วงประมาณ 10-35 ไมล์) และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร จะมีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ดังนั้นแสง UV ที่ส่องมายังโลกจึงมีขีดจำกัด

2.1.3 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

เมื่อพิจารณาสถานะของตัวแคตาลิสต์ สามารถแยกโฟโตแคตาไลซิสได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตาลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4 Dinitrofluorene โดยใช้ UV/H₂O₂

2. โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตาลิสต์ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำหลายๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมีมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงอัลตราไวโอเล็ตน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นแหล่งกำเนิดแสง (พลังงาน)

2.1.4 ชนิดของตัวแคตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ได้แก่

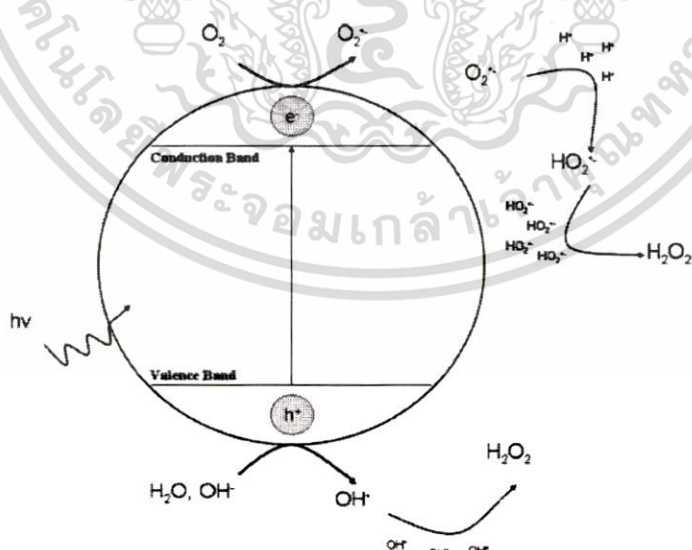
1. โลหะตัวนำ เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล
2. สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ สังกะสีออกไซด์

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ และคอนดักชันแบนด์ ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยจะเกิดช่องว่างซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานจากโฟตอนจากแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮลซึ่งเป็นประจุบวกและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในวาเลนซ์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มาจากวาเลนซ์แบนด์และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron – Hole Pairs, e^-h^+) สามารถเคลื่อนที่ไปมา

ระหว่างวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้อิเล็กตรอน-โฮลรวมตัวกันใหม่ได้ง่ายสำหรับในโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้ามนั้นการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดขึ้นได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ปคั่นอยู่ทำให้อิเล็กตรอน-โฮลใช้เวลานานในการที่จะแยกจากกันได้ ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวนนั้นแยกได้ยาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนซ์แบนด์

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวแคตาไลสต์ซึ่งมีพลังงานโฟตอนที่สูงกว่าพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตาไลสต์ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลที่ได้คือ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลวงกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 2.4

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดในสารละลายจะเกิดขึ้นดังนี้ คือ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลายและจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนซ์แบนด์ซึ่งมีโฮล จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพมากพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัดมีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ออกซิเจนนี้จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น Superoxide Radical ($O_2^{\cdot -}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่รุนแรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ได้แต่ในทางตรงข้าม โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ก็เป็นตัวออกซิเดนต์ที่รุนแรงมากเช่นกัน



รูปที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลสต์บนสารกึ่งตัวนำ [4]

2.1.5 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ซึ่งมีกลไกดังนี้ ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนและน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลและเรดิคัลตัวอื่นๆ ดังแสดงในสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยรีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดซับบนผิวของสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามามีบทบาททำให้อิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Redical, $H^\bullet$) ตามสมการที่ (10) ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก $F^\bullet$ แต่สูงกว่า $Cl^\bullet$ และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่างๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดเรดิคัลจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล



การรวมตัว



โดยที่ h^+ คือ โฮลที่วาเลนซ์แบนด์

e^- คือ อิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- OH° คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล
 $\text{O}_2^{\circ-}$ คือ ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล
 OH_2° คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล
 H° คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและ h^+ ที่ผิวของตัวแคตาลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนจะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และขณะเดียวกัน h^+ เกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตแคตาไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทางคือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ h^+ กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำจะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัลและปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออน จะได้ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือไฮโดรเจนเรดิคัล

2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนตัวแคตาลิสต์กับ h^+ ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมออกไซด์หรือตัวแคตาลิสต์อื่น

Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง h^+ กับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตแคตาไลซิสจะมีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล และสารอินทรีย์ที่ในตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

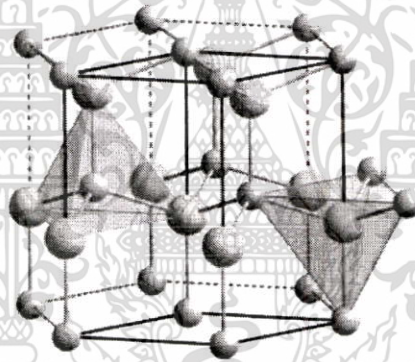
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ตัวแคตาลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวแคตาลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวแคตาลิสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวแคตาลิสต์

โฟโตแคตาลิสต์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำในระดับนาโน เช่น ZnO ถูกเสนอให้ปรับปรุงประสิทธิภาพของโฟโตแคตาไลติกให้ดีขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวดต่อปริมาตรที่สูง ทำให้การดูดซับของโมเลกุลเป้าหมายสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนและสารอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบมีผลต่อสเปกตรัมการเปล่งแสงอย่างสูง นอกจากนี้อนุภาคนาโนสามารถเป็นวิธีที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสีย ขณะที่พวกมันมีความสามารถในการกำจัดสารเคมีรวมทั้งสารปนเปื้อนทางชีวภาพ อาทิเช่น TiO_2 ถูกใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรีย ในทางตรงกันข้าม WO_3 ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษทางอินทรีย์

2.2 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีสมบัติในช่วงกว้างคือสามารถใช้วิธีเดิมสารเจือเพื่อปรับโครงสร้างระดับจุลภาค และโครงสร้างแถบพลังงานให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ (ตั้งแต่ตัวนำไปจนถึงฉนวนไฟฟ้า) วัสดุนี้มีค่าแบนด์แก๊ปกว้าง มีความเป็นพิษน้อยอิเล็กทริกและเฟอร์โรแมกเนติก อีกทั้งมีความไวต่อการตรวจวัดสารเคมีต่างๆ ด้วย [5]

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่งอยู่ในกลุ่มสารกึ่งตัวนำ จะแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) [6] และมีค่าระดับพลังงาน 3.37 eV ซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยธาตุ Zn และ O มีลักษณะทั่วไปเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดและเบส ZnO เกิดจากการให้ความร้อนกับธาตุ Zn ที่อุณหภูมิ 600-900 °C สมบัติทั่วไปของ ZnO ได้แก่ Molar mass เท่ากับ 81.408 g/mol ความหนาแน่นเท่ากับ 5.606 g/cm³ จุดเดือดมีค่า 2360 °C จุดหลอมเหลวมีค่า 1975 °C และมีดัชนีหักเหเท่ากับ 2.0041 โดยทั่วไปซิงค์ออกไซด์จะมีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite (Hexagonal) ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของ ZnO [7]

ในหลักการของโฟโตแคตาไลติก คุณสมบัติโฟโตแคตาลิสต์ที่ดีของสารกึ่งตัวนำควรจะต้องดูดกลืนแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงที่ตามองเห็นหรือใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ตของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้น สภาวะช่องว่างของอิเล็กตรอนที่มากพอสามารถที่จะใช้ในการยับยั้งการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลภายใต้การฉายแสงอีกด้วย โฟโตแคตาไลซิสพลาสมอนิกถูกส่งเสริมให้มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในการเพิ่มประสิทธิภาพของโฟโตแคตาไลติกภายใต้การฉายด้วยแสงในย่านที่ตามองเห็นในการเพิ่มโอกาสของการใช้แสงอาทิตย์สำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน อย่างเช่น การบำบัดน้ำเสีย กระบวนการแยกโมเลกุลน้ำ และการลดลงของคาร์บอนไดออกไซด์ โฟโตแคตาไลซิสพลาสมอนิกเตรียมโดยการใช้โลหะมีตระกูลกระจายเข้าสู่โฟโตแคตาลิสต์ของสารกึ่งตัวนำ ยกตัวอย่างเช่น Au/TiO₂ ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจน 0.71% ภายใต้การฉายแสงอาทิตย์แบบจำลอง สามารถอธิบายได้ว่า

ประสิทธิภาพของพลาสมอนิกสามารถเพิ่มพลังงานการกระตุ้นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลของสารกึ่งตัวนำ การกระเจิงแสงของเรโซแนนซ์โฟตอนก็สามารถเพิ่มความยาวของระยะทางโฟตอนเฉลี่ยในวัสดุไวแสงอีกด้วย

2.3 ทองคำ

ทองคำ เป็นธาตุโลหะชนิดหนึ่งทางเคมี มีเลขอะตอม 79 และมีสัญลักษณ์ทางเคมีว่า Au มีที่มาจากภาษาละติน คือ Aurum แปลว่าทอง มีจุดหลอมเหลวที่ 1064°C จุดเดือดที่ 2701°C มีความถ่วงจำเพาะ 19.3 และน้ำหนักอะตอม 196.67 ในด้านการทำปฏิกิริยา ทองคำจะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้น ทองคำจึงทนทานต่อการเกิดสนิมได้ดี อีกทั้งไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงไม่หมองและไม่ผุกร่อน ไม่ละลายในกรดชนิดใดๆ ยกเว้นสารเคมีบางชนิด เช่น คลอรีน ฟลูออรีน และน้ำประสานทอง [8]

2.3.1 อนุภาคนาโนทอง [9]

อนุภาคนาโนทอง เป็นอนุภาคทองที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากโลหะทองให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้อนุภาคนาโนทองมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างไปจากทองปกติ เช่น มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเคมี นำไฟฟ้าได้ดี และมีสีที่เปลี่ยนไปตามขนาดของอนุภาค จากข้อดีต่างๆ ของอนุภาคนาโนทอง ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อวิเคราะห์หาสารที่สนใจ

2.3.2 สมบัติของอนุภาคนาโนทอง [10]

สมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะเช่น ทองคำจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัดอธิบายด้วยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น ระหว่างทองคำกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดของคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมของวัสดุนั้นๆ อนุภาคนาโนของทองคำจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองวาวอย่างที่พบได้ทั่วไป โลหะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากทองคำก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกัน เช่น อนุภาคนาโนของเงิน จะมีสีเหลืองเข้มแทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคย อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้อัลตราไวโอเล็ต ซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิด

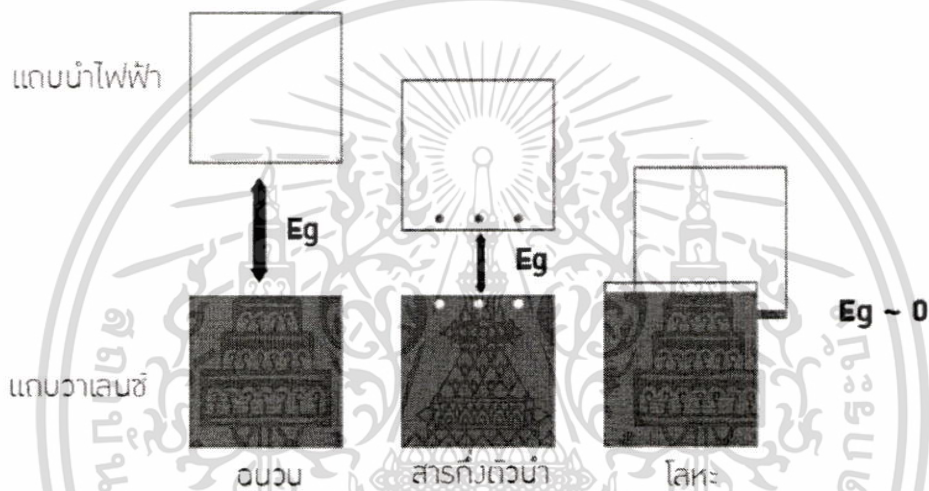
ไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ ทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ

จากที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจาก ZnO มีแถบพลังงานแสงโฟโตแคตาไลติกอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตถึงช่วงที่ตามองเห็น ประสิทธิภาพของแสงในการที่จะเพิ่มพลาสมอนภายใต้ระบบนี้จึงมีความเป็นไปได้ในงานวิจัยนี้ เราจะศึกษาฟิล์มของสารกึ่งตัวนำที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพด้วยพลาสมอนิกคริสตัลที่ให้ประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติกที่สูงเพื่อที่จะใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ฟิล์ม ZnO/Au ถูกเตรียมบนกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ต่อมาเราจะศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของพลาสมอนิกคริสตัลต่อการย่อยสลายด้วยแสงของโลหะหนัก (Fe^{2+}) ภายใต้การฉายแสงที่ตามองเห็น ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพของการสังเคราะห์โฟโต-แคตาไลสต์ที่ไวต่อแสงอย่างมากนั้น อาจอธิบายได้ด้วยลักษณะที่โดดเด่นสองประการ ได้แก่ รอยต่อชอตกี (Schottky junction) และ localized surface plasmonic resonance ที่ในอดีตถูกใช้ประโยชน์ในการอธิบายการแยกและการเคลื่อนย้ายประจุ แต่ทว่าในภายหลังนั้นถูกสนับสนุนในการใช้อธิบายการดูดกลืนที่เชื่อมโยงของแสงที่ตามองเห็นและการกระตุ้นพาหะของประจุไฟฟ้า

2.4 รอยต่อชอตกี

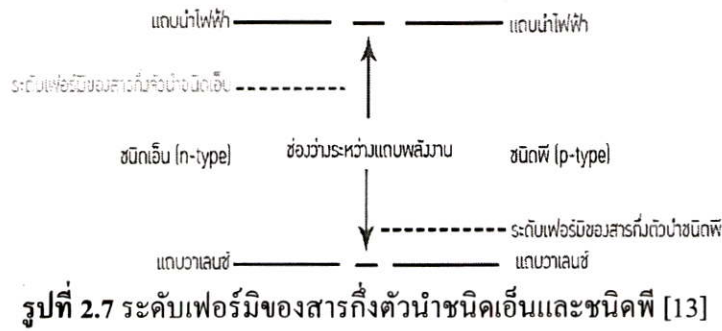
บริเวณรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ชอตกีขึ้น สภาพของพื้นที่ผิวของโลหะและสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของรอยต่อรวมทั้งชนิดของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ ตามธรรมชาติโลหะนั้นเป็นตัวนำที่ดี มีความเข้มข้นของประจุพาหะสูงกว่าสารกึ่งตัวนำ แม้ว่าสารกึ่งตัวนำจะถูกเจือปนสูง โลหะก็สามารถรับหรือให้อิเล็กตรอนได้จำนวนมาก เมื่อนำไปทำเป็นรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ ประจุหรืออิเล็กตรอนจะแพร่ข้ามรอยต่อหลังการสัมผัสกัน โดยอิเล็กตรอนอาจจะเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำหรือเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อพีเอ็นในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนจะแพร่จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพีเท่านั้น จากการแพร่อิเล็กตรอนข้ามรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดการดึงดูดกันของอิเล็กตรอนและโฮลแต่ไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะแต่อย่างใด เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณรอยต่อของเขตปลอดพาหะสนามไฟฟ้าภายในและกำแพงศักย์จะคล้ายรอยต่อพีเอ็น แต่รอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ มีบริเวณผิวหน้าสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมากกว่ารอยต่อพีเอ็น เมื่อถูกพลังงานกระตุ้นการตอบสนองบริเวณรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก ลักษณะรอยต่อนี้เรียกว่ารอยต่อชอตกี [11]

แถบพลังงาน จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของวัสดุแข็ง โดยระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอมจะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนและช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำ อะตอมสร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็นโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ ส่วนแถบพลังงานชั้นนอกจะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระเรียกว่า แถบนำไฟฟ้า แบบจำลองแถบพลังงานสามารถนำมาใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารนำไฟฟ้า เช่น ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แถบวาเลนซ์ และแถบนำไฟฟ้า ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ [12]

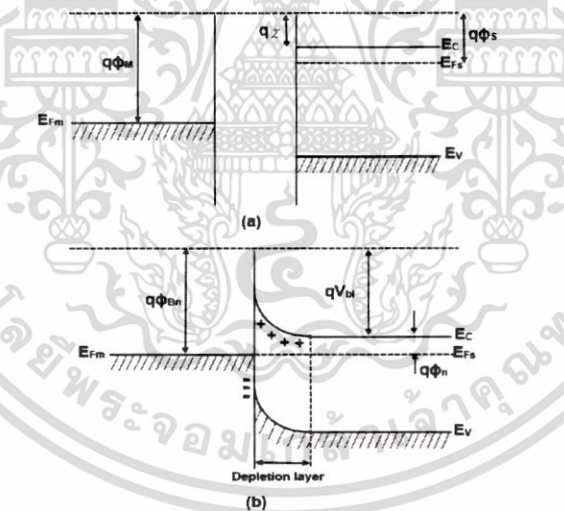
อีกทั้งระดับเฟอร์มิ คือระดับพลังงานที่มีค่าสูงพอที่จะมีโอกาสนพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่สภาวะสมดุลเวลาใดๆ ในแบบจำลองแถบพลังงานที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เป็นไปตามฟังก์ชันของเฟอร์มิ-ดิแรก สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เติมธาตุเจือปนชนิดพีจะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์และสารกึ่งตัวนำที่เติมธาตุเจือปนชนิดเอ็นจะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพีเอ็นได้



ดังนั้นสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำพิจารณาจากแบบจำลองแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าโลหะและมีค่าฟังก์ชันงานเป็น ϕ ส่วนโลหะจะมีค่าฟังก์ชันงานเป็น ϕ_M การสัมผัสกันของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับโลหะแบบขอดี จะมี 2 กรณี ดังต่อไปนี้

2.4.1 การสัมผัสกันของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

จากรูปที่ 2.8 แสดงรอยต่อขอดีในกรณีรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



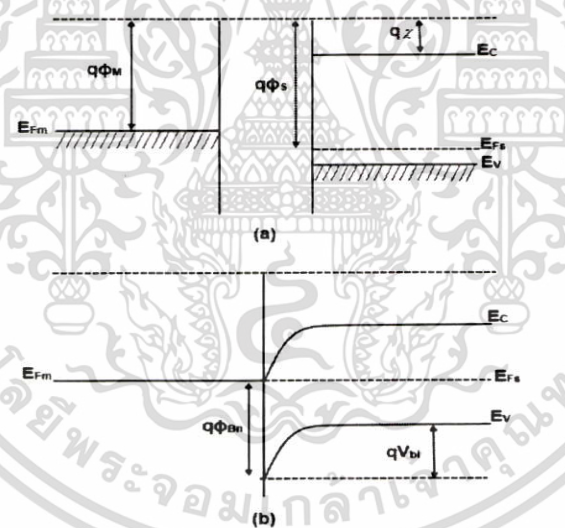
รูปที่ 2.8 แสดงแถบพลังงาน (Energy band) ของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (a) ก่อนการสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เมื่อ $\phi < \phi_M$ (b) บริเวณรอยต่อหลังการสัมผัสกัน

ในรูปที่ 2.8 (a) แสดงระดับพลังงานเฟอร์มิก่อนผิวสัมผัสของโลหะเชื่อมต่อกับบริเวณผิวสัมผัสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ จะได้ $\phi < \phi_M$ และรูปที่ 2.8 (b) แสดงรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ หลังจากผิวสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

สัมผัสกัน ระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีสถานะสมดุลทางความร้อนของโลหะและสารกึ่งตัวนำมีค่าคงที่เท่ากัน ประจุอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะแพร่เข้าไปยังระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าในโลหะที่บริเวณผิวสัมผัส ทำให้เกิดประจุชนิดบวกทางด้านสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าของรอยต่อ สำหรับศักย์ไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับทางด้านโลหะซึ่งยังคงมีศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอเกิดเป็นกำแพงศักย์ของรอยต่อ โดยมีค่าขนาดกำแพงศักย์ชอตกีเป็น ϕ_{bs} ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำยังคงเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของโลหะจนอยู่ในสถานะสมดุล ซึ่งในสถานะสมดุลอิเล็กตรอนจะไม่สามารถกระโดดข้ามไปยังโลหะได้อีก ทำให้ค่าขนาดกำแพงศักย์ชอตกี (Schottky Barrier Height, ϕ_{bs}) คงที่สำหรับบริเวณที่เกิดการดึงดูดกันของอิเล็กตรอนและโฮล แต่จะไม่มีเคลื่อนที่ของพาหะในบริเวณที่มีความกว้างจากรอยต่อเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณเขตปลอดพาหะ

2.4.2 การสัมผัสกันของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

จากรูปที่ 2.8 แสดงรอยต่อชอตกีในกรณีรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 2.9 แถบพลังงาน (Energy band) ของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น (a) ก่อนการสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เมื่อ $\phi_m < \phi_s$ (b) บริเวณรอยต่อหลังการสัมผัสกัน

เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ จะได้ $\phi_m < \phi_s$ ดังรูปที่ 2.9 (a) และโดยธรรมชาติสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นการเจือแบบผู้รับ ดังนั้นหลังการสัมผัสที่บริเวณรอยต่ออิเล็กตรอนจากโลหะจะเคลื่อนที่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำในสถานะสมดุลระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีค่าเท่ากัน ส่วนระดับพลังงานแถบวาเลนซ์และแถบการนำบริเวณรอยต่อจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกรณีในรอยต่อของ

โลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเกิดการดึงดูดกันของอิเล็กตรอนและโฮล ส่วน Schottky Barrier Height ϕ_b รอยต่อจะมีค่าเป็น $\phi_b = \phi_m - \chi$ จากรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำทั้งสองกรณีจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน depletion layer และ Schottky Barrier เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากกระตุ้นภายนอก [14]

ค่าฟังก์ชันงานของโลหะบางชนิดและสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [15] เป็นต้นในหน่วยโวลต์แสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_m) ของโลหะบางชนิด [16]

โลหะ	ฟังก์ชันงาน (eV)
ทองคำขาว(Pt)	5.65
นิกเกิล(Ni)	5.15
พาลเลเดียม(Pd)	5.12
ทองคำ(Au)	5.10
โมลิบดีนัม(Mo)	4.60
ทังสเตน(W)	4.55
โครเมียม(Cr)	4.50
ไทเทเนียม(Ti)	4.33
อลูมิเนียม(Al)	4.28
เงิน(Ag)	4.26

ตารางที่ 2.2 ค่าฟังก์ชันงาน (ϕ_s) ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด [17]

สารกึ่งตัวนำ	ฟังก์ชันงาน (eV)
แกเลเลียมอาร์เซไนด์(GaAs)	4.07
ไทเทเนียมออกไซด์(TiO ₂)	4.00
อลูมิเนียมอาร์เซไนด์(AlAs)	3.50
ซิงค์ออกไซด์(ZnO)	4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะรอยต่อในรูปที่ 2.8 จะได้ขนาดกำแพงศักย์มีค่าเป็น

$$\phi_k = \phi_M - \chi \quad (12)$$

เมื่อ χ คือ ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน

ศักย์แสดงสภาพซ่อนสถานะ (ϕ_n) มีค่าเป็น

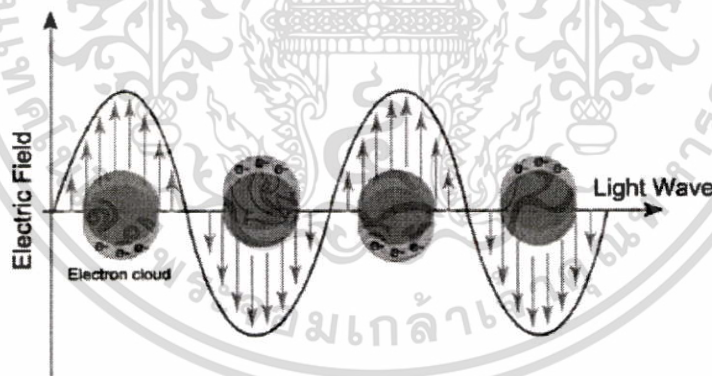
$$\phi_n = \phi_k - \chi \quad (13)$$

และศักย์ไฟฟ้า (V_{bi}) ที่สร้างขึ้นภายในรอยต่อมีค่า

$$\phi_n = \phi_k - \phi_n \quad (14)$$

2.5 เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์

เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ หรือสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะชนิดอื่นๆสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น แสงกับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนของโลหะ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการสั่นของพลาสมอนสำหรับอนุภาคทรงกลม

รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการสั่นของพลาสมอน แสดงให้เห็นการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนสัมผัสกับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้อง โดยความถี่ของการสั่นนี้ขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน มวลสัมพัทธ์อิเล็กตรอน

ขนาดและรูปร่างของการกระจายของประจุ สำหรับการสั่นของอิเล็กตรอนสำหรับอนุภาคนาขนาดเล็ก เรียกว่า โคลิโด พลาสมอน เรโซแนนซ์ ซึ่งจะแตกต่างจากพลาสมอนเอกซ์ไซเทชันของโลหะแบบก้อน

2.6 กระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันเป็นอีกหนึ่งวิธีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีโดยการเติมสารอินทรีย์ลงไปให้เกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH°) กระบวนการนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้มักปล่อยน้ำทิ้งหรือสารพิษของสารเคมีที่มีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ปะปนลงไปในน้ำก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ สารอนินทรีย์ที่เป็นมลพิษทางน้ำได้แก่ โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษทางน้ำ เช่น ฟีนอล สารประกอบอะโรมาติก หรือสารเคมีที่มาจากวัสดุสี ย้อม ยาฆ่าแมลง สารกันบูด พลาสติก ยาง เป็นต้น ซึ่งมันได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1876 โดย H.J.H. Fenton จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกิริยานี้อย่างสมบูรณ์ โดยพบว่าการใช้ปฏิกิริยาเฟนตันมีมากในระดับที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ [18]

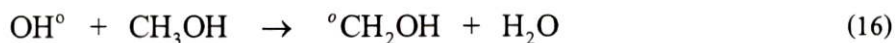
ปฏิกิริยาเฟนตัน คือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ โดยสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่มีลักษณะเฉพาะและสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นพิษได้โดยมีตัวออกซิไดซ์ระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) การเกิดปฏิกิริยาของ H_2O_2 กับ Fe^{2+} จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH°) ขึ้นโดยอนุมูลอิสระไฮดรอก (OH°) เป็นที่รู้จักกันดี เนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงที่รองจากฟลูออรีนโดยปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแบ่งเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. การรวมตัว



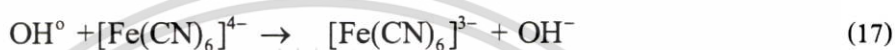
อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไม่อิ่มตัว อะลิฟาติกหรืออะโรมาติก แล้วให้อนุมูลของผลิตภัณฑ์ เช่น Cyclohexadienyl ดังสมการ (15)

2. การสลัดไฮโดรเจน



อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ ดังสมการ (16)

3. การถ่ายโอนอิเล็กตรอน



จากดังสมการ (17) ข้างต้น อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอออนของไฮดรอกไซด์

4. การทำปฏิกิริยาร่วมกันของอนุมูล



อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ (18)

ปฏิกิริยาเฟนตันสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสภาวะของปฏิกิริยาที่ถูกปรับเปลี่ยนอยู่ 2 กระบวนการคือ การสลัดไฮโดรเจนและการรวมตัว ซึ่งมีผลมากกว่าปฏิกิริยาอื่นๆ แต่ในการเกิดปฏิกิริยาของ H_2O_2 กับ Fe^{2+} จะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาดังสมการ (19) จะเกิดในน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารประกอบของสารอินทรีย์ พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH°) ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้มีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ปฏิกิริยาการเกิด OH° ในสารละลายสามารถ

กระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้นด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์หรือเมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือ ก๊าซโอโซน เป็นตัวแคตาลิสต์

ปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำให้สารอินทรีย์มีขนาดเล็กลงและมีความเป็นพิษในน้ำเสียลดลงและให้ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ขณะที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในน้ำเสียได้เพิ่มมากขึ้น และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) จะลดลงจนหมดส่งผลให้ปฏิกิริยาหยุดลง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและเป็นไปอย่างต่อเนื่องนั้นจำเป็นต้องได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือแสงอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากแสงอาทิตย์หรือแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาเฟนตันถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้ว ปฏิกิริยาจะเริ่มต้นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และในปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเฟนตันคือความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่จุดเริ่มต้น 3-15 mg/L เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่จะกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ที่ต้มตัวเป็นสมบัติของเกลือซึ่งอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงไม่ควรจะแยกไอออนเหล็กออกไป เพื่อให้ไอออนเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล

และอีกประการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ยังช่วยลดค่า BOD และ COD ในอุตสาหกรรมน้ำเสียเนื่องจากมันช่วยย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำเสียเบื้องต้นก่อนไปสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เพิ่มประสิทธิภาพในการแยกสารอินทรีย์และสุดท้ายช่วยทำให้การละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียในสถานะที่ออกซิเจนไม่เพียงพอหรือเกิดภาวะที่ปริมาณของน้ำเสียที่เข้ามาในระบบมากเกินไปความสามารถของระบบจะรับได้ ปฏิกิริยา H_2O_2 ในการลดค่า BOD และ COD แบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยตรง (Direct Chemical Oxidation) H_2O_2 สามารถที่จะใช้เพียงลำพังหรือใช้ร่วมกับแคตาลิสต์ ซึ่งแคตาลิสต์ที่ใช้ได้แก่ ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+} หรือ Fe^{3+}) แสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยออกซิไดส์สารประกอบในน้ำเสียทำให้ค่า BOD หรือ COD ในน้ำเสียลดลง

2. การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกทางกายภาพ (Enhanced Physical Separation) แบ่งเป็น 2 กรณี กรณีแรก การใช้ H_2O_2 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นผลให้สารมีความเป็นขี้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนแล้วตกตะกอนลง กรณีที่ 2 เมื่อ H_2O_2 ละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวไปเป็นก๊าซออกซิเจนและน้ำเป็นผลให้พวกไขมัน น้ำมัน และจระบีลอยน้ำขึ้นมา ซึ่งจะแยกชั้นอย่างชัดเจน

3. การเพิ่มแหล่งผลิตออกซิเจน (Supplemental Oxygen Source) นั่นคือการช่วยเพิ่มการละลายของออกซิเจนในน้ำซึ่งทำให้ค่า BOD ในน้ำลดลง แต่เราไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ 100% เนื่องจากการไหลของน้ำและอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าอากาศร้อนออกซิเจนก็จะละลายลดลง

ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาฟentonจะช่วยลดค่าต่างๆที่แสดงถึงความเป็นพิษสูงในน้ำเสีย รวมทั้งช่วยในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ และทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ [19]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2012 S. Baruah และคณะ ได้มีการสังเคราะห์ ZnO เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารปนเปื้อนทางเคมี โดยพบว่า ZnO มีประสิทธิภาพสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ เช่น เมทิลบลูและเมทิล ออเรนจ์ (เป็นตัวแทนสำหรับโมเลกุลสีย้อมที่มีห่วงโซ่ยาว) ซึ่งทำการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของอนุภาคนาโน ZnO และแท่งนาโน ZnO จะได้ว่าพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพสูงของแท่งนาโน ส่งผลให้มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโน [20]

ในปี ค.ศ. 2012 Y. Lu และคณะ ได้ทำการศึกษาการเคลือบโฟโตแคตาไลสต์ด้วยTiO₂ ด้วยเทคนิคการเคลือบผิววิศวกรรม นั่นคือ เทคนิคการเคลือบกล (MCT) เมื่อเทียบเทคนิค MCT กับเทคนิคการเคลือบแบบดั้งเดิม พบว่า MCT เป็นวิธีที่ง่าย และต้นทุนต่ำ ในการศึกษาแล้วยังกล่าวถึงผลกระทบต่อการผลิตในการเคลือบโฟโตแคตาไลสต์ นั่นคือ หลังจากผ่านเทคนิค MCT และการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก จะได้ว่าผงโลหะคอมโพสิตส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของพื้นผิวและปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก โดยจะเพิ่มประสิทธิภาพโฟโตแคตาไลติกมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้แสงที่ตามองเห็น [21]

ในปี ค.ศ. 2013 K. Gupta และคณะ ได้ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของ TiO₂ และ Ag-doped TiO₂ ซึ่งเตรียมโดยเทคนิคโซล-เจล พบว่าการมีชีวิตอยู่ของเชื้อ *P. Aeruginosa* ถูกทำให้เป็นศูนย์ที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้น 40 mg/30 mL ในขณะที่การมีชีวิตอยู่ของ *S. aureus* และ *E. coli* ของ Ag-doped TiO₂ (7%) เป็นศูนย์ที่ความเข้มข้น 60 mg/30 mL ในขณะที่ Ag-doped TiO₂ (3%) แบคทีเรียทั้งหมดถูกฆ่าที่ความเข้มข้น 80 mg/30 mL จะได้ว่าอนุภาคนาโน TiO₂ บริสุทธิ์แสดงการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกที่ต่ำ ในขณะที่การได้ปเงินเข้าไปจะเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกให้ดีขึ้นภายใต้การฉายรังสีที่มองเห็นที่อุณหภูมิห้อง [22]

ในปี ค.ศ. 2014 T. Verdier และคณะ ได้ทำการศึกษาฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรียของ TiO₂ ที่เป็นโฟโตแคตาไลสต์อย่างเฉื่อยหรือที่เคลือบบน *E. Coli* พบว่าในสภาพแวดล้อมที่ชื้น วัสดุก่อสร้างในอาคารในพื้นที่ผิวของวัสดุจะมีการขยายของเชื้อจุลินทรีย์ การเคลือบด้วยอนุภาคนาโนของ TiO₂ ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสงจึงเป็นวิธีที่จะป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อจุลินทรีย์หรืออย่างน้อยเพื่อลดปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตในวัสดุก่อสร้างในอาคาร การทดลองนี้จะศึกษาปฏิกิริยาการต้านเชื้อแบคทีเรียของ TiO₂ ที่ทดลองภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ผลการศึกษาพบว่าในการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วย TiO₂ จะเห็นผล

โดยสามารถต้านและกำจัดแบคทีเรียได้หลังจาก 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมง และชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพนั้นมีการเพิ่มขึ้น [23]

ในปี ค.ศ. 2015 W.S. Lee และคณะ ได้ทำการทดลองในหัวข้อการเพิ่มขึ้นของฤทธิ์ในการต่อต้านแบคทีเรียของเส้นใยนาโน TiO_2 กับโครงสร้างนาโนที่เป็นลำดับชั้นและผลึกที่ถูกควบคุม ในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงฤทธิ์ต้านแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นของลำดับชั้น NFS แอนาเทส TiO_2 กับ *Staphylococcus aureus* ในที่มีแสงอัลตราไวโอเลต นอกจากนี้มีการเกาะตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นจำนวนมากของอนุภาคนาโนของ Ag บนพื้นผิวของ TiO_2 NFS ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย แม้ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง สิ่งเหล่านี้เป็นผลที่ได้จากการใช้ประโยชน์จากโฟโตแคตาไลติกที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งคุณสมบัติของวัสดุที่มีอนุภากระดับนาโนเมตร [24]

ในปี ค.ศ. 2010 S. Jeona และ K. Yongw ได้ทำการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนทังสเตนออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างนาโนออกไซด์ทังสเตนสามารถปรับขนาดควบคุมเพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นลวดนาโนโดยการปรับความเข้มข้นของสารตั้งต้นของทังสเตน โครงสร้างนาโนทังสเตนออกไซด์ถูกตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนของ X-ray (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) และการวัดการดูดกลืนและการคายด้วยไนโตรเจน จากการเตรียมโครงสร้างนาโนทังสเตนออกไซด์ที่มีโครงสร้างกลวงเป็นลำดับชั้นแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมากจะให้ความสามารถที่สูงในการที่จะกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มสำหรับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [25]

ในปี ค.ศ. 2014 U. Joshi และคณะ ได้สังเคราะห์ผลึกนาโน WO_3 ที่มีคุณสมบัติโฟโตแคตาไลติกด้วยเทคนิคโซล-เจล สำหรับใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงของเมทิลออเรนจ์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ WO_3 ขนาดใหญ่กับ Platinised nanocrystalline WO_3 ผลลัพธ์จากการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกพบว่า Platinised nanocrystalline WO_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ WO_3 ขนาดใหญ่และเมทิลออเรนจ์ถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ใน 4 ชั่วโมง [26]

ในปี ค.ศ. 2016 S. Singh และคณะ ได้ทำการวิจัยการแปรสภาพพื้นผิวหรือการโด๊ปของทังสเตนออกไซด์ (WO_3) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกของน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารมลพิษอินทรีย์ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยออกมาโดยไม่มีการบำบัดน้ำซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ น้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เอง การกำจัดสารมลพิษอินทรีย์จากน้ำเสียจึงเป็นเรื่องที่จำเป็น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOP) จะช่วยในการบำบัดน้ำเสีย AOP เกี่ยวข้องกับรูปแบบการออกซิไดซ์ โดยส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับการฉายแสงอิเล็กตรอนปฏิกิริยาเฟนตันและโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน สำหรับการรักษาสังแวดล้อม (การย่อยสลายมลพิษ)

งานวิจัยนี้จึงเป็นงานวิจัยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดให้ดีขึ้นโดยใช้เรื่องโฟโตแคตาลิสต์ เนื่องจากพวกมันใช้พลังงานน้อย ง่ายต่อการผลิต และใช้ประโยชน์ได้สูงจากแสงอาทิตย์ การพัฒนาโฟโตแคตาลิสต์มุ่งเน้นไปที่การควบคุมด้านสัณฐานวิทยา ความไวแสงของพื้นผิวควอนตัมดอทและองค์ประกอบวัสดุเฉพาะทางแบบสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและการต้านทานการกัดกร่อนด้วยแสงในสารละลายในน้ำได้รับการพิสูจน์ให้เป็นวัสดุที่ดีในอนาคตในโครงสร้างระดับนาโน โครงสร้างระดับนาโนของวัสดุเฉพาะทางแบบสารกึ่งตัวนำถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ซึ่ง WO_3 มี band gap แคบ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงและการรีดักชันอิเล็กตรอนจะน้อย เนื่องจากดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี ตัวแคตาลิสต์ที่ร่วมกับออกซิเจนไม่เพียงหยุดการสร้างรูปแบบเปอร์ออกไซด์บนพื้นผิว แต่รีดิวซ์แบบ over-potential สำหรับการออกซิเดชันน้ำจากผล hydrate- WO_3 และการได้ปบนตัวแคตาลิสต์จึงถูกนำไปใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสีย [27]

การคัปปลิงเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองด้วยปรากฏการณ์ slow photon ของโฟโตนิกส์คริสตัล TiO_2 สำหรับเพิ่มการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง (Photoelectrochemical) ได้ถูกวิจัยขึ้นในปี ค.ศ. 2014 โดย X. Zhang และคณะ Slow photon effect จะส่งเสริมคุณสมบัติสำหรับการปรับอันตรกิริยา light matter ผ่านการออกแบบโครงสร้างวัสดุโฟโตแอโนดโครงสร้างแบบ bi-layer ของ TiO_2 ถูกสร้างด้วยกระบวนการโซล-เจล อนุภาคนาโนทองได้ถูกวางบนโครงสร้างแบบ bi-layer ของ TiO_2 บนชั้นอาร์เรย์ (NR) ลวดนาโนของ TiO_2 ความสามารถในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง (PEC) ของมันถูกกำหนดด้วยพลังงาน hot electron และ hole กล่าวได้ว่ามันได้ถูกสร้างใน Au NPs ผ่านการกระตุ้นและการสลายของเซอร์เฟซพลาสมอน โดยการสลับลักษณะขนาดรู (Pore) ของชั้นโฟโตนิกส์คริสตัล TiO_2 ให้ทับซ้อนกับช่วง localized surface plasmon resonance (SPR) ที่มีเข้มข้นมากของ Au NPshot electron จำนวนมากได้ถูกสร้างใน Au NPs และถูกฉีดเข้าไปใน conduction band ของ TiO_2 ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วย PEC ให้ดีขึ้นในช่วงแสงที่ตามองเห็น ภายใต้การจำลองการฉายแสงของแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพ Photoconversion ของโฟโตแอโนดที่จับคู่ระหว่าง Au กับ TiO_2 มีค่าเป็น 0.71% ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่เคยวิจัยมาในระบบ PEC ของ Au/ TiO_2 งานวิจัยนี้สนับสนุนการออกแบบโครงสร้างระดับนาโนของพลาสมอนิกด้วยวัสดุ PC-based เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วย PEC [28]

ในปี ค.ศ. 2010 S. Ramanathan ได้ทำการศึกษาฟิล์มบางออกไซด์โลหะ วิเคราะห์เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางสำหรับออกไซด์ที่เน้นการสร้างออกไซด์คุณภาพสูงเป็นพิเศษเช่น รอยต่อแบบชอตกกีออกไซด์เชิงซ้อน รวบรวมงานวิจัยการทำงานและประสิทธิภาพของโครงสร้างระดับนาโนในคุณสมบัติแบบฟิล์มบาง พิจารณาปัญหาของวัสดุในฟิล์มบางออกไซด์ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆต่อไป และอธิบายการสร้างฟิล์มบางออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ ฟิล์มบางออกไซด์โลหะเป็นตัวอย่างในการอธิบายคุณสมบัติโครงสร้างพื้นฐานในฟิล์มบางออกไซด์คุณสมบัติการทำงานของฟิล์มบางออกไซด์ได้พิจารณาจากบริบทการนำไปประยุกต์ใช้

ด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นที่รู้จักเทคโนโลยีพลังงานทดแทนการบำบัดทางทฤษฎีตามคุณสมบัติที่เลือกประสิทธิภาพการทำงานในด้านอุปกรณ์โซลิดสเตท และการนำไปใช้ของฟิล์มบางออกไซด์ในตัวแต่ละลิสต์ [29]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้ทำให้เราได้แนวคิดที่จะทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มจากอนุภาคนาโนทองร่วมกับซิงค์ออกไซด์ เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ภายใต้การฉายแสงที่ตามองเห็น

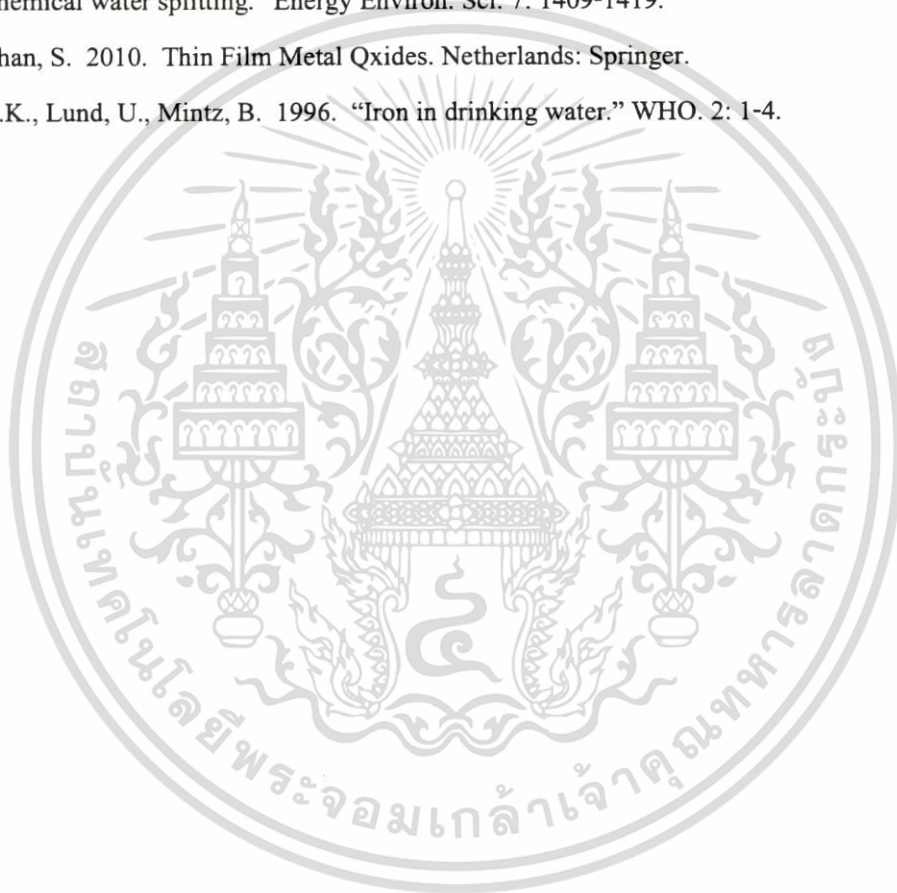
2.8 เอกสารอ้างอิง

- [1] ฉลาด บรรเทา และสุทธิศรี ศรีสุทธกมล 2548 การบำบัดน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ฯ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [2] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล กลิ่นและสมบัติของแสง [Online] Available:<http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/228/index228.html>
- [3] แสง เกิดประทุม 2557 รังสีอัลตราไวโอเลต [Online] Available:<http://www.tistr.or.th/ed/?p=537>.
- [4] Bennett, S., Keller, A. 2011. Comparative photoactivity of CeO_2 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, TiO_2 and ZnO in various aqueous systems. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337310005837>
- [5] สุขมาส คำนวณวิทยกุล 2556 “ซิงค์ออกไซด์วัสดุนกประสงค์” MTEC (ฉบับที่ 69):13-22
- [6] เมธภา วัฒนา ราชนิธิ์ เศษไพศาลเจริญกิจ และเสมอแข จงธรรมานุกรณ์ ม.ป.ป. “การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มข้นของการเจือจลุมิเนียมที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์. ม.ป.ป. วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (nano-ZnO) และการประยุกต์ใช้ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] จุมพล เหมะศิริรินทร์.ม.ป.ป. ทองคำ... โลหะทรงคุณค่า [Online]. Available:<http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/35.pdf>
- [9] ศิริวรรณ ติง 2555 “อนุภาคนาโนทอง: การสังเคราะห์และการประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี” วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (32): 237-245
- [10] ชไมพร แนนันท์, ฌภัทร คคินันธร และณัฐพร คำแสน 2557 “สมบัติทางแสงของสารเรืองแสงที่ผสมกับอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็กระดับนาโน” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] นรินทร์ สิริกุลรัตน์ 2554 พิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำและรอยต่อมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [12] ienergyguru 2558 สารกึ่งตัวนำ (Semicinductor) [Online]. Available: <https://i2.wp.com/ienergyguru.com/wp-content/uploads/2015/06/14.jpg?w=96>.
- [13] ienergyguru 2558 สารกึ่งตัวนำ (Semicinductor) [Online]. Available: <https://i2.wp.com/ienergyguru.com/wp-content/uploads/2015/06/17-e1434439079183.jpg?w=878>.
- [14] NPTEL 2009 SCHOTTKY BARRIER HEIGHT
[Online]. Available: <http://nptel.ac.in/courses/117102061/18>
- [15] Sundaramand, K.B., Ashamin Khan. 1997. "Work Function Determination of Zinc Oxide Films." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 15(428):674-676.
- [16] Herbert B. Michaelson. 1977. "The work function of the elements and its Periodicity." *J. Appl. Phys.* 48(4729): 4729-4733.
- [17] Oti Lumionics Inc.v. Functionalization of a substrate. U.S patent no. EP20130775065. 18 April 2015.
- [18] พชรินทร์ นาคหล่อ 2557 รู้จักเทคโนโลยีเฟนตัน (Fenton Technology) ในระบบบำบัดน้ำเสีย กรุงเทพ : สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ
- [19] สุขนัม แก้วมาตย์และบุญสร้าง ศิริกสถพร 2555 การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์
[Online]. Available: <http://kucon.lib.ku.ac.th/Fulltext/KC5011024.pdf>.
- [20] Baruah, S., Pal, S.K., Dutta, J. 2012. "Nanostructured zinc oxide for water treatment" *NanoScience & Nanotechnology-Asia*. 2: 90-102.
- [21] Lu, Y., Hao, L., Hirakawa, Y., Sato, H. 2015. "Formation process of Ti coatings in mechanical coating with different rotation speed." *Materials Science Forum*. 833: 161-164.
- [22] Gupta, K., Singh, R.P., Pandey, A. 2013. "Photocatalytic antibacterial performance of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ against S. aureus. P. aeruginosa and E.coli." *Beilstein J. Nanotechnol*. 4: 345-351.
- [23] Verdier, T., Coutand, M., Berton, A., Roques, C. 2014. "Antibacterial activity of TiO₂ photocatalyst alone or in coatings on E. coli: The influence of methodological aspects." *Coating*. 4(3): 670-686.
- [24] Lee, W.S., Park, Y.S., Cho, Y.K. 2015. "Significantly enhanced antibacterial activity of TiO₂ nanofibers with hierarchical nanostructures and controlled crystallinity." *Analyst*. 140 (2): 616.
- [25] Jeon, S., Yong, K. 2010. "Morphology-controlled synthesis of highly adsorptive tungsten oxide nanostructures and their application to water treatment." *J. Mater. Chem*. 20: 10146-10151.

- [26] Joshi, U.A., Darwent, J.R., Yiu, H.H.P., Rosseinsky, M.J. 2011. "The effect of platinum on the performance of WO_3 nanocrystal photocatalysts for the oxidation of methyl orange and isopropanol." *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86: 1018-1023.
- [27] Singh, S., Srivastava, V.C., Lo, S.H. 2013. "Mechanism of dye degradation during electrochemical treatment." *J. Phys. Chem. C* 117(29):15229-15240.
- [28] Zhang, X., Liu, Y., Lee, S.T., Yang, S., Kang, Z. 2014. "Coupling surface plasmon resonance of gold nanoparticles with slow-photon-effect of TiO_2 photonic crystals for synergistically enhanced photoelectrochemical water splitting." *Energy Environ. Sci.* 7: 1409-1419.
- [29] Ramanathan, S. 2010. *Thin Film Metal Oxides*. Netherlands: Springer.
- [30] Fawell, J.K., Lund, U., Mintz, B. 1996. "Iron in drinking water." *WHO*. 2: 1-4.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

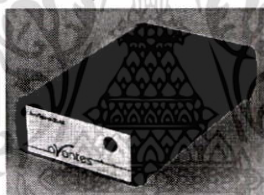
วิธีการดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย กระบวนการในการจัดเตรียมฟิล์ม ZnO/Au การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม และการศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

3.1 เครื่องมือและระบบการวัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดเชิงแสงที่ใช้ตรวจวัดคุณสมบัติเฉพาะของแสง ได้แก่ สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยนำไปใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัม ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (Vis) ความยาวคลื่นที่วัดได้ประมาณ 400-800 นาโนเมตร เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อรุ่นว่า Avantes 0905032E1 มีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น Avantes 0905032E1

3.1.2 แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเปกตรัม

แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเปกตรัม ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.19 แอมแปร์ ซึ่งจะให้แสงในย่านความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ซึ่งจะมีสายใยแก้วนำแสงที่ใช้สำหรับนำส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสเปกตรัมไปยังฟิล์มหรือสารละลาย แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเปกตรัมมีลักษณะดังรูปที่ 3.2

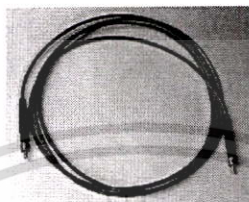


รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเปกตรัมรุ่น SCHOTT MegaLight 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 สายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสง (Avantaes FC-UV200-2) มีลักษณะดังรูปที่ 3.3 จะทำหน้าที่ในการนำส่งแสงที่ผ่านฟิล์มหรือสารละลายเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ สายใยแก้วนำแสงมีขนาดความยาว 2 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมโครเมตร โดยใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติเชิงแสง



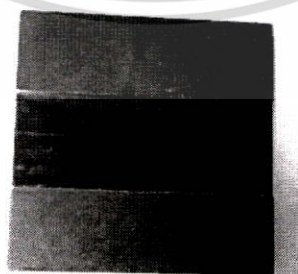
รูปที่ 3.3 สายใยแก้วนำแสง

3.1.4 อุปกรณ์จับยึด

อุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่จับยึดสายใยแก้วนำแสง แผ่นฟิล์ม หรือภาชนะบรรจุสารละลาย ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์จับยึด 3 ลักษณะ ได้แก่ อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม และอุปกรณ์จับยึดภาชนะบรรจุสารละลาย ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4-3.6 ตามลำดับ

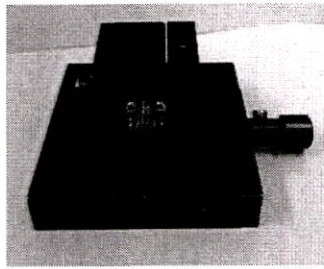


รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดเส้นใยแก้วนำแสง



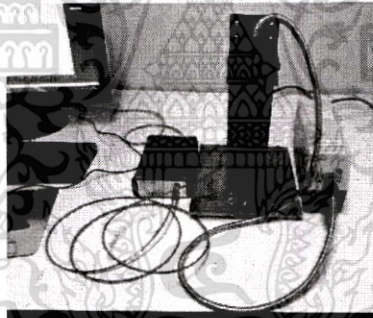
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์จับยึดภาชนะบรรจุสารละลาย

ส่วนประกอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น จะถูกนำมาจัดเป็นระบบวัดสมบัติการดูดกลืนทางแสงซึ่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะเดินทางผ่านสายใยแก้วนำแสงมาตกกระทบกับฟิล์มหรือสารละลาย จากนั้นแสงที่สามารถส่องผ่านฟิล์มหรือสารละลายออกมาได้จะเดินทางเข้าสู่สายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งเพื่อนำแสงไปยังเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แสงที่ถูกนำส่งเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะถูกวิเคราะห์และส่งผ่านเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงโดยโปรแกรม Avasoft รุ่น 7.4 (รูปที่ 3.7-3.8)



รูปที่ 3.7 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์ม



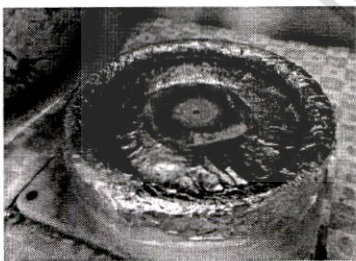
รูปที่ 3.8 ระบบการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

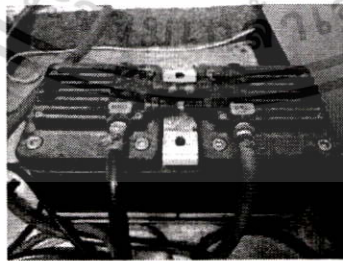
3.1.5 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

การเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง (รูปที่ 3.9) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มได้ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

- 1) แท่นวาง ใช้สำหรับวางแผ่นซิลิโคนและจับยึดกระจกสไลด์ จะมีรูกลวงขนาดเล็กบริเวณจุดกึ่งกลางของแท่น ใช้สำหรับจับยึดเป็นฐานขณะทำการเคลือบฟิล์ม
- 2) แผ่นซิลิโคน ใช้สำหรับจับยึดกระจกสไลด์จะมีรูกลวงขนาดเล็ก
- 3) บั้มสูญญากาศ (ULVAC DAH-60) ใช้ในการดูดกระจกสไลด์ให้ติดกับแท่นวาง โดยบั้มสูญญากาศมีอัตราการปั้ม 60 ลิตร/นาที่ ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์และกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ มอเตอร์ควบคุมความเร็วใช้สำหรับการปรับความเร็วรอบในการหมุนรอบ 3500 ต่อ นาที
- 4) แท่นเหยียบ (Linemaster switch Co., Hercules foot switch) เปรียบเสมือนสวิตช์ที่ใช้ในการสั่งการทำงานของมอเตอร์ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้า 125-250 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์
- 5) หม้อแปลง ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 220 โวลต์เป็นแรงดันไฟฟ้า 110 โวลต์เพื่อเป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กับบั้มสูญญากาศ
- 6) แผ่นอะคริลิก ใช้ในการป้องกันอันตรายจากชิ้นงาน ในกรณีที่ชิ้นงานหลุดออกมาขณะทำการหมุนเคลือบฟิล์ม เนื่องจากแท่นวางจับยึดกับกระจกอาจจะไม่แน่นพอ



แท่นวาง + แผ่นซิลิโคน

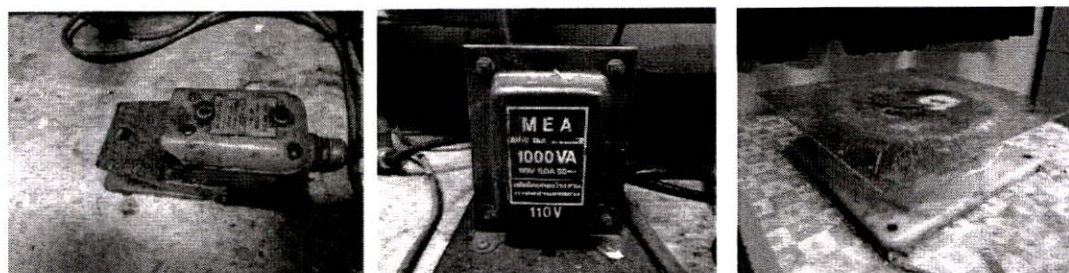


บั้มสูญญากาศ



มอเตอร์ควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แท่นเหยียบ

หม้อแปลง

แผ่นอะคริลิก

รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของระบบเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

3.2 การเตรียมฟิล์ม ZnO/Au

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- Polymethyl Methacrylate (PMMA)
- Dichloromethane (DCM)
- ผงซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide powder) มีขนาดอนุภาค 50 ± 5 nm
- ผงอนุภาคนาโนทอง (Gold powder, Au) มีขนาดอนุภาค 100 ± 10 nm
- ขวดยาแดง
- จุกปิดขวด
- ซ้อนตักสาร
- กระดาษชำระ
- เครื่องชั่งสารแบบดิจิทัล
- กระจกสไลด์ (ขนาด $35 \times 20 \times 1$ mm)
- เครื่องอัลตราโซนิก
- เครื่อง Vortex mixer
- เครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง
- แผ่นซิลิโคน

3.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) แผ่นฟิล์ม ZnO/Au ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง โดยการนำผงซิงค์ออกไซด์ 100 mg ผง PMMA 0.2 gm และผง Au ที่ปริมาณต่างๆ ลงในตัวทำละลาย DCM 1 mL ดังในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของฟิล์ม ZnO/Au

PMMA	ZnO	Au	DCM	Molar ratio (ZnO: Au)
0.2 gm	100 mg	0 mg	1 mL	1:0
0.2 gm	100 mg	100 mg	1 mL	1:0.5
0.2 gm	100 mg	200 mg	1 mL	1:1
0.2 gm	100 mg	400 mg	1 mL	1:2

- 2) ของผสมทั้งหมดจะถูกเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกจนเข้ากันประมาณ 30 นาที
- 3) หลังจากนั้นเขย่าของผสมด้วยเครื่อง Vortex mixer เป็นเวลา 1 นาที
- 4) วางกระจกสไลด์บนแผ่นซิลิโคนที่อยู่บนแท่นวางของเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง
- 5) เทของผสมที่ได้ลงบนกระจกสไลด์ (ขนาด 35 x 20 x 1 mm)
- 6) นำแผ่นอะคริลิกปิดไว้บนแท่นวาง
- 7) เปิดเครื่องเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงโดยการเหยียบสวิตช์ ใช้ความเร็วในการหมุน 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที จะได้แผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO: Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2

3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO/Au

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
- สายใยแก้วนำแสง
- แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนด์
- อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง
- อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม

3.3.2 ขั้นตอนในการทดลอง

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.7
- 2) ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนต่างๆ
- 3) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนกับความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมสารละลาย Fe^{2+}

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- สาร FeCl_2
- สาร Ferrozine
- น้ำ DI
- ขวดรูปชมพู่
- ช้อนตักสาร
- เครื่องชั่งสารแบบดิจิทัล
- เครื่อง Vortex Mixer

3.4.2 ขั้นตอนในการทดลอง

- 1) นำสาร FeCl_2 0.080 gm ผสมกับน้ำ DI 100 mL
- 2) นำสารละลาย FeCl_2 ที่ได้ไปทำการเขย่าด้วยเครื่อง Vortex mixer เป็นเวลา 2 นาที
- 3) นำสาร Ferrozine 0.0492 gm ผสมกับน้ำ DI 100 mL
- 4) นำสารละลาย Ferrozine ที่ได้ไปเขย่าด้วยเครื่อง Vortex mixer เป็นเวลา 2 นาที
- 5) นำสารละลาย FeCl_2 ผสมกับ Ferrozine จนได้สารละลายสีม่วงเข้มของ Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 0.2 mM

3.4.3 การหากราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+}

- 1) เตรียมสารละลาย Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 0.125, 0.2, 0.375, 1.0 และ 2.0 mM
- 2) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.8
- 3) ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่แต่ละความเข้มข้น
- 4) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} ที่ความยาวคลื่นเป็น 560 นาโนเมตร
- 5) จะได้กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+} ในรูปของสมการ $y = ax^2 + bx + c$

3.5 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม ZnO/Au ในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก

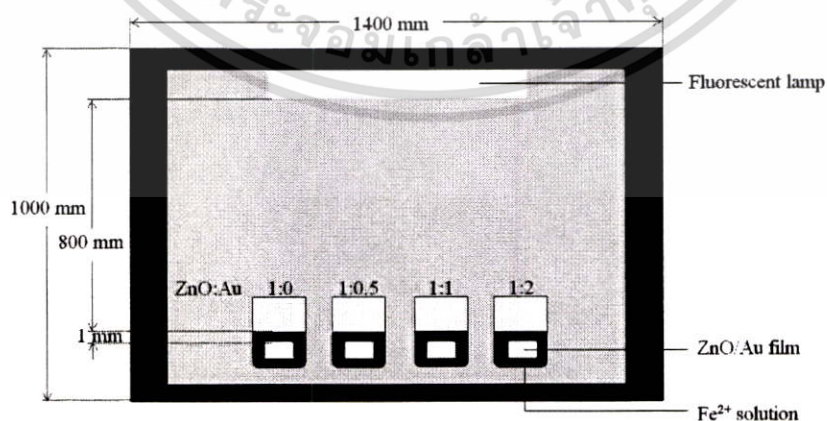
3.5.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บีกเกอร์ขนาด 100 mL
- ตู้ทดลองขนาด 1000 x 1400 x 5400 mm³ ซึ่งภายในตู้มีหลอดฟลูออเรสเซนต์
- แผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่มีอัตราส่วน 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2
- สารละลาย Fe²⁺ ที่ความเข้มข้น 0.2 mM
- กลักซ์มิเตอร์
- เทอร์โมมิเตอร์
- คิวเวทพลาสติก
- ไมโครปิเปตขนาด 100-1000 μ L
- เครื่องสเปกโตรมิเตอร์
- สายใยแก้วนำแสง
- แหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนด์
- อุปกรณ์จับยึดสายใยแก้วนำแสง
- อุปกรณ์จับยึดแผ่นฟิล์ม
- อุปกรณ์จับยึดภาชนะบรรจุสารละลาย

3.5.2 ขั้นตอนในการทดลอง

- 1) เติมสารละลาย Fe²⁺ ปริมาณ 16 mL ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 mL จำนวน 4 ใบ
- 2) นำบีกเกอร์ที่มีสารละลาย Fe²⁺ ทั้ง 4 ใบใส่ไว้ในตู้สี่เหลี่ยมที่ภายในมีหลอดฟลูออเรสเซนต์
- 3) นำแผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่มีอัตราส่วนของ ZnO: Au ต่างๆ กันจุ่มลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ในการศึกษากระบวนการโฟโตแคตาไลติก

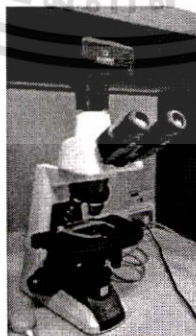
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) จุ่มแผ่นฟิล์มในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที ภายในตู้ทดลองที่ให้แสงสว่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และควบคุมไม่ให้แสงจากภายนอกกระทบกัน วัดอุณหภูมิและความเข้มแสงขณะที่ทำการทดลอง
- 5) เมื่อเวลาผ่านไปครบ 90 นาที นำแผ่นฟิล์มแต่ละอันออกจากสารละลาย Fe^{2+}
- 6) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.7 แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์ม
- 7) นำไมโครปิเปตดูดสารละลาย Fe^{2+} ในบีกเกอร์แต่ละใบจำนวน 1 mL มาใส่ไว้ในคิว-เวทแต่ละอัน
- 8) ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูป 3.8 แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนของสารละลาย Fe^{2+} ที่เหลือ
- 9) นำผลที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มมาวิเคราะห์ด้วยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของแผ่นฟิล์มกับอัตราส่วนต่างๆ ของ ZnO/Au
- 10) นำผลที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนของสารละลาย Fe^{2+} มาวิเคราะห์ด้วยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนของสารละลาย Fe^{2+} กับอัตราส่วนต่างๆ ของ ZnO/Au
- 11) นำค่าการดูดกลืนที่ได้ก่อนจุ่มและหลังจุ่มแผ่นฟิล์มลงในสารละลาย Fe^{2+} มาหาค่าความเข้มข้นก่อนจุ่มและหลังจุ่มเป็น C_0 และ C ตามลำดับ โดยใช้สมการ $y=ax^2+bx+c$ จากกราฟมาตรฐาน เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนของสารละลาย Fe^{2+}
 x คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} (หน่วยเป็น mM)
- 12) พล็อตกราฟการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} ที่อัตราส่วนต่างๆ ของแผ่นฟิล์ม

3.6 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความหนาของแผ่นฟิล์ม ZnO/Au

3.6.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- แผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วน 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2
- กล้องจุลทรรศน์ (Model: Nikon ECLIPSE E200)



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์ (Model: Nikon ECLIPSE E200)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ขั้นตอนในการทดลอง

นำแผ่นฟิล์มของ ZnO/Au ที่อัตราส่วนต่างๆ มาทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 3.11) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างหลังจากที่ได้ทำการจุ่มลงไปในสารละลาย Fe^{2+} พร้อมทั้งวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

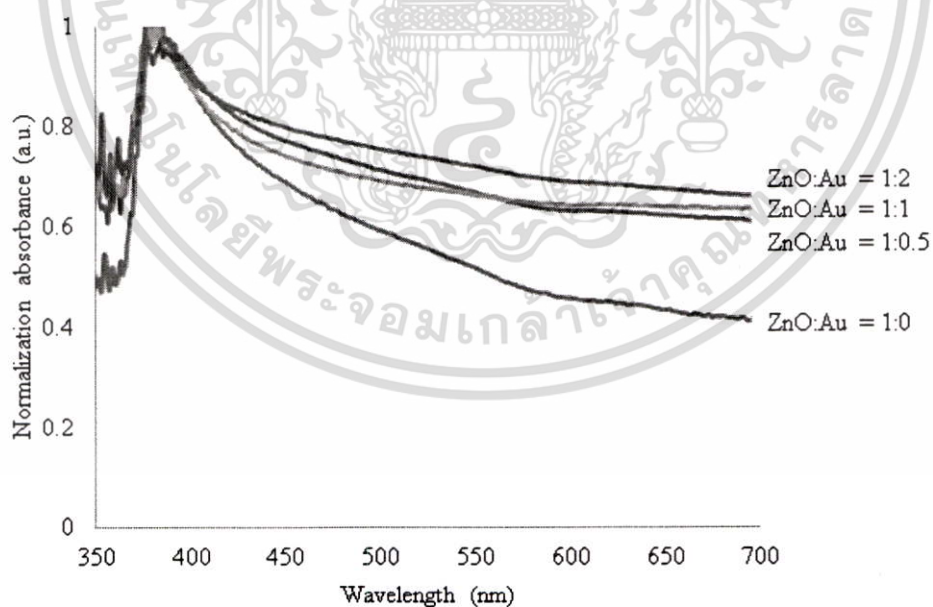
บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการทดลองการเตรียมฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO:Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียภายใต้การฉายแสงในย่านที่ตามองเห็น โดยใช้สารละลาย Fe^{2+} เป็นตัวแทนของโลหะหนัก เมื่อนำแผ่นฟิล์มทั้งก่อนและหลังการจุ่มลงในสารละลาย Fe^{2+} มาตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} ภายหลังจากที่มีการบำบัดน้ำเสียจากโลหะหนักซึ่งจะอธิบายตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO/Au

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO:Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 เมื่อทำการเตรียมฟิล์ม ZnO/Au ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy ภายใต้โปรแกรมสำเร็จรูป Avasoft 7.4.1 พบว่าเมื่อนำกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้มาทำการ normalization เพื่อให้ค่าสูงสุดของกราฟของแต่ละอัตราส่วนของ ZnO:Au มีค่าสูงสุดที่ค่าเดียวกันคือ 1 ซึ่งค่าสูงสุดนั้นเป็นตัวแทนของ ZnO อยู่ที่ค่าความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร

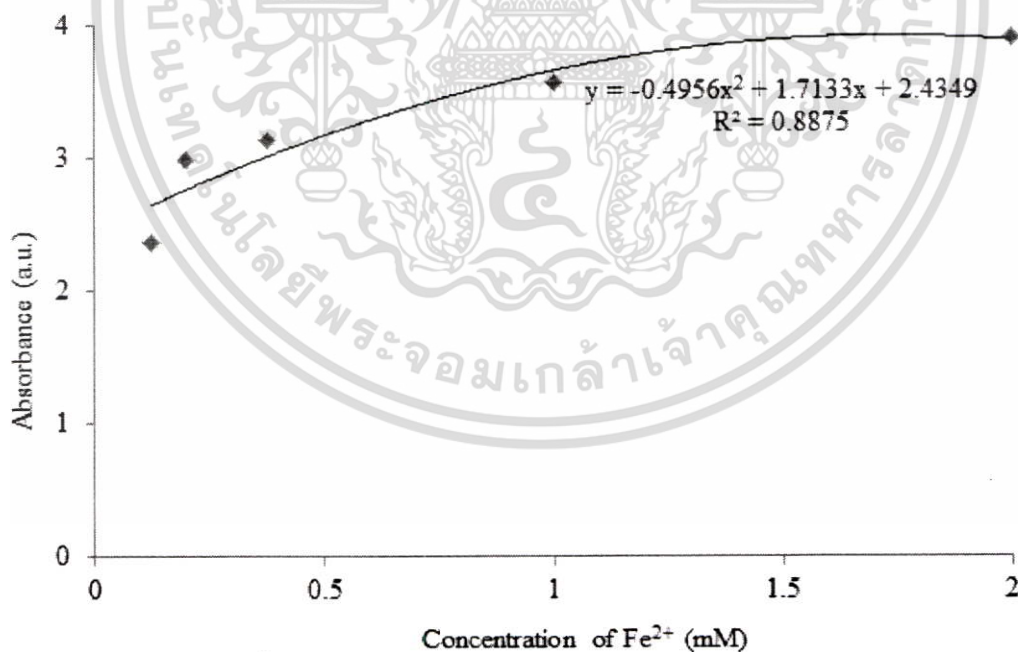


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของฟิล์ม ZnO/Au ที่มีอัตราส่วนของ ZnO:Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2

และจะชี้ให้เห็นถึงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Au อยู่ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สเปกตรัมแสดงให้เห็นถึงการขยายออก (broadening) จากย่านอัลตราไวโอเลตไปย่านที่ตามองเห็นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ ZnO: Au การขยายออกเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการที่ Au เข้าไปเกาะอยู่กับ ZnO ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Au นั้นส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล รวมไปถึงมีการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกของฟิล์ม ZnO/Au อีกด้วย

4.2 การหากราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+}

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+} เพื่อที่จะใช้คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} ก่อนจุ่ม (C_0) และหลังจุ่ม (C) แผ่นฟิล์มลงในสารละลาย Fe^{2+} จากกราฟจะเป็นการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลาย Fe^{2+} โดยวัดค่าการดูดกลืนที่ 560 นาโนเมตร พบว่าจะได้กราฟโพลิโนเมียลที่มีสมการเป็น $y = -0.4956x^2 + 1.7133x + 2.4349$ ซึ่งปริมาณของ Fe^{2+} ที่ไม่ได้เกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม (x) จะถูกคำนวณจากการแทนค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้เข้าไปในสมการโพลิโนเมียล



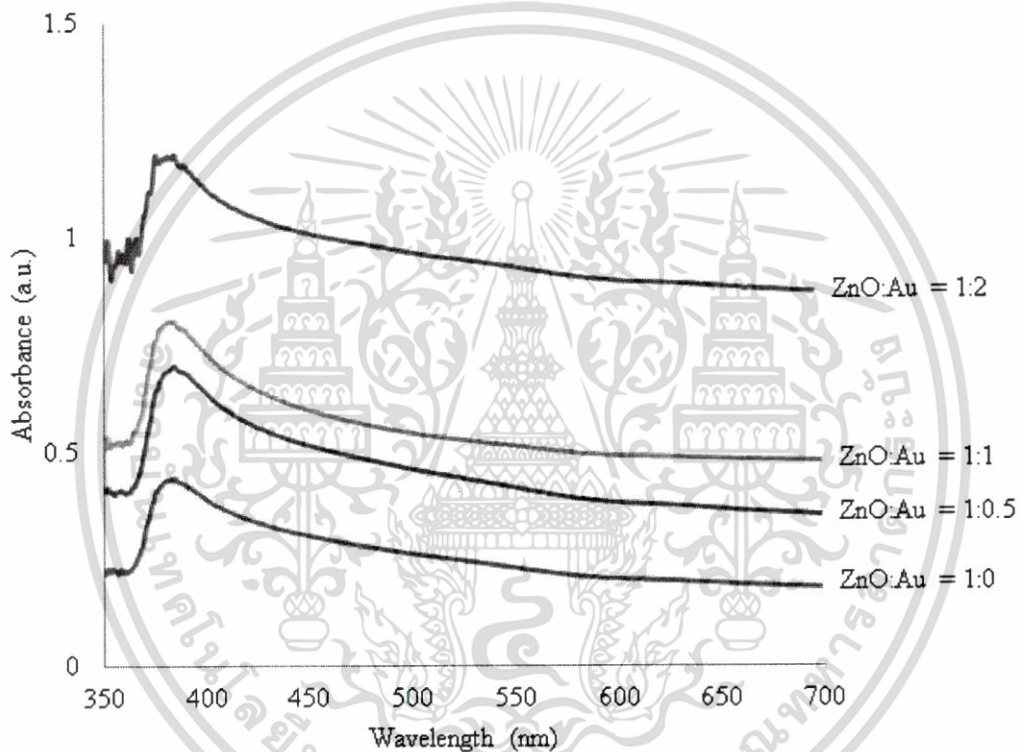
รูปที่ 4.2 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลาย Fe^{2+}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม ZnO/Au ในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก

4.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO/Au ในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก

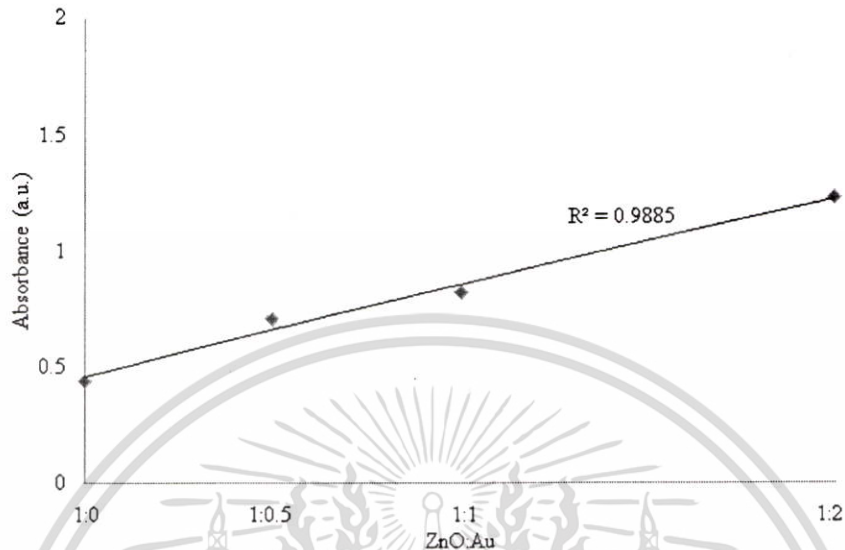
จากรูปที่ 4.3 แสดงกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO:Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ภายหลังจากที่มีการจุ่มแผ่นฟิล์มลงไปในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที โดยสารละลาย Fe^{2+} มีค่าความเข้มข้นคงที่เท่ากับ 0.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ของโลหะหนักในน้ำเสีย [30]



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที

จากรูปพบว่าอัตราส่วนของ ZnO:Au ที่ 1:2 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด และค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของ ZnO:Au ลดลง นั่นคือปริมาณของ Au ลดลง จากรูปที่ 4.3 จะนำค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (ที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของ ZnO:Au ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.4 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จะเห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนของ ZnO:Au นั้น

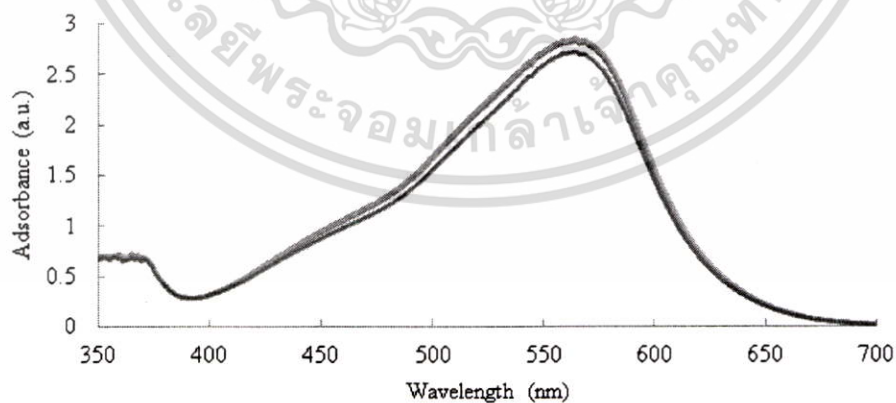
เพิ่มขึ้นจาก 1:0 ไป 1:2 การก่อดัวของ Fe^{2+} บนฟิล์ม ZnO/Au ก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย ผลลัพธ์เหล่านี้จะชี้ให้เห็นว่าปริมาณของ Fe^{2+} มีบทบาทสำคัญต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดของฟิล์ม ZnO/Au หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+}

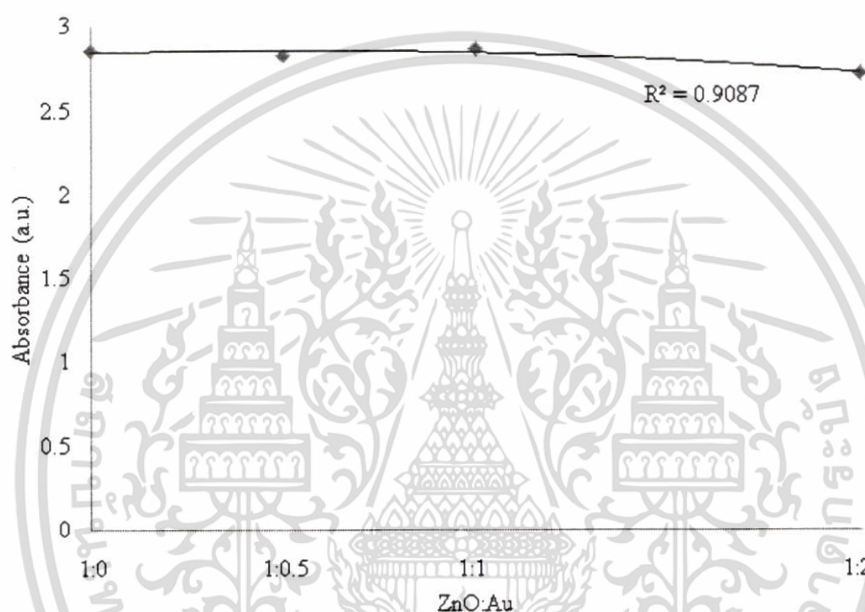
4.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารละลาย Fe^{2+} ในกระบวนการโฟโตแคทาไลติก

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Fe^{2+} ภายหลังจากที่มีการจุ่มแผ่นฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนของ ZnO:Fe คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ลงไปในสารละลาย Fe^{2+} ที่เวลาคงที่พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้นั้นแสดงถึงสารละลาย Fe^{2+} ที่เหลืออยู่ภายหลังจากที่จุ่มแผ่นฟิล์มไป 90 นาที



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลาย Fe^{2+} หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+} เป็นเวลา 90 นาที

จากรูปที่ 4.5 จะนำค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร) มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของ ZnO: Au ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะเห็นได้ว่าถ้าอัตราส่วนของ ZnO: Au นั้นเพิ่มขึ้นจาก 1:0 ไป 1:2 ปริมาณที่เหลือยู่ของ Fe^{2+} ในสารละลายจะมีแนวโน้มที่ลดลง ข้อมูลเหล่านี้จะสอดคล้องกับรูปที่ 4.4 ที่ชี้ให้เห็นว่าปริมาณของ Au เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม ZnO/Au และจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของ ZnO: Au ที่ 1:2 เป็นฟิล์มที่ดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสีย

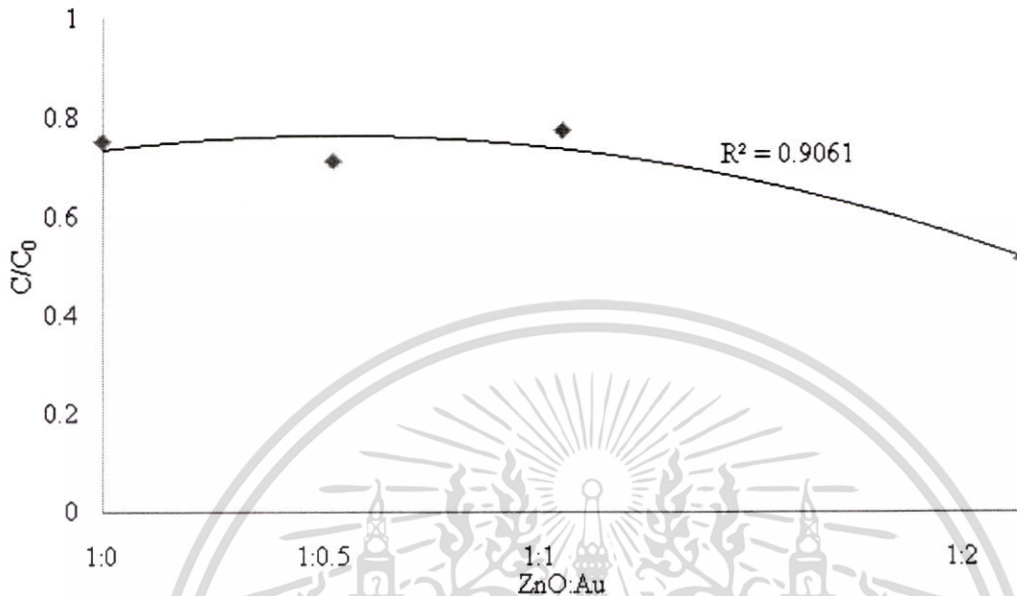


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารละลาย Fe^{2+} หลังการจุ่มฟิล์ม ZnO/Au ลงในสารละลาย Fe^{2+}

4.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์ม ZnO/Au ในกระบวนการโฟโตแคตาไลติก

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} (C/C_0) ที่อัตราส่วนต่างๆ ของฟิล์ม ZnO/Au โดยการใช้ค่าการดูดกลืนสูงสุดจากรูปที่ 4.6 มาแทนเข้าไปในสมการโพลิโนเมียล $y = -0.4956x^2 + 1.7133x + 2.4349$ เพื่อหาความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย Fe^{2+} เมื่อกำหนดให้ x คือปริมาณซึ่งเหลือยู่ของ Fe^{2+} ที่ไม่ได้เกาะบนผิวหน้าของฟิล์ม ZnO/Au ในขณะที่ y คือค่าการดูดกลืนของ Fe^{2+} พบว่าอัตราส่วน ZnO: Au ที่ 1:2 เป็นตัวดูดกลืนที่ดีสำหรับ Fe^{2+} เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{2+} มากกว่าที่อัตราส่วน ZnO: Au อื่นๆ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{2+} ที่สูงที่อัตราส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า Fe^{2+}

ได้มีการเคลื่อนย้ายจากสารละลายไปยังฟิล์ม ZnO/Au ผลลัพธ์เหล่านี้ถูกยืนยันด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดังแสดงในรูปที่ 4.10



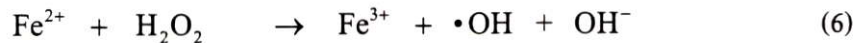
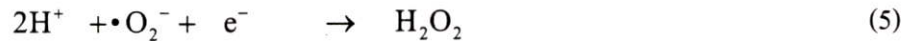
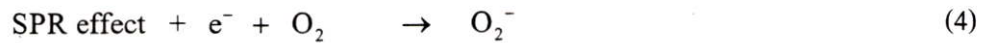
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพของฟิล์ม ZnO/Au ในการกำจัดเหล็ก

4.3.4 กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ฟิล์ม ZnO/Au

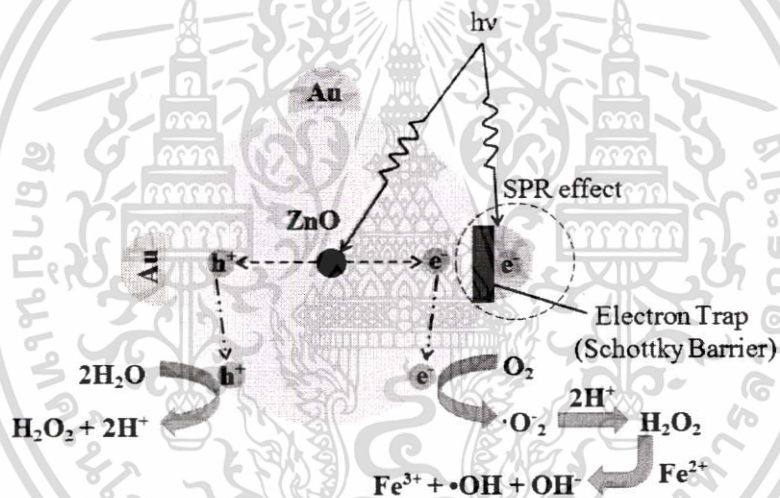
ในงานวิจัยนี้การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยฟิล์ม ZnO/Au ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกซึ่งมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารโฟโตแคตาไลสต์ ในกลไกการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง ZnO จะเกิดปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อถูกฉายด้วยแสงในย่านอัลตราไวโอเลต เนื่องจาก ZnO มีแถบพลังงานที่กว้าง มันจึงดูดกลืนแสงในย่านนี้ได้ แต่การเตรียมฟิล์มอนุภาคนาโนทอง (Au) ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารโฟโตแคตาไลสต์ของ ZnO ด้วยปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ จึงทำให้แถบพลังงานของ ZnO แคบลง ส่งผลให้ฟิล์ม ZnO/Au สามารถดูดกลืนแสงไปจนถึงย่านตามองเห็นและเริ่มการทำงานของกลไกโฟโตแคตาไลซิสได้ จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงกลไกโฟโตแคตาไลซิสของฟิล์ม ZnO/Au เมื่อ ZnO ถูกฉายด้วยแสงคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะแยกออกจากกัน และในขณะเดียวกันจะเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์บนอนุภาคนาโนทอง (Au) ตามสมการ (1) และ (2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการแยกตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลบนพื้นผิวของ ZnO โสลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวหลักสำคัญในการบำบัดน้ำเสีย และอิเล็กตรอนของ ZnO จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนในสารละลายกลายเป็นซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) ดังสมการ (3) และ (4) อีกทั้งอิเล็กตรอน (e^-) ยังทำปฏิกิริยากับ H^+ และ O_2^- ทำให้ได้ H_2O_2 ดังสมการ (5) หลังจากนั้น H_2O_2 จะทำปฏิกิริยากับเหล็ก (Fe^{2+}) ตามสมการ (6) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในน้ำเสียกลายเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาเฟนตัน

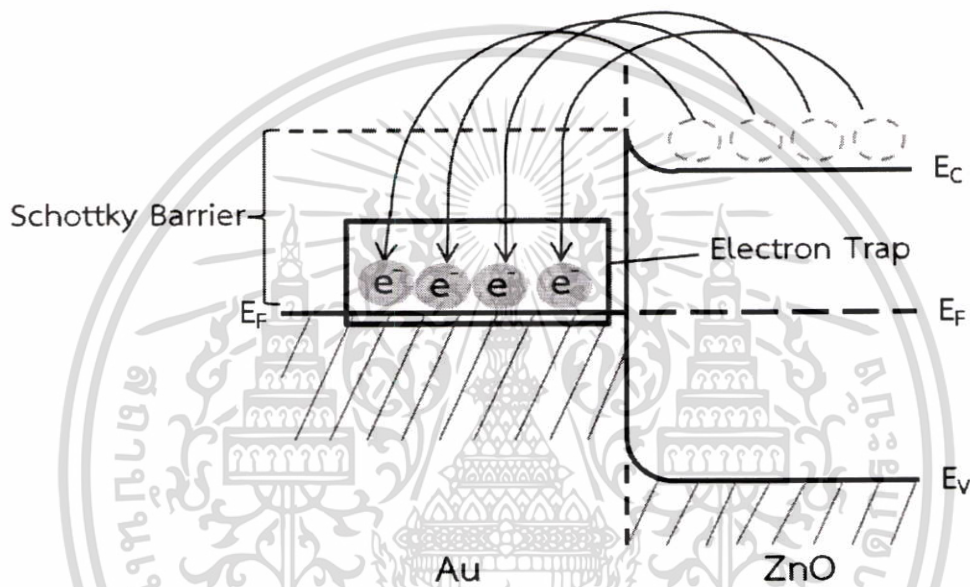


รูปที่ 4.8 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสของฟิล์ม ZnO/Au

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลกระทบจากการศึกษาปรากฏการณ์บริเวณผิวรอยต่อหลังการสัมผัสกันของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กับอนุภาคนาโนทอง (Au) ของฟิล์ม ZnO/Au เมื่อระดับพลังงานเฟอร์มิเกิดสภาวะสมดุล พบว่าจะเกิดปรากฏการณ์ชอตกกีขึ้นในรอยต่อเรียกว่ารอยต่อแบบชอตกกี และการศึกษาค่าคงที่ของฟังก์ชันงาน (Work Function, ϕ) ยังสามารถบ่งบอกได้ถึงชนิดของรอยต่อแบบชอตกกีและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงาน พบว่า $\phi_{\text{Au}} = 5.10 \text{ eV}$ และ $\phi_{\text{ZnO}} = 4.35 \text{ eV}$ เมื่อ $\phi_{\text{ZnO}} < \phi_{\text{Au}}$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการเกิดรอยต่อแบบชอตกกีชนิดเอ็น และรอยต่อนี้ยังอธิบายการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ว่าอิเล็กตรอน (e^-) ของ ZnO จะเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวของ Au ซึ่งในธรรมชาตินั้น Au เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำที่ดี มีความเข้มข้นของประจุพาหะสูงกว่า ZnO แม้ว่า ZnO จะถูกเจือปนสูง Au ก็สามารถรับอิเล็กตรอนได้เป็นจำนวนมากเพราะฉะนั้นประจุพาหะของ Au จึงดึงดูดอิเล็กตรอนจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ ZnO ส่งผลให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดกระบวนการแยกออกจากกันได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายเทไปยังอนุภาคนาโนทองจะไม่สามารถเคลื่อนที่กลับมายัง ZnO ได้ เนื่องจากมีกำแพงศักย์ขอตก ซึ่งมีศักย์สูงกว่ามันเรียกได้ว่าเป็นกลไกของการกักเก็บอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

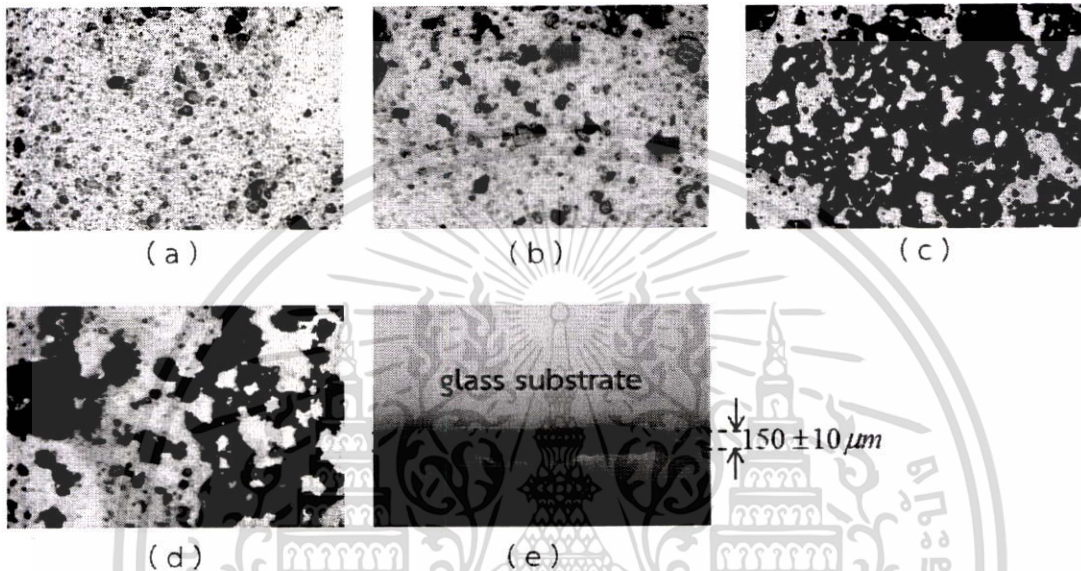


รูปที่ 4.9 ปรากฏการณ์ขอตกบริเวณรอยต่อระหว่างซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กับอนุภาคนาโนทอง (Au) ของฟิล์ม ZnO/Au

4.4 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความหนาของฟิล์ม ZnO/Au

เมื่อทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโลหะหนักด้วยฟิล์ม ZnO/Au ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 (แผ่นฟิล์มมีขนาด 150 ± 10 ไมโครเมตร) หลังจากทำการจุ่มแผ่นฟิล์มลงในสารละลาย Fe^{2+} ภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม ZnO/Au ที่มีอัตราส่วนที่ต่างกันภายหลังจากทำการกำจัดโลหะหนักเป็นเวลา 90 นาทีพบว่าอนุภาคนาโน ZnO (ขนาดอนุภาค 50 ± 5 นาโนเมตร) แสดงรูปร่างอยู่บนฐานรองที่เป็นแก้ว (ซีด้วยลูกศรสีแดง) และเมื่อมีการเติม Au (ขนาดอนุภาค 100 ± 10 นาโนเมตร) ลงในอนุภาคนาโน ZnO จะแสดงรูปร่างอยู่บนฐานรองที่เป็นแก้ว (ซีด้วยลูกศรสีน้ำเงิน) กลุ่มก้อนของ Au เป็นที่น่าสังเกตเมื่อมีการเทียบกับอนุภาคนาโน ZnO เนื่องจากขนาดมีผลต่อการก่อตัวของฟิล์มซึ่งก็คือเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ Au ตามอัตราส่วนของ ZnO: Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ

1:2 ดูเหมือนจะเป็นการเพิ่มการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนจากขนาดเล็กเป็นขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 1(a), 1(b), 1(c) และ 1(d) ตามลำดับ นอกจากนี้การกระจายตัวของสีดำที่เข้าไปในฟิล์มเหล่านี้ยังเป็นการสนับสนุนว่ามีการก่อตัวของ Fe^{2+} เกิดขึ้น นั่นคือเมื่อเราเติมอัตราส่วนของ ZnO: Au มากขึ้น จะทำให้มีการก่อตัวของ Fe^{2+} บนตัวอย่างของเราเพิ่มขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วน (a) 1:0, (b) 1:0.5, (c) 1:1, (d) 1:2 หลังการกำจัดโลหะหนัก และ (e) ความหนาของแผ่นฟิล์มเท่ากับ $150 \pm 10 \mu\text{m}$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของกระบวนการโฟโตแคทาไลติกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ร่วมกับอนุภาคนาโนทองในรูปแบบฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและอนุภาคนาโนทองมีคุณสมบัติด้านเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ เมื่อทำการเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ร่วมกับอนุภาคนาโนทองในรูปแบบฟิล์มจะสามารถดึงให้ค่าการดูดกลืนของแสงนั้นอยู่ในย่านที่ตามองเห็นได้ ส่งผลให้เกิดกระบวนการโฟโตแคทาไลติกในย่านแสงที่ตามองเห็น ดังนั้นจึงเป็นการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ถูกเตรียมร่วมกับอนุภาคนาโนทองในรูปแบบฟิล์มซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง ZnO: Au คือ 1:0, 1:0.5, 1:1 และ 1:2 สามารถสรุปงานวิจัยได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มมีการขยายออกสู่ย่านแสงที่ตามองเห็นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคนาโนทองซึ่งเป็นการยืนยันว่า ปฏิกิริยาเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์สามารถช่วยในการดึงค่าการดูดกลืนแสงของซิงค์ออกไซด์จากเดิมที่อยู่ในย่านอัลตราไวโอเลตให้แผ่ขยายไปถึงย่านที่ตามองเห็นได้แล้วเมื่อนำแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนต่างๆ ไปจุ่มลงในสารละลาย Fe^{2+} ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของโลหะหนักในน้ำเสียเป็นเวลา 90 นาทีภายใต้การฉายแสงที่ตามองเห็น หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์ม ZnO/Au และสารละลาย Fe^{2+} มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis spectroscopy พบว่ามีพีคการดูดกลืนแสงของเหล็กปรากฏขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร โดยแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของ ZnO: Au เป็น 1:2 จะมีพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดในทางตรงข้ามสารละลาย Fe^{2+} ที่ถูกจุ่มด้วยแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของ ZnO: Au เป็น 1:2 นั้นมีพีคการดูดกลืนที่ต่ำสุดซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณของเหล็กที่เหลืออยู่ในสารละลายนั้นลดลง นั่นคือปริมาณของอนุภาคนาโนทองมีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์ม ZnO/Au และจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของ ZnO: Au ที่ 1:2 เป็นแผ่นฟิล์มที่ดีที่สุดในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ผลการทดลองนี้สามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มที่มีอนุภาคของเหล็กมาเกาะบริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม ZnO/Au และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Fe^{2+} (C/C_0) ได้อีกด้วย

บทที่ 6
สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

M. Sirivichai, O. Thanjai, P. Thonglim and K. Locharoenrat, Removal of Heavy Metal with ZnO/Au Composite under Visible Light Illumination, *Materiale Plastice* (Submitted).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวม ทั้งโครงการ (บาท)	ค่าใช้จ่าย จากรายงานครั้ง ก่อน (บาท)	ค่าใช้จ่าย งวดปัจจุบัน (บาท)	รวมค่าใช้จ่าย สะสมถึง ปัจจุบัน (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน) (บาท)
งบดำเนินงาน					
ค่าใช้สอย	13,000	11,050	1,950	13,000	-
ค่าวัสดุ	37,000	31,450	5,550	37,000	-
รวม	50,000	42,500	7,500	50,000	-

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ (บาท)	เมื่อ
งวดที่ 1	42,500	พฤศจิกายน 2559
งวดที่ 2	7,500	มกราคม 2560
รวม	50,000	①

งวดเงินที่ใช้จ่าย	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	เมื่อ
งวดที่ 1	42,500	พฤศจิกายน 2559
งวดที่ 2	7,500	มกราคม 2560
รวม	50,000	②

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② 0 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย กฤษกร โล่เจริญรัตน์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Physical Materials Science	JAIST	2007
MSc	Processing Technology	AIT	2000
BSc	Chemical Technology	Chulalongkorn University	1994

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

K. Locharoenrat, A. Sugawara, S. Takase, H. Sano, and G. Mizutani, Shadow Deposition of Copper Nanowires on the Faced NaCl(110) Template, Surface Science, 601 (2007) 4449.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Phenomenological Studies of Optical Properties of Cu Nanowires, Science & Technology of Advanced Materials, 8 (2007) 277.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Self-Organized Copper Nanowires Studied by Second Harmonic Spectroscopy, Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (2007) WE5.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Rotational Anisotropy in Second Harmonic Intensity from Copper Nanowire Arrays on the NaCl(110) Substrates, J. Luminescence, 128 (2008) 824.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Second Harmonic Spectroscopy of Copper Nanowire Arrays of on the (110) Faceted Faces of NaCl Crystals, J. Physics: Conference Series, 100 (2008) 052050.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Field Enhancement in Arrays of Copper Nanowires Investigated by the Finite-Difference Time-Domain Method, *Surface and Interface Analysis*, 40 (2008) 1635.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Demonstration of Confocal Sum Frequency Microscopy, *Physica Status Solidi (c)*, 6 (2009) 304.

G. Mizutani, K. Lochaorenrat, H. Li, and H. Sano, Construction of an Optical Sum Frequency Microscope with Confocal Optics, *Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Optics & Photonics Congress* (2009) JWA23.

G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Quantification of Fluorescence Target in Tissue Phantoms by Time-domain Diffuse Optical Tomography with Phantoms – Total-Light Approach, *Optical Society of America Technical Digest of Biomedical* (2010), BTuD11.

G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Time-Domain Fluorescence Diffuse Optical Tomography for Live Animals by Total-Light Algorithm, *Proceedings of SPIE*, 7896 (2011) 78962Q.

C-Y. Kao, C-W. Chang, K. Locharoenrat, C-M. Chang, Max T-K. Hou, and I-J. Hsu, Compact Optical Delay Line for Long-Range Scanning, *Optics Communications*, 284 (2011) 4243.

K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Optical Delay Line for Rapid Scanning Low-Coherence Reflectometer, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2 (2012) 904.

K. Locharoenrat, and G. Mizutani, Characterization, Optical, and Theoretical Investigation of Arrays of the Metallic Nanowires Fabricated by a Shadow Deposition Method, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 652.

K. Locharoenrat, Nonlinear Optical Properties of Controlled Fabrication of Copper Nanowires by a Shadow Deposition, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 777.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Nitrogen Concentrations on Structural and Optical Properties of Aluminium Nitride Films Deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research*, 631-632 (2013) 186.

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Structure and Piezoelectric Properties of Aluminium Nitride Thin films on the Quartz Substrates deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research* 699 (2013) 308.

K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Construction of the Optical Delay Line for the Optical Coherence Tomography, *International Journal of Applied Physics and Mathematics* 3 (2013) 137.

K. Locharoenrat, Copper Nanowires on NaCl (110) Template, *Applied Mechanics and Materials*, 313 (2013) 198.

K. Locharoenrat, Investigation of Temporal Profiles at the Symmetrical Points of the Target in Tissue Phantoms by Time-Resolved Fluorescence Diffuse Optical Tomography, *Proceedings of SPIE*, 8883 (2013) 88831I.

K. Locharoenrat, Preparations and Field Emission from Tungsten Nanotips, *Ferroelectrics*, 457 (2013) 76.

K. Locharoenrat, Second-Order Nonlinear Optical Response of Metal Nanostructures, *Advanced Materials Research* 858 (2014) 147.

K. Locharoenrat, Mechanism of Resonant Enhancement of Gold- and Copper-nanowires Arrays, *Advanced Materials Research*, 902 (2014) 29.

K. Locharoenrat, Recent Advances in Nanomaterial Fabrication, *Journal of. Physics: Conference Series* 495 (2014) 012018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K. Locharoenrat, Optical Property of Indocyanine Green in a Tissue Model, *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 604 (2014) 59.

K. Locharoenrat, Second Harmonic Generation Based on Strong Field Enhancement in Metallic Nanostructured Surface, *Materials Science – Medziagotyra*, 20(4) (2014) 387.

K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Plasmonic Properties of Gold-Palladium core-shell Nanorods, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 16(3) (2015) 120.

K. Locharoenrat and S. Srivatcharakul, Optical Studies of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biomedical Application, *Chinese Journal of Physics* 53(4) (2015) 080901.

K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Enhancement of Fluorescence in Inorganic Dyes by Metallic Nanostructured Surfaces, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 17(1) (2016) 21-26.

K. Locharoenrat, Preparation and Metal Removal from Chitosan/PEG Blend, *Applied Mechanics and Materials*, 835 (2016) 348.

S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Recent Trend of Solar Tracking System for Electric Power Conversion, *Applied Mechanics and Materials*, 835 (2016) 731.

M. Brankov and K. Locharoenrat, Photostability Testing of Coumarin-153 Doped ZnO Thin Films Prepared with Spin-Coating Technique, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 17(2) (2016) 75-80.