# การสลายตัวด้วยแสงของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

# PHOTODEGRADATION OF FORMALDEHYDE IN AIR USING SILVER-TITANIUM DIOXIDE AS PHOTOCATALYST UNDER VISIBLE LIGHT


รติมา เนตรลือชา

เอกรัฐ คล้ายภู่

ไอยคุปต์ ขิงรัมย์


โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PHOTODEGRADATION OF FORMALDEHYDE IN AIR USING SILVER-TITANIUM DIOXIDE AS PHOTOCATALYST UNDER VISIBLE LIGHT

RATIMA NATLUECHA
AKEKARAT KLYPOO
AIYAKUB KHINGRAM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **หัวข้อโครงงานพิเศษ** | การสลายตัวด้วยแสงของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ |
| **ชื่อนักศึกษา** | นางสาวรติมา เนตรลือชา รหัสนักศึกษา 58050670 |
| | นายเอกรัฐ คล้ายภู่ รหัสนักศึกษา 58050705 |
| | นายไอยคุปต์ ขิงรัมย์ รหัสนักศึกษา 58050706 |
| **ปริญญา** | วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) |
| **ภาควิชา** | เคมี |
| **ปีการศึกษา** | 2561 |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน |
| **อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** | ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ |

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์<br>ประธานกรรมการ | |
| ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น<br>กรรมการ | |
| รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน<br>กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา | |
| ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์<br>กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงงานพิเศษ** การสลายตัวด้วยแสงของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวรติมา เนตรลือชา รหัสนักศึกษา 58050670
นายเอกรัฐ คล้ายภู่ รหัสนักศึกษา 58050705
นายไอยคุปต์ ขิงรัมย์ รหัสนักศึกษา 58050706

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

**ภาควิชา** เคมี

**ปีการศึกษา** 2561

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์

## บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์ขนาด 50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บรรจุคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ตอนที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2$), กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($GO\text{-}TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2/GO$) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์และรังสียูวีซี (254 นาโนเมตร) กำลัง 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง เตรียมก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผ่านอากาศเข้าคอลัมน์ที่มีแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาจำนวน 3 ชั้น ที่อัตราการไหลของก๊าซ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตอนที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศของตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้โดยแปรค่าสัดส่วนซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0.5%, 1% และ 2% โดยโมล จำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบสารเร่งปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั้น กำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 18, 36 และ 72 วัตต์ และอัตราการไหลของก๊าซที่ 200, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 411 นาโนเมตร จากผลการศึกษาพบว่า ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกสลายตัวภายใต้แสงที่มองเห็นได้เมื่อเติมซิลเวอร์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพบว่าซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.0% โดยโมล และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้สูงสุด ที่ 67.08 และ 69.26 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ คือ ใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 0.5% โดยโมล จำนวนชั้นของแผ่นลวดเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชั้น กำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์ และอัตราการไหลของก๊าซ 300 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 78.99 เปอร์เซนต์

**คำสำคัญ :** ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออไซด์ ฟอร์มาลดีไฮด์ แสงที่มองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Title** | Photodegradation of Formaldehyde in Air using Silver-Titanium Dioxide as Photocatalyst under Visible Light | | | |
| **Students** | Miss Ratima | Natluecha | Student ID | 58050670 |
| | Mr. Akekarat | Klypoo | Student ID | 58050705 |
| | Mr. Aiyakub | Khingram | Student ID | 58050706 |
| **Degree** | Bachelor of Science (Environmental Chemistry) | | | |
| **Department** | Chemistry | | | |
| **Faculty** | Science | | | |
| **University** | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | | | |
| **Academic Year** | 2018 | | | |
| **Advisor** | Assoc. Prof. Dr Suwannee Junyapoon | | | |
| **Co-advisor** | Dr. Chaval Sriwong | | | |


## Abstract


This special project studied the removal efficiency of formaldehyde in air using photocatalysis. The experiment was carried out in a laboratory scale using a 50×45×80 $cm^3$ reactor containing an acrylic column 9 cm dia., 50 cm ht. The experiment was divided into 2 steps: 1) to study the efficiency of catalysts for removing formaldehyde in air using titanium-dioxide ($TiO_2$), silver-titanium dioxide (Ag-$TiO_2$), graphene oxide-titanium dioxide (GO-$TiO_2$) and silver-titanium dioxide/graphene oxide (Ag-$TiO_2$/GO) as catalysts. Fluorescent lamps and UV-C lamps-254 nm (4x18 watts) were used as visible light and UV light, respectively. Formaldehyde gas was prepared by heating 1% v/v formaldehyde solution at temperature of 70 °C, then passed through the column containing three stainless steel wires coated with catalysts at a flow rate of 500 ml/ min. 2) to study the optimum conditions for removing formaldehyde using Ag-$TiO_2$ as a catalyst under visible light. The proportion of Ag-$TiO_2$ was varied at 0.5%, 1% and 2% by moles. The layer of stainless steel wire coated with the catalyst was varied at 1, 3 and 5 layers. The power level of fluorescent lamps was varied at 18, 36 and 72 watts. The gas flow rate was varied at 200, 300 and 500 ml/min. The formaldehyde concentrations were measured using an UV-Vis spectrophotometer at wavelength of 411 nm. The experimental results showed that formaldehyde could be degraded under visible light when adding silver



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

into titanium dioxide. The results showed that the removal of formaldehyde using Ag-$TiO_2$ 1.0% by mole and Ag-$TiO_2$/GO under visible light was 67.08% and 69.26%, respectively. The optimum conditions for removing formaldehyde in air were Ag-$TiO_2$, 0.5% by mole; catalyst layer, 5 layers; light power, 72 watts; flow rate, 300 mL/min. Under these optimum conditions, the removal efficiency of formaldehyde in air was 78.99%

**Keywords**: photocatalysis, silver-titanium dioxide, formaldehyde, visible light




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูนอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้ความช่วยเหลือ ปรึกษาเสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่อง ปรับปรุงและเอาใจใส่รายละเอียดของโครงงานพิเศษ รวมถึง ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้ความช่วยเหลือเสนอแนะ จนโครงการพิเศษฉบับนี้มีความสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำโครงงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ และเจ้าที่หน้าประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยเอื้ออำนวยความสะดวกในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบังที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือในการตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสาร

ขอขอบคุณบริษัท เจ๊บเซ่น แอนด์ เจ๊สเซ่น อินกรีเดียนส์ (ที) จำกัด ที่อนุเคราะห์สารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆนักศึกษา ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือให้โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นายเอกรัฐ คล้ายภู่
นายไอยคุปต์ ชิงรัมย์
นางสาวรติมา เนตรลือชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

**เรื่อง ..... หน้า**
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฎ
**บทที่ 1 บทนำ ..... 1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย ..... 2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย ..... 2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ ..... 3
**บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 4**
2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 4
2.1.1 คุณสมบัติของฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 4
2.1.2 ประโยชน์ของฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 5
2.1.3 อันตรายฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 6
2.1.4 การปฐมพยาบาลเบื้องต้นเมื่อสัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 7
2.1.5 วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 7
2.2 หลักการทำงานของโฟโตคะตะไลซิส ..... 8
2.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 9
2.2.2 ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 11
2.2.3 กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 11
2.2.4 ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์ ..... 11
2.3 แสง ..... 11
2.3.1 รังสีอัลตราไวโอเลต ..... 12
2.3.2 แสงฟลูออเรสเซนต์ ..... 13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

**เรื่อง ..... หน้า**

**บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ..... 19**

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี ..... 19

3.1.1 วัสดุหรืออุปกรณ์ ..... 19

3.1.2 สารเคมี ..... 18

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย ..... 19

3.2.1 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ..... 19

3.2.2 การสร้างคอลัมน์และตู้ปฏิกรณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 22

3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโต- คะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ..... 23

3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ..... 25

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ..... 26

**บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปลายผล ..... 27**

4.1 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์และลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ..... 27

4.1.1 การหาองค์ประกอบธาตุของโฟโตคะตะลิสต์เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ..... 27

4.1.2 การทดสอบหาเอกลักษณ์ของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ..... 28

4.1.3 การทดสอบหาเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ..... 28

4.1.4 การทดสอบการดูดกลืนแสงของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค UV–Vis spectroscopy ..... 29

4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนแผ่นลวดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ..... 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

**เรื่อง ..... หน้า**

4.1.6 ผลการวิเคราะห์ดูการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนแผ่นลวดด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ..... 33

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$, Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$ และ Ag-$TiO_2$/GO ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงยูวีซี ..... 35

4.3 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-$TiO_2$ ..... 36

4.3.1 ผลของจำนวนชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ..... 37

4.3.2 ผลของกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เหมาะสม ..... 38

4.3.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสม ..... 39

**บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ..... 40**

5.1 สรุปผลการวิจัย ..... 40

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 40

เอกสารอ้างอิง ..... 41

ภาคผนวก ..... 44

ภาคผนวก ก ..... 45

ภาคผนวก ข ..... 48

ภาคผนวก ค ..... 49

ภาคผนวก ง ..... 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

**ตารางที่.....หน้า**

2.1 สมบัติทางกายภาพของฟอร์มาลดีไฮด์แลฟอร์มาลีน ..... 5

2.2 สมบัติทางเคมีของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์และฟอร์มาลีน ..... 5

2.3 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 9

3.1 เทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะและสัณฐานวิทยา ..... 20

4.1 องค์ประกอบธาตุของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค X-RAY FLUORESCENCE (XRF) ..... 27

ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 46

ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 47

ค-1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโต คะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ภายใต้แสงยูวีซี ..... 49

ค-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโต คะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ..... 50

ค-3 ผลการทดลองหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ..... 51

ค-4 ผลการทดลองหากำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 52

ค-5 ผลการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 53

ง-1 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี ..... 54

ง-2 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีซี ..... 55

ง-3 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ ..... 56

ง-4 ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีซี ..... 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง (ต่อ)

**ตารางที่ ..... หน้า**

ง-5 ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ ..... 58

ง-6 ผลของการเปรียบเทียบจำนวนชั้นของ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ ..... 59

ง-7 ผลของการเปรียบเทียบกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 60

ง-8 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลส 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์ ..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

**รูปที่ ..... หน้า**

2.1 กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ..... 8
2.2 โครงสร้างแบบต่างๆของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 9
2.3 ช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวีแต่ละชนิด ..... 11
2.4 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ..... 12
3.1 ตู้ปฏิกรณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 22
3.2 ระบบการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต์ ..... 25
4.1 การทดสอบหาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นลวดเทคนิค FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR) ..... 28
4.2 ผลการทดสอบเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค RAMAN SPECTROSCOPY ..... 29
4.3 ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV–VIS SPECTROSCOPY ที่ความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร ..... 30
4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส ..... 31
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของ 0.5% สัดส่วนโมล ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสหลังบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 33
4.6 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวธาตุของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส ..... 34
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ของโฟโตคะตะลิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี ..... 36
4.8 จำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 37
4.9 กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 38
4.10 อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 39
ก.1 กราฟค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 46
ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ..... 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ/สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| VIS | แสงที่มองเห็นได้ |
| UVC | แสงยูวีซี |
| $TiO_2$ | ไทเทเนียมไดออกไซด์ |
| Ag-$TiO_2$ | ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ |
| GO-$TiO_2$ | กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ |
| Ag-$TiO_2$/GO | ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซต์/กราฟีนออกไซด์ |
| cm | เซนติเมตร |
| °C | องศาเซลเซียส |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเศรษฐกิจและสังคมส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลปริมาณมาก ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น ฝนกรด ภาวะโลกร้อน การเกิดหมอกควันแบบโฟโตเคมี (Photochemical smog) ดังนั้น การกำจัดมลพิษที่แหล่งกำเนิดจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศ กระบวนการกำจัดมลพิษอากาศที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนโฟโตออกซิเดชันในการสลายตัวของสารอินทรีย์ต่างๆ โดยไม่เกิดมลพิษชนิดทุติยภูมิ (secondary pollutants) ที่เป็นอันตราย โดยทั่วไปการสลายตัวของมลพิษขึ้นอยู่กับการดูดซับมลพิษบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (photocatalyst) อย่างไรก็ตาม มลพิษที่เป็นก๊าซนั้นมีความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของโมเลกุลก๊าซที่ไม่เป็นระเบียบทำให้ลดระยะเวลาการตกค้างของมลพิษ ทำให้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดมลพิษอากาศ ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่มีความสามารถในการดูดซับสูง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.2 eV เมื่อถูกกระตุ้นโดยแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนและช่องว่างอิเล็กตรอน (hole) และสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($^{\bullet}OH$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ทำให้สามารถสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และน้ำ ($H_2O$) โดยทั่วไป นิยมนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการกำจัดมลพิษอากาศ เนื่องจากมีราคาถูก ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงมีความเสถียรทางความร้อนและทางเคมี อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อเสียคือ มีค่า Light-harvesting capacity ต่ำและมีอัตราการกลับไปรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (electron-hole recombination) สูง อีกทั้งยังมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานสูง ทำให้มีขีดจำกัดของประสิทธิภาพการทำงาน จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเจือกับโลหะทรานซิชัน เช่น Au, Ag, Pt เป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางการดูดกลืนแสง โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทอิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้สามารถขยายช่วงดูดกลืนแสงให้ครอบคลุมแสงที่มองเห็นได้ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกราฟีน (graphene) จะทำให้การดักจับอิเล็กตรอนเพื่อให้การแยกออกของ Electron-hole pairs ดีขึ้นและอัตราการกลับไปรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล (recombination) ต่ำลง

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยการสลายตัวด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$), ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคซิลเวอร์ (Ag-$TiO_2$), ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยกราฟีนออกไซด์ ($TiO_2$/GO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคซิลเวอร์กับกราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงอัลตราไวโอเล็ต รวมถึงศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยซิลเวอร์ (Ag-$TiO_2$) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$, Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$ และ Ag-$TiO_2$/GO ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงยูวีซี
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-$TiO_2$ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส ขนาด50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บรรจุคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร
2. เตรียมแผ่นลวดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ที่ชุบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ได้แก่ ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$), กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO)
3. เตรียมก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
4. ต่ออุปกรณ์โดยต่อขวดรูปชมพู่บรรจุสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร เข้ากับคอลัมน์อะคริลิกที่บรรจุแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นต่อเข้ากับขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารดูดซึม (ประกอบด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตรและแอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร อัตราส่วน 1:1:1 ปริมาณ 200 มิลลิลิตร) จำนวน 3 ใบ เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ จากนั้นต่อเข้ากับขวดรูปชมพู่ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอน
5. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยผ่านอากาศเป็นเวลา 30 นาที ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาทีเข้าสู่ขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ที่ต่อเข้ากับคอลัมน์ที่มีแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาจำนวน 3 ชั้น ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์และรังสียูวีซี (254 นาโนเมตร) กำลัง 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ดังนี้
    - ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$)
    - ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) : 0.5%, 1% และ 2% สัดส่วนโมลของ Ag ต่อ Ti
    - กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) : 0.75% GO ต่อน้ำหนัก Ti
    - ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) : 0.09% weight ratio ของ Ag ต่อ $TiO_2$-GO
6. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศของตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์สัดส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแปรค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาผลกำไรทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบสารเร่งปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั้น
- กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 18, 36 และ 72 วัตต์
- อัตราการไหลของก๊าซที่ 200, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที

7. วิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 411 นาโนเมตร
8. วิเคราะห์สถิติโดยใช้โปรแกรม Minitap รุ่น 18 ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศภายใต้แสงที่ตามองเห็นได้
2. ลดอันตรายจากการใช้แสงยูวีซีในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
3. ช่วยลดมลพิษทางอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์ (จุฑารัตน์ และคณะ, 2555)

ปัจจุบันมนุษย์ใช้เวลาอยู่ภายในอาคารเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ โรงเรียน มหาวิทยาลัย ร้านค้า ที่พักอาศัย จึงมีโอกาสได้รับสัมผัสมลพิษภายในอาคาร (indoor air pollutants) ในรูปแบบของละอองไอและก๊าซผ่านทางการรับประทาน การสูดดม และการสัมผัสทางผิวหนัง ดังนั้น อากาศภายในอาคารจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อสุขภาพ ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นมลพิษทางอากาศที่พบได้ในอากาศภายในอาคาร ซึ่งฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ถึงแม้ว่าร่างกายจะสามารถขับออกไปเองได้ แต่ก็ยังคงมีการตกค้างและสะสมอยู่ในร่างกาย ปริมาณการตอบสนองความเป็นพิษ (TLV) ของฟอร์มาลดีไฮด์มีค่า 0.08 ppm ต่อ 30 นาที สัมผัสทางการหายใจ (สนาวุฒ, 2561) ฟอร์มาลดีไฮด์มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส ปกติมีกลิ่นฉุนแสบจมูก ระดับความเข้มข้น อยู่ที่ 0.5 ppm จะมีอาการการระคายเคืองที่ดวงตา อีกทั้งฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อสุขภาพในระยะยาว ได้แก่ โรคหอบ และโรคถุงลมปอด สารฟอร์มาลดีไฮด์ส่วนใหญ่ในที่พักอาศัยถูกปล่อยมาจากอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน ได้แก่ เฟอร์นิเจอร์ สีทาผนังบ้าน เป็นต้น

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมการผลิตหลายชนิด ในประเทศไทยมีการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์มาจากเมทานอล ซึ่งมีกระบวนการผลิต 2 แบบ ได้แก่

1. Silver Process ฟอร์มาลดีไฮด์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เมทานอลจากปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนเป็นฟอร์มาลดีไฮด์ได้ประมาณ 77-87%

2. Oxide Process เมทานอลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เหล็ก โมลิบดินัม-วานาเดียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเปลี่ยนเมทานอลเป็นฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุด ถึง 91-93%

อุตสาหกรรมประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เพื่อนำไปผลิตยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์สูงถึง 70% ของการผลิตทั้งหมด โดยยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์ตกแต่งในที่พักอาศัย เป็นต้น ในอุตสาหกรรมการแพทย์ ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค เชื้อรา ทำความสะอาดห้องคนป่วย และใช้เป็นส่วนผสมในการแช่ศพ ในอุตสาหกรรมความงาม ใช้ผสมในสีทาเล็บ ยาเคลือบเล็บ นอกจากนี้ ยังใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ พลาสติก สิ่งทอ ทำกาววิทยาศาสตร์ สีทาบ้าน น้ำยาเคลือบเงาไม้ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ

### 2.1.1 คุณสมบัติของฟอร์มาลดีไฮด์ (บังอร, 2558)

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่ไม่เสถียรเมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ การนำไปใช้ประโยชน์หรือการขนส่งจะทำให้อยู่ในรูปแบบของเหลว เรียกว่า ฟอร์มาลีน โดยทั้งสองสถานะมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1-2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.1** สมบัติทางกายภาพของฟอร์มาลดีไฮด์แลฟอร์มาลีน

| สมบัติของสาร | ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ | ฟอร์มาลีน |
|---|---|---|
| สภาพที่ปรากฏ | ไม่มีสี | ไม่มีสี |
| กลิ่น | กลิ่นฉุนรุนแรง | กลิ่นฉุนรุนแรง |
| น้ำหนักโมเลกุล | 30.03 | 30.03 |
| จุดเดือด | -19.5°C | 96 °C |
| จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง | ไม่มี | -92 °C |
| อุณหภูมิวิกฤต | 137.2-141.2°C | - |
| ค่าความเป็นกรด-ด่า (pH) | - | 208-4.0 อุณหภูมิ 20°C |
| ความหนาแน่นไอสัมพัทธ์ | 1.08 ที่อุณหภูมิ 20°C (อากาศ = 1) | 1.04 ที่อุณหภูมิ 20°C (น้ำ = 1) |
| Log $K_{ow}$ | 0.35 | 0.35 |
| ความดันไอ | 3,890 มม.ปรอท ที่อุณหภูมิ 25°C | 1.52 มม.ปรอท ที่อุณหภูมิ 25°C |
| ความสามารถในการละลาย | ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอออล์ อีเทอร์ อะซีโตน | ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอออล์ อีเทอร์ อะซีโตน |
| อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง | 424°C | 424°C |
| ขีดจำกัดการระเบิด | 7-73% โดยปริมาตร | 7-73% โดยปริมาตร |

(ที่มา: คู่มือการการจัดการสารเคมีอันตรายสูง ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ,2553)

**ตารางที่ 2.2** สมบัติทางเคมีของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์และฟอร์มาลีน

| สมบัติทางเคมี | ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ | ฟอร์มาลีน |
|---|---|---|
| การเกิดปฏิกิริยา | โพลีเมอไรเซชัน, ออกซิเดชัน แอดดิชัน | โพลีเมอไรเซชัน, ดีคอมโพสิชัน, รีดักชัน, ออกซิเดชัน, แอคซิชัน, คอนเดนเซชัน |
| สารที่ต้องหลีกเลี่ยง | Amines, AZO, compounds, Caustics, Dithiocarbamates, Alkaii&akali earth metals, Nitrides, Nitro, compounds, Unsaturated aliphatics and sulfides, Organic peroxides, Oxidizing agents, Reducing agents | |
| อันตรายจากการสลายตัว | สารอันตรายเมื่อเกิดจากการสลายตัว ถูกความร้อนสารจะสลายตัวเป็นกรดฟอร์มิก เมื่อถูกเผาไหม้จะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเกิดหมอกควันที่เป็นพิษ | |

(ที่มา: คู่มือการการจัดการสารเคมีอันตรายสูง ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ,2553)

**2.1.2 ประโยชน์ของฟอร์มาลดีไฮด์** (บังอร ฉางทรัพย์, 2558)

1) ด้านการแพทย์ นำไปใช้ในการคงสภาพมิให้ย่อยสลาย ใช้ในการเก็บรักษาศพ เก็บรักษาตัวอย่างเนื้อเยื่อทางกายวิภาค (anatomical specimens) เพื่อการนำไปวิเคราะห์และการวินิจฉัย ฆ่าเชื้อโรคในเครื่องมือต่าง ๆ

2) ด้านอุตสาหกรรม นำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตยูเรีย ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ พลาสติกพอลิอะซีทัลและเคมีภัณฑ์อื่น ๆ นอกจากนี้มีการนำไปเป็นสารฆ่าเชื้อ สารกันเสีย ยาฆ่าแมลง ตัวลดออกซิเจนในปฏิกิริยาอีกด้วย และยังมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุต่างๆ หลายชนิด เนื่องจากมีคุณสมบัติทำให้ผ้าและกระดาษแข็งเกาะกันเป็นอย่างดี จึงนำมาเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมในการทำพาติเกิลบอร์ด สารเคลือบไม้อัด และเฟอร์นิเจอร์ การทำถ้วยชาม ผ้าเบรกรถยนต์ ใบเลื่อย ใบเจีย ใบตัดทราย ทำแบบหล่อโลหะ และฉนวนกันความร้อน ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิคส์ อีกทั้งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ ใช้เป็นกาวสำหรับเฟอร์นิเจอร์ไม้ ใช้ในวัสดุก่อสร้าง ใช้ทำโฟม ใช้ในการผลิตเรซิน การสังเคราะห์สีต่าง ๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะครีลิก ใช้ในการย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่น ใช้ในการฟอกสี งานด้านการพิมพ์ การฟอกหนัง นำไปผสมโลหะเพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อรักษาผ้าไม่ให้ยับย่น ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้ ใช้ผสมในสีทาบ้าน วอลเปเปอร์ พลาสติก กาว ผ้าใยสังเคราะห์ น้ำยาเคลือบเงา ไม้สังเคราะห์ น้ำยาเคลือบเงาไม้ น้ำยาทำความสะอาด และกระดาษทิชชู เป็นต้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้รายงานปริมาณการใช้ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์มากที่สุดถึงร้อยละ 70 ของปริมาณการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ทั้งหมด

3) ด้านการเกษตร ใช้ในการผลิตสารที่ทำลายหรือป้องกันจุลินทรีย์ที่ทำให้ต้นไม้เป็นโรค ใช้ฆ่าเชื้อราในดิน ป้องกันผลผลิตทางการเกษตรจากความเสียหายระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา ทำความสะอาด

4) ด้านความงาม ใช้ในการผลิตเครื่องสำอางเพื่อไม่ให้เหงื่อออก ผสมในยาทาเล็บ ยาสีฟัน ยาบ้วนปาก สบู่ ครีมโกนหนวด น้ำยาดับกลิ่นตัว และการผลิตแชมพูของสัตว์เลี้ยง เป็นต้น ทั้งนี้การใช้ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะต้องใช้ในปริมาณที่ต่ำมาก โดยมีการศึกษาพบว่าสารนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแพ้

5) ด้านอื่นๆ ใช้ในการถ่ายภาพทำให้เก็บรักษาภาพได้นานขึ้น และวัสดุเพื่อการขนส่ง เป็นต้น

**2.1.3 อันตรายฟอร์มาลดีไฮด์** (บังอร, 2558)

การได้รับฟอร์มาลดีไฮด์จากการสัมผัสหรือการอยู่ในบรรยากาศที่มีไอของสาร จะทำให้เกิดอันตรายในระบบต่างๆของร่างกายได้แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการได้รับ ระยะเวลาในการสัมผัสหรือสูดดม และสภาพร่างกายของบุคคลในขณะนั้นอีกด้วย การสัมผัสสารนี้ไม่ว่าจะเป็นการหายใจ การกิน และการดูดซึมเข้าทางผิวหนังภายในร่างกาย จะทำให้เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าครึ่งชีวิตในร่างกายประมาณ 1.5 นาที โดยสารจะถูกขับออกจากร่างกาย ถึงแม้สารจะถูกขับออกไปอย่างรวดเร็วก็ยังมีบางส่วนยังคงสะสมอยู่ในร่างกาย โดยเปลี่ยนเป็นกรดฟอร์มิกซึ่งทำให้เกิดเป็นพิษต่อร่างกาย โดยทำให้เซลล์หรือเนื้อเยื่อของร่างกายทำให้เกิดพยาธิสภาพต่างๆ ขึ้นได้ เกิดผลกระทบต่อสุขภาพทั้งแบบเฉียบพลัน (acute) และแบบเรื้อรัง (chronic) ซึ่งองค์การนานาชาติเพื่อการวิจัยมะเร็ง International Agency for Research on Cancer หรือ IARC จัดให้สารนี้อยู่ในระดับ 1 (Class 1) ของการเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็ง

ผลกระทบฟอร์มาลดีไฮด์ มีดังนี้

1) อันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ในกรณีที่มีการสูดดมสารนี้ในปริมาณสูงและเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดระคายเคือง โดยเฉพาะการอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่เนื้อเยื่อในโพรงจมูก หลอดลม ท่อลม และถุงลมในปอดขึ้นได้ ในบางรายที่กรณีรุนแรงจะทำให้เกิดน้ำท่วมปอด (pneumonia) หายใจลำบาก แน่นหน้าอก จนถึงขั้นเสียชีวิตได้ หากได้รับในปริมาณมากจะระคายเคืองอย่างรุนแรงทำให้เกิดปอดอักเสบและหอบหืดได้ อย่างไรก็ตาม การได้รับสารในปริมาณน้อย ๆ อย่างสม่ำเสมอ อาจยังไม่เกิดอาการเด่นชัด มีเพียงการเจ็บ คอ ไอ จนถึงการอักเสบของหลอดลมเท่านั้น ทั้งนี้มีรายงานว่าถ้าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ร่างกายได้รับสูงเกิน 0.1 ppm จะทำให้

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

เกิดการระคายเคืองต่อตา จมูก และทาง เดินหายใจ แต่ถ้าได้รับสูงเกิน 100 ppm อาจทำให้หมดสติ และถึงกับเสียชีวิตได้

2) อันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร ผลกระทบจากการได้รับฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ มีการรวบรวมการศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าการได้รับสารฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร เช่น การรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนสาร โดยเฉพาะการรับประทานในปริมาณสูง จะทำให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงในระบบทางเดินอาหาร เช่น การปวดท้องอย่างรุนแรง อาเจียน ท้องเดิน หมดสติ เกิดแผลในกระเพาะอาหาร และทำให้เสียชีวิตได้ นอกจากนี้ การรับประทานในปริมาณน้อยๆ จะทำให้เกิดพิษต่อตับ ไต หัวใจ และระบบประสาท

3) อันตรายทางผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง ปวดแสบปวดร้อน เกิดผื่นแดง จนถึงผิวหนังไหม้ได้

4) อันตรายต่ออวัยวะอื่นๆ จากการได้รับฟอร์มาลดีไฮด์อย่างสม่ำเสมอ จะเกิดพิษต่อระบบประสาท พิษต่อเลือด พิษทางพันธุกรรม พิษต่อระบบสืบพันธุ์ และการเกิดมะเร็งในปอดและโพรงจมูก เป็นต้น

**2.1.4 การปฐมพยาบาลเบื้องต้นเมื่อสัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์** (จุฑารัตน์ และคณะ, 2555)

1) การสัมผัสทางผิวหนัง ให้รีบล้างออกทันทีด้วยน้ำสะอาดปริมาณมาก โดยรินน้ำผ่านอย่างน้อย 15 นาที เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นควรล้างด้วยน้ำยาแอมโมเนียความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร หากเปื้อนร่างกายในปริมาณมากให้รีบอาบน้ำด้วยน้ำสบู่

2) การสัมผัสถูกดวงตา ให้ล้างตาด้วยน้ำสะอาดโดยใช้น้ำสะอาดไหลผ่านดวงตาอย่างน้อย 15 นาที หากยังมีอาการระคายเคืองอยู่ให้นำผู้ป่วยไปพบแพทย์

3) การสูดดมผ่านทางเดินหายใจ ให้รีบเคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกมายังสถานที่อากาศบริสุทธิ์ และให้ผู้ป่วยสูดไอน้ำจากน้ำที่เติมแอมโมเนีย สำหรับสูดดมลงไป 2-3 หยด ถ้ามีอาการรุนแรงให้ช่วยผายปอดและปั๊มหัวใจแล้วรีบนำผู้ป่วยส่งแพทย์

4) การรับประทาน หากกลืนหรือกินฟอร์มาลินเข้าไป ถ้าผู้ป่วยยังมีสติอยู่ให้ดื่มน้ำตามเข้าไปปริมาณมากๆ หรือให้ดื่มน้ำนมตามเข้าไป หรือให้ activated charcoal เข้าไป พร้อมกับล้างบริเวณปากผู้ป่วย และให้บ้วนปากด้วยน้ำ รีบนำผู้ป่วยส่งแพทย์โดยเร็วที่สุด

**2.1.5 วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์** (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

การจัดการของเสียจากฟอร์มาลีนต้องดำเนินการอย่างถูกต้องเป็นไปตามหลักการและกฎหมายกำหนด โดยของเสียจากฟอร์มาลดีไฮด์จากการผลิต การจัดเก็บ การขนย้าย การขนถ่าย และการขนส่ง จึงจำเป็นต้องจัดการอย่างเหมาะสม

1) การกำจัดของเสียที่เป็นก๊าซจากกระบวนการผลิต ไอของสารจากถังเก็บถูกดักจับด้วยระบบไอที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางจับ (Wet scrubber) ทำให้เกิดน้ำที่ปนเปื้อน ซึ่งต้องนำเข้าบำบัด หากมีฟอร์มาลีนปนเปื้อนสูง อาจนำมากลั่นแยกและกลับมาใช้ได้ใหม่ แต่หากมีน้อยสามารถนำไปบำบัดได้ต่อไป

2) การกำจัดของเสียที่เป็นของแหลวจากกระบวนการผลิต ของเสียฟอร์มาลีนที่มีพาราฟอร์มาลดีไฮด์หรือสารเคมีอื่นผสมอยู่มาก เนื่องจากการผลิตและไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้ หากมีอุปกรณ์ในการกำจัด เช่น เตาเผาสามารถกำจัดโดยการผสมกับตัวทำละลายที่ไวไฟ และฉีดสารละลายเป็นฝอยเข้าไปในเตาเผากากของเสียอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม และไม่

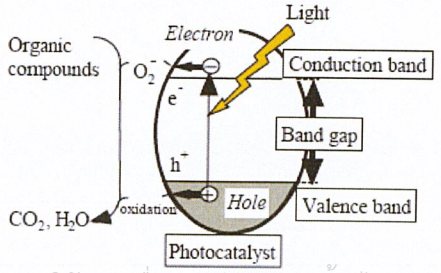
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรกำจัดฟอร์มาลีนที่ความเข้มข้นสูงด้วยการออกซิไดซ์ เพราะอาจเกิดปฏิกิริยารุนแรง ต้องทำให้เจือจางมากๆก่อน และต้องทำด้วยความระมัดระวังหากไม่มีอุปกรณ์การกำจัดใดๆ ให้ส่งให้ผู้กำจัดที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

3) การกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งจากกระบวนการผลิต ควรกำจัดพาราฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (ประมาณ 800°C) ไม่ควรฝังกลบเพราะสลายตัวได้ยากและมีโอกาสปนเปื้อนน้ำใต้ดิน หากสถานที่และวิธีการฝังกลบไม่ได้มาตรฐาน

## 2.2 หลักการทำงานของโฟโตคะตะไลซิส (เกรียงไกร และคณะ, 2558)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสสารให้เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่เกี่ยวข้องกับตัวคะตะลิสต์ แต่การฉายแสงอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดยูวีไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และประจุลบของซุปเปอร์ออกไซด์ (superoxide anions) ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์ จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่างๆ และสารก่อมะเร็ง เช่น acetaldehyde, benzene, formaldehyde โดยสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งมีความกว้าง Eg กั้นอยู่ (รูปที่ 2.1) กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในเฟสของเหลว (aqueous phase) คือ กระบวนการการโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (photo) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน Eg ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h+vb ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า แทนด้วยสัญลักษณ์ e–cb ซึ่ง h+vb และ e–cb สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมอีกได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันและที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในสารละลาย เรียกว่า รีดักชัน (reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (strong oxidation)




**รูปที่ 2.1** กลไกของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (เกรียงไกร ทองลิ่ม, 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่**

**2.2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)** (สุพิน, 2550)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) หรือ ไททาเนีย (Titania) มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $TiO_2$ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีมวลโมเลกุล 79.9 g/mol จุดเดือด 2,972 °C และจุดหลอมเหลว 1,870 °C ลักษณะโครงสร้างผลึกมี 3 รูปแบบคือ 1) โครงสร้างแบบอนาเทส (ก) 2) โครงสร้างแบบรูไทล์ (ข) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลเหมือนกันประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ออกตะฮีดรอล ($TiO_6^{2-}$) ที่ช่องว่างของออกตะฮีดรอลของออกไซด์ไอออนจะมีไอออน $TiO^{4+}$ อยู่ แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสและรูไทล์จะมีการเชื่อมกันของไทเทเนียมกับออกซิเจนที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้มีผลต่อการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล ซึ่งรูไทล์มีการเชื่อมเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล ส่วนโครงสร้างแบบอนาเทสเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล และ 3) โครงสร้างแบบบรูคไคท์ (ค) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิคเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล ดังแสดงในรูปที่ 2.2



(ก) (ข) (ค)

**รูปที่ 2.2** โครงสร้างแบบต่างๆของไทเทเนียมไดออกไซด์
(ก) แบบอนาเทส (ข) แบบรูไทล์ (ค) แบบบรูคไคท์
(ที่มา: siamcami/ไททาเนียมไดออกไซด์/$TiO_2$ และประโยชน์ไททาเนียมไดออกไซด์, 2559)

**ตารางที่ 2.3** คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

| $TiO_2$ | Anatase | Rutile | Brookite |
|---|---|---|---|
| จำนวนอะตอม | 2 | 4 | 8 |
| โครงสร้างผลึก | Tetragonal | Tetragonal | Orthorhombic |
| ความหนาแน่น ($g/cm^3$) | 4.2743 | 3.895 | 4.123 |
| a (Å) | 3.7842 | 4.5937 | 9.184 |
| b (Å) | 3.7842 | 4.5937 | 5.447 |
| c (Å) | 9.5146 | 2.9581 | 5.145 |
| Band gap (eV) | ~3.2 | ~3.0 | ~3.3 |

(ที่มา: siamcami/ไททาเนียมไดออกไซด์/$TiO_2$ และประโยชน์ไททาเนียมไดออกไซด์, 2559)

ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติมากที่สุด มีความคงทน และที่มีความเสถียรสูงที่สุด ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบบรุคไคท์ หากได้รับความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ ส่วนโครงสร้างแบบอนาเทสนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.3

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการบำบัดน้ำ อากาศ และก๊าซพิษ เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและมีประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ จึงนิยมมาประยุกต์ใช้สลายมลพิษและผลิตภัณฑ์การทำความสะอาดด้วยตนเองซึ่งนำไปใช้ในการเคลือบสิ่งก่อสร้าง กระจกอาคารหรือรถยนต์

**2.2.2 ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์**

ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเจือสารกลุ่มโลหะ $TiO_2$-Ag มีผลต่อพื้นที่ผิวของ Ag-Ti ช่วยลดช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (Band gap energy) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ถูกกระตุ้นและกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ (Conduction band) ได้ง่ายขึ้น และทำให้วัสดุ Ag-Ti มีการดูดกลืนแสงภายใต้แสงที่ตามองเห็นเพิ่มขึ้น

**2.2.3 กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์**

การสังเคราะห์ $TiO_2$ / GO nanocomposites เป็นการพัฒนาเรื่องการประยุกต์ใช้โฟโต-คะตะไลติกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มีความจำเพาะสูง จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซึม $TiO_2$/graphene nanocomposites พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเกิดการ Red- shift แสดงให้เห็นว่าช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (band gap) ของวัสดุคอมโพสิตจะแคบลงและช่วงการดูดกลืนแสงจะกว้างขึ้น อีกทั้งการเติมกราฟีนจะช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล โดยปริมาณกราฟีนที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนและลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในแสงอาทิตย์ได้ดีขึ้น

**2.2.4 ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์-กราฟีนออกไซด์**

Ag-$TiO_2$/GO nanocomposites เป็นการสังเคราะห์เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโฟโต-คะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ การผสม Ag และ GO จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีความจำเพาะสูง จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น ช่วยลดช่องว่างระหว่างชั้นพลังงาน (band gap energy) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) ถูกกระตุ้นและกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบการนำ (conduction band) ได้ง่ายขึ้น และมีการดูดกลืนได้ดีทั้งภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี

## 2.3 แสง (อัญชลี และคณะ, 2560)

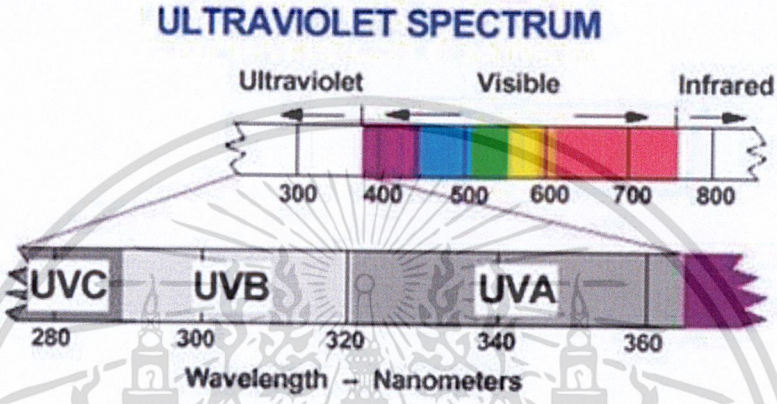
แสงคือพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากอะตอม เป็นกลุ่มก้อนของพลังงานที่มีโมเมนตัม แต่ไม่มีมวลอนุภาคเหล่านี้เรียกว่า โฟตอน นั่นคือ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบหมุนอยู่รอบนิวเคลียสที่มีประจุเป็นบวกมีอยู่หลายตัว แต่ละตัวอยู่ในวงโคจรที่แตกต่างกัน พลังงานวัดได้จากระยะห่างจากนิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานในแต่ละระดับที่แตกต่างกัน นั่นคือ อิเล็กตรอนที่มีวงโคจรจากนิวเคลียสมีพลังงานมากกว่าวงโคจรใกล้นิวเคลียส เมื่ออะตอมได้รับพลังงานจากภายนอก อิเล็กตรอนวงโคจรต่ำจะถูกกระตุ้นเปลี่ยนไปอยู่ในวงโคจรสูงซึ่งไม่เสถียร ดังนั้น อิเล็กตรอนจะหมุนอยู่ในวงโคจรนี้ชั่วคราวและตกลงสู่วงโคจรเดิม ปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนซึ่งก็คือแสงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.1 รังสีอัลตราไวโอเลต** (อัญชลี และคณะ, 2560)

รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation) หรือรังสียูวี (UV) คือรังสีชนิดหนึ่งที่แผ่กระจายจากดวงอาทิตย์ มีช่วงความถี่ระหว่าง 240-400 นาโนเมตร มีพลังงานสูง ไม่สามารถมองเห็นได้ มนุษย์ใช้ประโยชน์จากรังสียูวีได้หลายทาง เช่น ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

รังสียูวี แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ยูวีเอ (UVA) มีความยาวคลื่นระหว่าง 315-400 นาโนเมตร, ยูวีบี (UVB) มีความยาวคลื่นระหว่าง 280-315 นาโนเมตร และยูวีซี (UVC) มีความยาวคลื่นระหว่าง 200-280 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่รังสียูวีซีถูกโอโซนในสตาร์โตสเฟียร์กรองเอาไว้ เหลือไว้เพียงยูวีเอและยูวีบีเท่านั้นที่ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่พื้นผิวของโลกได้




**รูปที่ 2.3** ช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวีแต่ละชนิด
(ที่มา: simchemi รังสีอัลตราไวโอเลต/รังสียูวี (UV) และอันตรายจากรังสียูวี, 2559)

**1) แหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเลต**

1.1 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation) ถือเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของการแผ่รังสีที่ส่องมาถึงโลก โดยประกอบด้วยรังสียูวีซี ยูวีบี และยูวีเอ รวมถึงช่วงคลื่นที่มนุษย์มองเห็น และรังสีอินฟาเรด แต่รังสีบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ในชั้นบรรยากาศ ที่เหลือสามารถส่องมาถึงผิวโลกในระดับไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

1.2 แหล่งที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial sources) ได้แก่ วัตถุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อน จนมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 2,500 เคลวิน สามารถปล่อยรังสีอัลตราไวโอเลตได้ ซึ่งเป็นวัตถุ อุปกรณ์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ทางการแพทย์ ทางการเกษตร เป็นต้น

**2) อันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเลต/รังสียูวี**

2.1 ผิวหนัง รังสียูวี (UV) มีอันตรายมากต่อผิวหนัง สามารถทำให้เกิดรอยไหม้ (sunburn) และความผิดปกติของสารพันธุกรรม นอกจากนี้ ยังก่อให้เกิดกระบวนการลิปิดเพอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) และการอักเสบเฉียบพลัน รวมถึงการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่ออันเกิดจากการเกิดอนุมูลอิสระของรังสียูวี มีการศึกษาผลกระทบรังสียูวีต่อสัตว์น้ำ สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ พบว่า รังสียูวีบีมีผลต่อการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันในปลา และมีผลกระทบรุนแรงต่อเยื่อบุผิวบริเวณเหงือกปลา ทำให้เนื้อเยื่อบุผิวหลุดลอกจนเหงือกปลาหดสั้น ในส่วนของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ พบว่า รังสียูวีบีมีผลทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอ่อนในระยะฟักตัวมีความผิดปกติ อัตราการเติบโตลดลง และเกิดความผิดปกติของผิวหนัง รวมถึงระบบภูมิคุ้มกัน

2.2 ตา เมื่อได้รับยูวีมากขึ้นทำให้เยื่อบุตาเกิดอาการระคายเคือง ตาแดง แสบตา น้ำตาไหล อาจเกิดเป็นต้อเนื้อ ต้อลม หากเราได้รับแสงยูวีต่อเนื่องเป็นระยะเวลาที่ยาวนานจะเสี่ยงต่อการเป็นโรคจอตาเสื่อม หรืออาจจำให้เกิดโรคตาเรื้อรัง มะเร็งที่ผิวรอบดวงตา

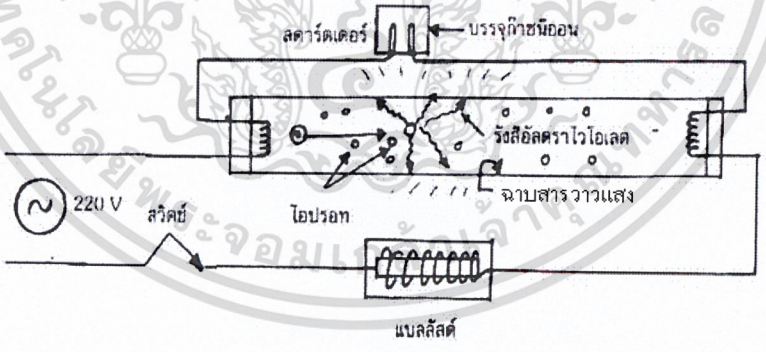
**3) แนวทางการป้องกันรังสียูวี**

3.1 การปกป้องผิวจากรังสียูวี ทำได้เบื้องต้นคือการทาผิวด้วยครีมผสมสารป้องกันยูวีหรือครีมกันแดด

3.2 การป้องกันดวงตาจากรังสียูวีที่สามารถทำได้เบื้องต้น เช่น การใส่แว่นกันแดดที่ประกอบด้วนเลนส์ที่มีคุณสมบัติดูดซับหรือสะท้อนรังสียูวีอย่างน้อย 99-100%

**2.3.2 แสงฟลูออเรสเซนต์** (เคมีครัวเรือน, 2560)

หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent) หรือเรียกว่าหลอดเรืองแสง เป็นหลอดแก้วทรงกระบอกมีหลายแบบ เช่น หลอดยาว วงกลม เกือกม้า ภายในหลอดสูบอากาศออกจนหมดแล้วบรรจุปรอทไว้เพียงเล็กน้อย ที่ผิวด้านในของหลอดแก้วจะฉาบด้วยสารเรืองแสง และที่ปลายหัวและท้ายของหลอดมีไส้หลอดทำด้วยโลหะทังสเตนหรือวุลแฟรมขดเป็นเส้นเล็กๆ ซึ่งมีความต้านทานกระแสไฟฟ้าสูงมาก (รูปที่ 2.4) สารเรืองแสงมีหน้าที่ดูดกลืนรังสีอัตราไวโอเลตไว้และจะคายพลังงานของรังสีอัตราไวโอเลตออกมา พลังงานที่คายออกมาอยู่ในรูปของพลังงานแสง ซึ่งตาของมนุษย์มองเห็นในรูปของแสงสว่าง ซึ่งสารเรืองแสง (fluorescent coating) ที่ใช้มีหลายชนิด เช่น ฟอสฟอร์จะให้แสงสีธรรมชาติ (สีขาวแกมเหลืองอ่อนๆ), แมกนีเซียมทังสแตนจะให้สีธรรมชาติ (สีขาวแกมฟ้าอ่อนๆ), ซิงค์ซิลิเกตจะให้แสงสีเขียว, แคดเมียมซิลิเกตจะให้แสงสีชมพูอ่อน และแคลเซียมทังสเตนจะให้แสงสีน้ำเงิน




**รูปที่ 2.4** ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์
(ที่มา: หลอดเรืองแสงและหลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์, 2559)

1) หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เมื่อกดสวิตช์วงจรไฟฟ้าของวงจรหลอดเรืองแสง กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไส้หลอดทังสเตนที่มีความต้านทานไฟสูงมากๆ พลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน จึงทำให้ไส้หลอดมีความร้อนสูงทำให้ปรอทที่บรรจุไว้ในหลอดกลายเป็นไอ จากนั้นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังสตาร์ทเตอร์ที่ภายในเป็นแผ่นโลหะคู่ที่แยกกันและมีก๊าซนีออนบรรจุอยู่ ซึ่งก๊าซนีออนจะติดไฟหรือมีประกายไฟเกิดขึ้น มีผลทำให้แผ่นโลหะคู่ร้อนและงอโค้งมาแตะกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหล

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

ผ่านแผ่นโลหะคู่ไปยังไส้หลอดอีกด้านหนึ่งได้และคายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ไส้หลอด จึงทำให้เกิดความร้อนที่ไส้หลอดมากขึ้นและปรอทกลายเป็นไอมากขึ้นจนเพียงพอที่จะนำไฟฟ้าได้ ในเวลาเดียวกันกระแสไฟฟ้าก็ไหลไปยังแบลคลัสต์ ซึ่งภายในเป็นขดลวดทองแดงที่พันอยู่รอบแกนเหล็ก ขณะกระแสไฟฟ้าผ่านจะเกิดแม่เหล็กไฟฟ้าและมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างไส้หลอดสองข้างสูงมากพอที่ทำให้กระแสไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านจากไส้หลอดหนึ่งไปยังไส้หลอดอีกด้านหนึ่งได้โดยไม่ต้องผ่านสตาร์ทเตอร์ ขณะที่อิเล็กตรอนวิ่งไปจะชนกับอะตอมของไอปรอท เรียกว่า ภาวะถูกกระตุ้น (excited state) ทำให้อะตอมของของไอปรอทเกิดการสูญเสียระดับชั้นพลังงาน พลังงานที่สูญเสียออกมาจะอยู่ในรูปของรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) สารเรืองแสงที่ฉาบไว้ที่ผิวด้านในของหลอดเรืองแสงก็จะดูดกลืนรังสีอัตราไวโอเลตไว้และจะคายพลังงานที่สารเรืองแสงคายออกมาจะอยู่ในรูปของพลังงานแสงซึ่งตาของมนุษย์มองเห็น เมื่อหลอดเรืองแสงติดแล้ว แบลคลัสต์จะทำหน้าที่ลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงให้คงที่ ให้เหลือ 220โวลต์ หลอดเรืองจะเปล่งแสงสว่างตลอดไป

2) ข้อดีและข้อเสียของหลอดเรืองแสง

2.1 ข้อดีของหลอดเรืองแสง อายุการใช้งานนาน ราคาต่ำ มีค่าดัชนีเทียบสีค่อนข้างสูง มีหลากหลายสีให้เลือกสามารถหรี่แสงได้ หลอดไม่ร้อน ทำให้อากาศโดยรอบไม่ร้อน ส่องแสงแบบกระจายแสงไม่จ้าเกินไปและไม่เป็นอันตราย

2.2 ข้อเสียของหลอดเรืองแสง ประสิทธิภาพการดำเนิดแสงยังไม่สูงมากนัก ใช้เวลา 2-3 นาที หลอดจึงจะติด ยกเว้นหลอดชนิดติดเร็ว ต้องใช้สตาร์ทเตอร์ และบัลลาสท์ ต่อพ่วงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ติดตั้งมีน้ำหนักมาก โดยเฉพาะหลอดที่ใช้บัลลาสท์ และควบคุมทิศทางแสงได้ยาก

3) อันตรายจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

3.1 สารปรอท สารปรอทมีพิษร้ายแรงต่อระบบประสาท โดยเฉพาะกับเด็กและคนท้อง พิษจะเข้าไปทำลายสมอง ระบบประสาท ตับ ไต แล้วยังทำให้หลอดเลือดหัวใจ ระบบภูมิคุ้มกัน และระบบสืบพันธุ์มีปัญหา ส่งผลให้รู้สึกเครียด ปวดหัว ตัวสั่น นอนไม่หลับ ความจำเสื่อม อาจถึงขั้นเป็นอัลไซเมอร์

3.2 สารก่อมะเร็ง งานวิจัยชิ้นใหม่จากแล็บวิจัย ALAB เบอร์ลิน รายงานว่า หลอดประหยัดไฟมีส่วนประกอบที่เป็นสารก่อมะเร็งหลายตัว

- ฟีนอล (phenol) – ผลึกสีขาวที่ได้จากน้ำมันดิน มีฤทธิ์กรดอ่อน มักใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายประเภท เช่น ยา น้ำยาทำความสะอาด ยากำจัดศัตรูพืช สีย้อม

- แนฟทาลีน (Naphthalene) – สารประกอบสีขาวที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ มีกลิ่นฉุน ระเหิดได้ ใช้ทำลูกเหม็นและเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี เช่น สี กระดาษสำเนา

- สไตริน (Styrene) – สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เป็นสารตั้งต้นใช้ทำกล่องโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**เกรียงไกรและคณะ (2558)** พัฒนาและศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์($TiO_2$) และซิลเวอร์ (Ag) เคลือบบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ที่มีค่าการกรองแสงแตกต่างกันในการสลายสีเมทิลลีนบลู ฟิล์มซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยมีไทเทเนียมบิวทอกไซด์ และซิลเวอร์ไนเทรตเป็นสารตั้งต้นในสัดส่วน Ag : Ti เท่ากับ 1 :10 โดยโมล จากนั้นเคลือบบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ด้วยวิธีการหมุนเคลือบ พบว่าผลึกที่ได้เป็นแบบอะนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็นได้มากขึ้น ผลึกซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาด 20-60 nm ซึ่งใหญ่กว่าผลึกของไทเทเนียมขนาด 10-30 nm และประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลลีนบลูบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ที่มีค่าการกรองแสงร้อยละ 40 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้สูงสุด 61.68 และ 53.97 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

**เจษฎากรณ์ และคณะ (2560)** ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้หลอดยูวีซี (254 นาโนเมตร) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน) 18 วัตต์จำนวน 4 หลอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการทดลองในตู้ปฏิกรณ์ขนาด 50x45x80 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่บรรจุคอลัมน์ขนาด 6x6x26.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่มีลวดสแตนเลสเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ศึกษาสัดส่วนของ Ag: TIO ที่เหมาะสมในการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์โดยแปรค่าที่ 0:1 ,1:5, 1:10, 1:15, 1:20, 1:25 และ 1:30 โดยน้ำหนัก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าสัดส่วน Ag: TIO ที่เหมาะสมที่ได้ไปศึกษาการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 31.53 เปอร์เซ็นต์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านเข้าไปในคอลัมน์เป็นเวลา 10 นาที ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือด้วยสารดูดซึม จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TIO มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลีนบลูดีกว่าการใช้ $TiO_2$ เพียงอย่างเดียวทั้งภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลีนบลูของ Ag-TIO ภายใต้รังสียูวีซีสูงกว่าภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ สัดส่วนระหว่าง Ag:$TiO_2$ ที่เหมาะสมในการกำจัดเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีซี คือ 1: 20 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดได้ 44.77±42.52 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนระหว่าง Ag:$TiO_2$ ที่เหมาะสมในการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ คือ 1:15 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดได้ 33.461±73 เปอร์เซนต์ จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศพบว่า การใช้แผ่นลวดชุบ $TiO_2$ ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์สามารถกำจัดได้ 61.03±5.39 และ 27.20±1.81 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ และการใช้แผ่นลวดเคลือบ Ag-$TiO_2$ (1: 15) ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์สามารถกำจัดได้ 66.43±3.29 และ 68.33±1.15 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

**วรดา (2560)** ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) ที่มีขั้วโฟโตแอโนดเตรียมจากวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่าง $TiO_2$ และกราฟีน (Graphene nanoplatelets) โดยเลือกใช้กราฟีนสองชนิด (GNPs grade 3, TNGNPs และ XGnP® grade M) ในปริมาณที่แตกต่างกัน (0, 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7%) มาผสมกับ $TiO_2$ ท้างการค้า (P25) การเตรียมฟิล์ม

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

คอมโพสิตจะใช้เอทิลเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค Doctor blade จากนั้น จะทำการเผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 60 นาที การพิสูจน์เอกลักษณ์ของคอมโพสิต $TiO_2$/เกล็ดกราฟีน จะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy FTIR PL SEM และ XRD จากผลการทดลองพบว่ากราฟีนที่เหมาะสมสำหรับขั้วโฟโตแอโนดคือ ชนิด TNGNPs โดยจะให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุด โดยสูงกว่าขั้วโฟโตแอโนด $TiO_2$ ถึง 3.6 เท่า ภายใต้การฉายรังสีแสงอาทิตย์จำลองที่ความเข้ม 100 mW/cm$^2$ เนื่องจากกราฟีนจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมไวแสง เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟีนชนิด GNPs grade 3 พบว่าจะมีจำนวนชั้น graphene ที่น้อยกว่า มีความสมบูรณ์ของผลึกที่มากกว่า และมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่มากกว่า

**Bagheri *et al.* (2016)** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสียูวีและเฟอเรท (VI) กับการใช้ UV/เฟอเรท (VI)ร่วมกัน เพื่อกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ออกจากอากาศและน้ำ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบ เช่น pH, ความเข้มข้นของเฟอเรท (VI) และอุณหภูมิในการกำจัดฟอร์ดีไฮด์ ผลการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรดเริ่มต้นของเฟอเรท (VI) ที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ฟอร์มาลดีไฮด์ที่ดีที่สุด คือพีเอช 2 แบะ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส ช่วยกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์จาก 69 เป็น 97 เปอร์เซ็น ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด และการใช้รังสีและ เฟอเรท (VI) ร่วมกันภายใน 35 นาที จากการใช้เครื่องฟอกด้วยก๊าซที่อัตราการไหลของของเหลวอัตราส่วน 1.28 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุด 94 เปอร์เซ็นต์

**Chaval *et al.* (2018)** ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) ที่ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา reduced graphene oxide (rGO) การเตรียม $TiO_2$-rGO เตรียมได้ง่ายโดยผ่านการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ละลายในกรดในปริมาณที่ rGO ที่แตกต่างกัน (0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 wt%) ในขณะที่ลักษณะของ rGO ใน nanocomposites $TiO_2$-rGO นั้นสามารถยืนยันโดย Raman spectroscopy ผลการทดสอบ TEM พบว่าอนุภาคนาโน $TiO_2$ นั้นถูกรวมเข้ากับ rGO - nanosheets อย่างดี นอกจากนี้ ยังมีปฏิกิริยาของโฟโตคะตาไลติกของตัวอย่างโฟโตคะตะลิสต์ของ $TiO_2$-rGO ทั้งหมดโดยการกำจัดสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) ด้วยแสง ภายใต้การฉายรังสีจากแสงแดดธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่า nanocatalyst $TiO_2$-rGO ทั้งหมดแสดงปฏิกิริยาที่สูงกว่า $TiO_2$ ที่ไม่ผสมกับ rGO ปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกที่พัฒนาแล้วนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากการมีอยู่ของ rGO nanosheets ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนลดลง ($e^-$), ($h^+$) การรวมตัวกันใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ เพิ่มอัตราการถ่ายโอนประจุของอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาโฟโตคะตาไลติก

**Jin *et al.* (2011)** ศึกษาการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นสารมลพิษในอากาศโดย Nano-structured $TiO_2$, Ag-$TiO_2$ และ Ce-$TiO_2$ ถูกเตรียมโดยวิธี Sol gel ที่อุณหภูมิห้องและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Photocatalyst โดยศึกษาผลของการเติม Ag/Ce/$TiO_2$ ความสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของออกซิเจน ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น ความยาวคลื่นยูวี ปริมาณ $TiO_2$ ในการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติม Ag หรือ Ce ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกได้ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโคคะตะไลติกภายใต้สภาวะการทดลอง อัตราการสลายตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้นข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์และใช้ความสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงขนาด 254 นาโนเมตรดีกว่า 365 นาโนเมตร ประสิทธิภาพในการสลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่ำกว่า 70 มิลลิกรัม ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของ $TiO_2$, Ag-$TiO_2$ และ Ce-$TiO_2$ เรียงลำดับได้คือ ค่า k ของ Ce/ $TiO_2$ > ค่า k ของ Ag-$TiO_2$ > ค่า k ของ $TiO_2$ สรุปได้ว่า Ce/ $TiO_2$ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกดีที่สุดในตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด

**Lua *et al* (2015)** ทดลองใช้แผ่นฟิมล์ที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกขึ้น เพื่อกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยแผ่นฟิมล์ที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของถ่ายกัมมันต์ภายใต้รังสี UV 365 นาโนเมตร, UV 254 นาโนเมตร และ UV 254+185 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้รับผลพลอยได้เป็นโอโซน ในขณะเดียวกันนั้นโอโซนยังสามารถส่งผลต่อการสลายของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ได้โดยตรง ซึ่งโอโซนที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้น มีค่าต่ำกว่า 0.214 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นไปตามกำหนดของมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารของประเทศจีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# วิธีการดำเนินงานวิจัย

## 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

### 3.1.1 วัสดุหรืออุปกรณ์

1. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UH5300, บริษัท Hitachi, ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่อง X-ray Diffractrometer รุ่น D8 Advance, ยี่ห้อ Bruker AXS, ประเทศเยอรมนี
3. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer รุ่น Nicolet 6700, ยี่ห้อ Thermo Scientific, ประเทศเยอรมนี
4. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer รุ่น SRS 3400, ยี่ห้อ Bruker AXS, ประเทศเยอรมนี
5. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น Leo 1455 VP, ยี่ห้อ Leo, ประเทศเยอรมนี
6. เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) รุ่น XZ-6G, ยี่ห้อ Benchtop Centrifuge, ประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องวัดอัตราการไหล (High Flow) รุ่น Defender 520-H บริษัท Bios International Corp., ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น Metter Toledo, บริษัท Metter Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
9. เครื่องพ่นอากาศ รุ่น Millipore, บริษัท Billerica, ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เครื่องปั่นกวน รุ่น Stuart, บริษัท Cole-Parmer Scientific Experts, ประเทศสหรัฐอเมริกา
11. Hot Plate รุ่น MR Hai-Tec, บริษัท Beacthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd., ประเทศไทย
12. เครื่อง Ultrasonic
13. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน (Magnetic bar)
14. ไมโครปิเปต ขนาด 100-1,000 ไมโครลิตร รุ่น Pipet-Lite XLS+ บริษัท Metter Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
15. ตู้อบ รุ่น Isotermp Oven, บริษัท ทีอีควิปเมนท์ จำกัด, ประเทศสหรัฐอเมริกา
16. ตู้ปฏิกรณ์ ขนาด 50x45x80 ลูกบาศก์เซนติเมตร
17. คอลัมน์อะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ขนาดความสูง 50 เซนติเมตร
18. แผ่นลวดสแตนเลส บริษัท เจริญวิทย์ เทรดดิ้ง จำกัด, ประเทศไทย
19. หลอดยูวีซี รุ่น T8 18W, บริษัท Narwarm ประเทศอินเดีย
20. หลอดฟลูออเรสเซนต์ รุ่น TL-D 18W, บริษัท Philips, ประเทศเนเธอร์แลนด์
21. โถดูดความชื้น (Dessicator)
22. สายยาง Tygon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. กระดาษทรายอะลูมิเนียม
24. ฟอยล์
25. พาราฟิน
26. เครื่องแก้วต่างๆ

**3.1.2 สารเคมี**

1. สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde solution, $CH_2O$) ความเข้มข้น 36.5-38 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
2. กรดซัลฟิวริก (Conc. Sulphuric acid, $H_2SO_4$) ความเข้มข้น 96 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้น 37 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba, ประเทศอังกฤษ
4. กรดอะซิติก (Acetic acid, $CH_3COOH$) ความเข้มข้น 99.85 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์ บริษัท Duksan Pure Chemical, ประเทศเกาหลี
5. แอมโมเนียมแอซิเตต (Ammonium acetate, $CH_3COONH_4$) ความเข้มข้น 98 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์, บริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals, ประเทศอินเดีย
6. สารละลายแอซิติลแอซิโตน (Acetyl acetone solution, $C_5H_8O_2$) ความเข้มข้น 99.5 เปอร์เซนต์, เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
7. โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate, $NaNO_3$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba, Reagents, ประเทศอิตาลี
8. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate, $KMnO_4$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, $H_2O_2$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
10. ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate, $AgNO_3$) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
11. เอทานอล (Ethanol, $C_2H_6O$) ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์, เกรดการค้า, องค์การสุรากรมสรรพสามิต, ประเทศไทย
12. ผงผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Degussa P25 (Titanium dioxide, $TiO_2$) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เจ๊บเซ่น แอนด์ เจ๊สเซ่น อินกรีเดียนส์ (ที) จำกัด
13. ผงแกรไฟต์ (Graphite) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Aldrich Chemistry, ประเทศสหรัฐอเมริกา
14. แอคทิเวเตทคาร์บอน (Activated carbon)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์

#### 3.2.1.1 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลส

1. นำแผ่นลวดสแตนเลสวงกลมตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แล้วขัดด้วยกระดาษทรายเพื่อให้ผิวหยาบ
2. นำแผ่นลวดสแตนเลสที่ได้จากข้อ 1 แช่เอทานอล เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปแช่น้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำความสะอาด
3. วางแผ่นลวดลงบนถาดอลูมิเนียม นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

#### 3.2.1.2 การเตรียมกราฟีนออกไซด์

วิธีเตรียมกราฟีนออกไซด์ใช้วิธีของ Chaval *et al.* (2018)

1. ชั่งผงแกรไฟต์ 4 กรัม และโซเดียมไนเตรต 2 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผสมให้เข้ากัน และเทลงในขวดก้นกลมที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็งในตู้ดูดควัน
2. ค่อยๆ เทกรดไฮโดรคลอลิกเข้มข้น 37 % ปริมาณ 92 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมที่บรรจุผงแกรไฟต์และโซเดียมไนเตรตผสมอยู่ ควบคุมอุณภูมิโดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง แล้วกวนผสมช้าๆ ด้วยเครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 15 นาที
3. จากนั้นค่อย ๆ เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 12 กรัม ลงไปในสารละลายข้อ 2 และย้ายขวดก้นกลมไปที่อ่างน้ำอุ่นควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส แล้วปั่นกวนช้าๆ ต่ออีก 30 นาที
4. ย้ายขวดก้นกลมในข้อ 3 ไปอ่างน้ำแข็งแล้วค่อย ๆ เติมน้ำกลั่น 180 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม
5. ย้ายขวดก้นกลมในข้อ 4 ไปอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส ปั่นกวนช้าๆ เป็น เวลา 90 นาที
6. เติมน้ำกลั่นลงไปในขวดก้นกลมในข้อ 5 ปริมาณ 400 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อ 15 นาที แล้วค่อยๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นปั่นกวนช้าๆ ต่ออีก 5 นาที
7. ค่อยๆ เติมไฮโดรคลอลิก 10% โดยปริมาตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลมในข้อ 6 ปั่นกวนต่อ 5 นาที
8. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 7 เทใส่บีกเกอร์ขนาด 5 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนได้ 5 ลิตร ทิ้งไว้จนตกตะกอนแล้วเทน้ำส่วนใสทิ้ง ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง
9. นำตะกอน (Sludge) ในข้อ 8 ไป Sonicate เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น นำตะกอน (Sludge) ที่ผ่านการ Sonicate เทใสบีกเกอร์และปิดด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.1.3 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสไทเทเนียมไดออกไซด์**

1. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผสมกับเอทานอล 150 มิลลิลิตร แล้วนำไป Sonicate เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการโซนิเคชันมาทาบนแผ่นลวดสแตนเลสให้ทั่วแผ่น
3. นำแผ่นลวดจากข้อ 2 ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วเก็บในถุงซิปแล้ววางในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อ
4. นำแผ่นลวดที่ได้จากข้อ 3 ไปวิเคราะห์คุณลักษณะและสัณฐานวิทยาดังแสดงในตารางที่3.1

**ตารางที่ 3.1** เทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะและสัณฐานวิทยา

| **เทคนิคการตรวจวิเคราะห์** | **วิเคราะห์** |
|---|---|
| X-ray Fluorescence (XRF) | วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา |
| Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) | วิเคราะห์องค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา |
| Raman Spectroscopy | วิเคราะห์เอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยา |
| UV–Vis Spectroscopy | หาการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร |
| Scanning Electron Microscope (SEM) | วิเคราะห์สัณฐานวิทยาตัวเร่งปฏิกิริยา |
| Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) | ศึกษาการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา |

**3.2.1.4 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์**

วิธีเตรียมซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้วิธีของ Khalid *et al.* (2018)

1. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผสมกับเอทานอล 150 มิลลิลิตร แล้วนำสารผสมที่ได้ไป Sonicate เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำสารที่ผ่านกระบวนการโซนิเคชันจากข้อ 1 มาหยด $AgNO_3$ โดยแปรค่าอัตราส่วน molar ratio ของ Ag ต่อ Ti ที่ 0%, 0.5%, 1%, 2% แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. นำสารละลายจากข้อ 2 เทใส่ Teflon autoclave ผ่านกระบวนการโซโวลเทอมอลที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำ Teflon autoclave ข้อ 3 ออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. นำสารละลายออกจาก Teflon autoclave นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วนำเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง 3 รอบ โดยรอบที่ 1 ล้างด้วยเอทานอล ส่วนรอบที่ 2 และรอบที่ 3 ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
6. นำสารในข้อ 5 ไปใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ระเหยน้ำออกจนเหลือปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำสารที่ได้จากข้อ 6 มาทาบนแผ่นลวดสแตนเลสให้ทั่วแผ่น แล้วนำแผ่นลวดไปอบในเตาอบ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วเก็บในถุงซิป แล้ววางในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

**3.2.1.5 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์**

วิธีเตรียมกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้วิธีของ Chaval *et al.* (2018)

1. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผสมกับเอทานอล 150 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนให้ผสมกันด้วยเครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 15 นาที
2. วัดค่า pH ถ้าค่า pH มีค่ามากกว่า 4 ให้ใช้กรดไฮโดรคลอริก 1% โดยปริมาตร ปรับให้ค่า pH เท่ากับ 4
3. เติมกราฟีนออกไซด์ 0.75% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้ล้างโดยใช้น้ำปราศจากไอออนและเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงจนได้ pH 7
5. นำสารจากข้อ 4 มาระเหยน้ำออกจนเป็นโคลนมาทาบนแผ่นลวดสแตนเลสให้ทั่วแผ่น
6. นำแผ่นลวดจากข้อ 5 ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วเก็บในถุงซิปแล้ววางในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อ

**3.2.1.6 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์**

วิธีเตรียมซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ใช้วิธีของ Khalid *et al.* (2016)

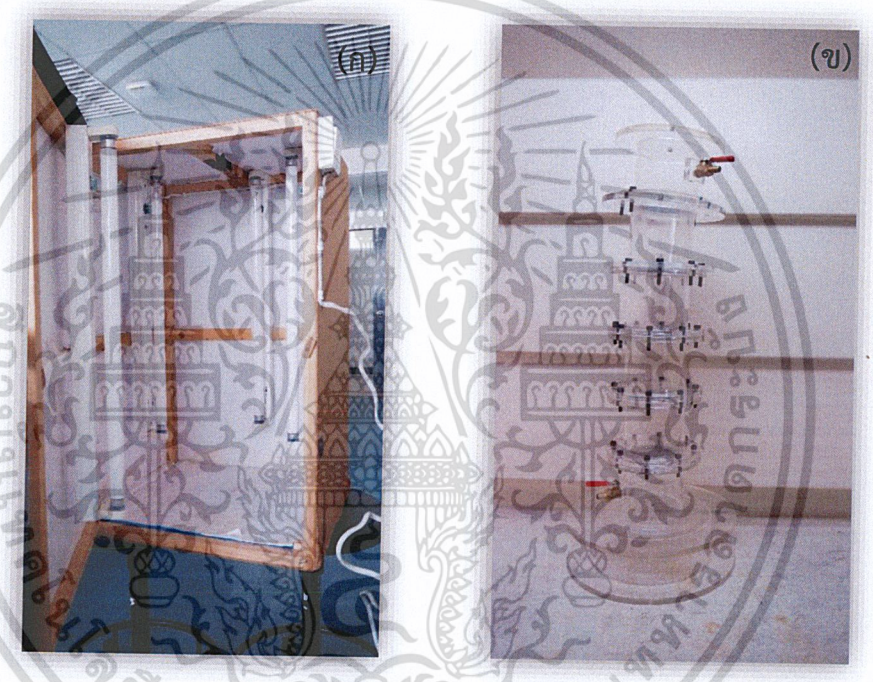
1. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ผสมกับน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล อย่างละ 70 มิลลิลิตร แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 15 นาที
2. เติมกราฟีนออกไซด์ 400 มิลลิกรัม ลงในสารละลายข้อ 1 แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปเข้ากระบวนการโซนิเคชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำซิลเวอร์ไนเตรต (weight ratio 0.09 ต่อน้ำหนักกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์) ผสมกับอะซิติกแอซิด 5 มิลลิลิตร เอทานอล 25 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร แล้วนำมาหยดใส่สารละลายข้อ 2 จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3 เทใส่ Teflon autoclave แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. นำ Teflon autoclave ข้อ 4 ออกจากเตาอบ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. นำสารละลายออกจาก Teflon autoclave นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วนำเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง 3 รอบ โดยรอบที่ 1 ล้างด้วยเอทานอล ส่วนรอบที่ 2 และ รอบที่ 3 ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน
7. นำสารละลายจากข้อ 6 มาระเหยน้ำออกจนเป็นโคลนมาทาบนแผ่นลวดสแตนเลสให้ทั่วแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. นำสารที่ได้มาทาบนแผ่นลวดสแตนเลสให้ทั่วแผ่น แล้วนำแผ่นลวดไปอบในเตาอบ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วเก็บในถุงซิปแล้ววางในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปใช้ต่อไป

### 3.2.2 การสร้างคอลัมน์และตู้ปฏิกรณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตู้ปฏิกรณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 45 เซนติเมตร ความสูง 80 เซนติเมตร (รูปที่ 3.1 ก) ประกอบด้วยคอลัมน์อะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ขนาดความสูง 50 เซนติเมตร จำนวน 1 คอลัมน์ โดยมีชั้นวางสำหรับแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวน 5 ชั้น มีช่องอากาศเข้าด้านล่างและช่องอากาศออกด้านบน (รูปที่ 3.1 ข)




**รูปที่ 3.1** ตู้ปฏิกรณ์ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
(ก) ตู้ปฏิกรณ์ (ข) คอลัมน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโต-คะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO)**

**3.2.3.1 การหาความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์**

1. เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)
2. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 เข้ากับเครื่องพ่นอากาศ และขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2
3. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 ที่บรรจุสารดูดซึม ประกอบด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตรและแอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร อัตราส่วน 1:1:1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) ปริมาณ 200 มิลลิลิตร เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์
4. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 5 เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก
5. นำแผ่นลวดสแตนเลสใส่เข้าคอลัมน์ จำนวน 3 ชั้น
6. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 6 และ 7 ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอนเข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศส่วนบุคคล โดยวัดอัตราการไหลของปั๊มก่อนและหลังการทดลอง
7. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
8. นำสารดูดซึมในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทร-โฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 411 นาโนเมตร
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ

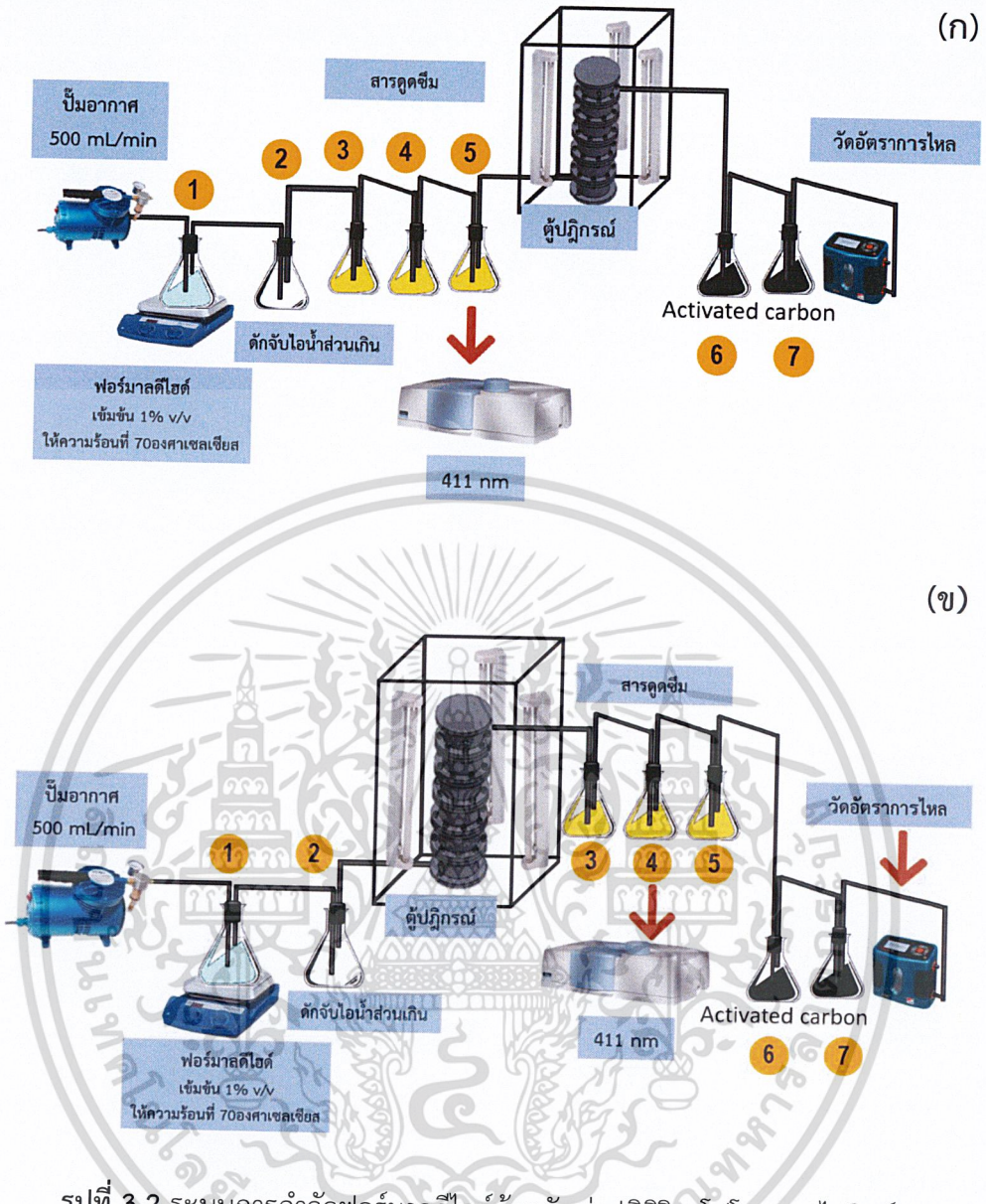
**3.2.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO)**

1. เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)
2. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 เข้ากับเครื่องพ่นอากาศ และขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2
3. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 2 เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย $TiO_2$ จำนวน 3 ชั้น
4. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 ที่บรรจุสารดูดซึม ประกอบด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตรและแอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร อัตราส่วน 1:1:1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) ปริมาณ 200 มิลลิลิตร เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 6 และ 7 ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอนเข้ากับขวดรูปชมพู่ใบที่ 5 และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศส่วนบุคคล โดยวัดอัตราการไหลของปั๊มก่อนและหลังการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ข
6. ทดลองให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุแผ่นลวด $TiO_2$ เป็นเวลา 30 นาที แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์ (4x18 Watts)
7. นำสารดูดซึมในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 411 นาโนเมตร
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่แปรค่าแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้หลอดยูวีซี (254 nm) ที่กำลัง 72 วัตต์ (4x18 Watts) และไม่มีแหล่งกำเนิดแสง
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ใช้แผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์-ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่ 0.5%, 1% และ 2% แทน $TiO_2$ ในข้อ 3
11. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ใช้แผ่นลวดสแตนเลสกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียม-ไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) แทน $TiO_2$ ในข้อ 3
12. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-9 แต่ใช้แผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์-ไทเทเนียม-ไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) แทน $TiO_2$ ในข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.2** ระบบการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสต์
(ก) เก็บตัวอย่างฟอร์มาลดีไฮด์ก่อนบำบัด (ข) เก็บตัวอย่างฟอร์มาลดีไฮด์หลังบำบัด

**3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$)**

1. เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)
2. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 เข้ากับเครื่องพ่นอากาศ และขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2
3. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 2 เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.3.2 โดยแปรค่าจำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสที่ 1, 3 และ 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 ที่บรรจุสารดูดซึม ประกอบด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตรและแอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร อัตราส่วน 1:1:1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก) ปริมาณ 200 มิลลิลิตร เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์
5. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 6 และ 7 ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอนเข้ากับขวดรูปชมพู่ใบที่ 5 และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศส่วนบุคคล โดยวัดอัตราการไหลของปั๊มก่อนและหลังการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ข
6. ทดลองโดยให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่เหมาะสม เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่กำลัง 72 วัตต์
7. นำสารดูดซึมในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทร-โฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 411 นาโนเมตร
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 อีก 2 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยใช้จำนวนชั้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง แต่แปรค่ากำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 18, 36 และ 72 วัตต์
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 โดยใช้จำนวนชั้นและกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง แต่แปรค่าอัตราการไหลที่ 200, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที

**3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ**

ข้อมูลผลการทดลองจะวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitap รุ่น 18 ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวหรือ One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการการสลายตัวด้วยแสงของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$), กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีน (Ag-$TiO_2$/GO) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และยูวีซี ได้ผลการทดลองดังนี้

## 4.1 ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์และลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์

### 4.1.1 การหาองค์ประกอบธาตุของโฟโตคะตะลิสต์เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ มีการพบองค์ประกอบหลักคือธาตุไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) ส่วน Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$ และ Ag-$TiO_2$/GO มีเปอร์เซ็นต์ไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) ต่ำลง อาจเป็นผลมาจากการเติมอนุภาคของธาตุซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอน (C) จากกราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้ การเติมซิลเวอร์-ไนเตรทและกราฟีนออกไซด์เพียงเล็กน้อย อาจกระจายได้ไม่ทั่วตัวอย่างแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ตรวจหาธาตุซิลเวอร์ (Ag) และคาร์บอน (C) จากกราฟีนออกไซด์ไม่พบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** องค์ประกอบธาตุของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

| ชนิดโฟโต-คะตะลิสต์ | %Ti | %O | %Cr | %Mn | %Fe | %Co | %Ni | %Cu | %Al | %Si |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 12.3 | 32.3 | 14.5 | 0.804 | 35.2 | 0.139 | 3.50 | 0.193 | 0.586 | 0.385 |
| Ag-$TiO_2$ | 11 | 32.3 | 15.1 | 0.990 | 32.1 | 0.151 | 3.55 | 0.149 | 0.713 | 0.650 |
| GO- $TiO_2$ | 9.48 | 31.8 | 15.3 | 1.08 | 37.2 | 0.153 | 3.79 | 0.198 | 0 | 0.596 |
| Ag-$TiO_2$/GO | 2.89 | 30.9 | 15.6 | 1.25 | 43.4 | 0.196 | 4.96 | 0.198 | 0 | 0.917 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.2 การทดสอบหาเอกลักษณ์ของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)**

จากผลการทดสอบหาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นลวดปรากฏพีคในช่วง 600 ถึง 900 $cm^{-1}$ เป็นการยืดออกของพันธะที่เชื่อมกันของ Ti-O และ Ti-O-Ti ที่พีคช่วง 3,300 ถึง 3,500 $cm^{-1}$ เป็นพีคที่กว้างสัมพันธ์กับการสั่นและการยืดออกของพันธะ O-H ในการดูดซึมโมเลกุลของน้ำ และที่พีค 1,650 $cm^{-1}$ เป็นการงอตัวพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

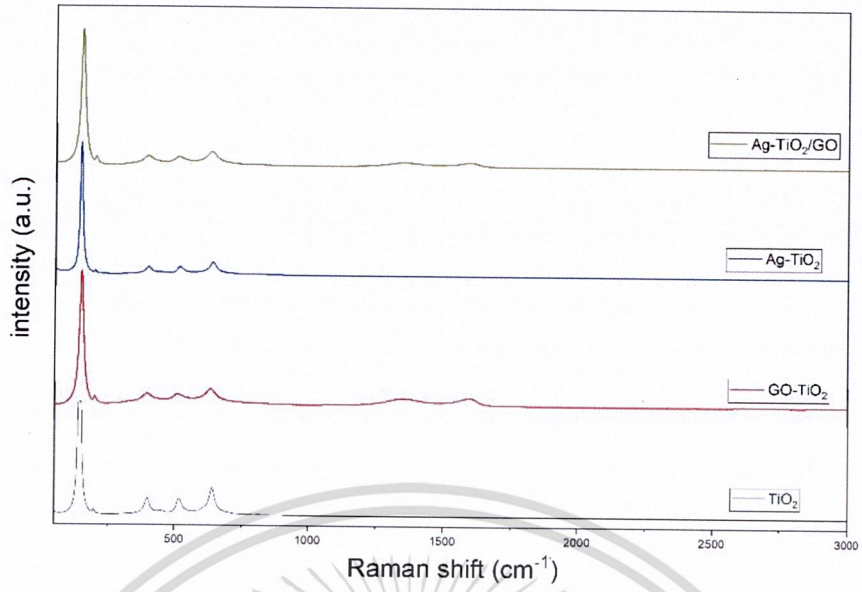



**รูปที่ 4.1** การทดสอบหาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นลวดเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

**4.1.3 การทดสอบหาเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy**

จากหลักการที่สารแต่ละชนิดจะมีลักษณะการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบหาเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ที่มีกราฟีนออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 พีคเอกลักษณ์ที่สำคัญ ได้แก่ (i) G-band ที่ตำแหน่งประมาณ 1,580 $cm^{-1}$ แสดงถึงการสั่นของระนาบอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างที่มีพันธะแบบ $sp^2$ hybridization (ii) D-band ที่ตำแหน่งประมาณ 1,340 $cm^{-1}$ แสดงถึงการสั่นของระนาบอะตอมคาร์บอนในโครงสร้างที่มีพันธะแบบ $sp^3$ hybridization และยังบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบและตำหนิในโครงสร้างผลึก จากการทดสอบ Raman spectroscopy พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยากราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) ปรากฏพีค G-band ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง 1,594 $cm^{-1}$ และ D-band ที่ตำแหน่ง 1,368 $cm^{-1}$ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ปรากฏพีค G-band ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง 1,595 $cm^{-1}$ และ D-band ที่ตำแหน่ง 1,361 $cm^{-1}$ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ปรากฏพีค G-band และ D-band ของกราฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูป 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

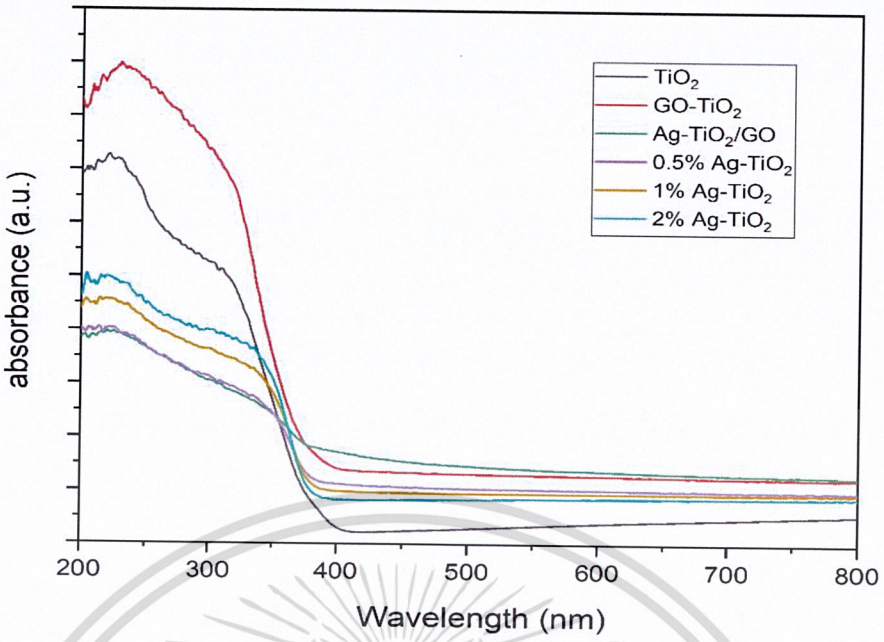



**รูปที่ 4.2** ผลการทดสอบเอกลักษณ์ของกราฟีนออกไซด์ในโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

### 4.1.4 การทดสอบการดูดกลืนแสงของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสด้วยเทคนิค UV–Vis spectroscopy

จากการสอบการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV–Vis spectroscopy โดยทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) มีประสิทธิภาพในการดูดซับแสงที่ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ที่ต่ำกว่า 400 นาโนเมตรสูง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) มีความสามารถในการดูดซับแสงได้ดีในช่วงขอบเขตที่มีความยาวคลื่นสั้น ๆ ส่วนซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$), กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) เพิ่มขึ้น เนื่องจากกราฟีนออกไซด์ (GO) และธาตุซิลเวอร์ ($Ag^0$) มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) และกราฟีนออกไซด์ (GO) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูป 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



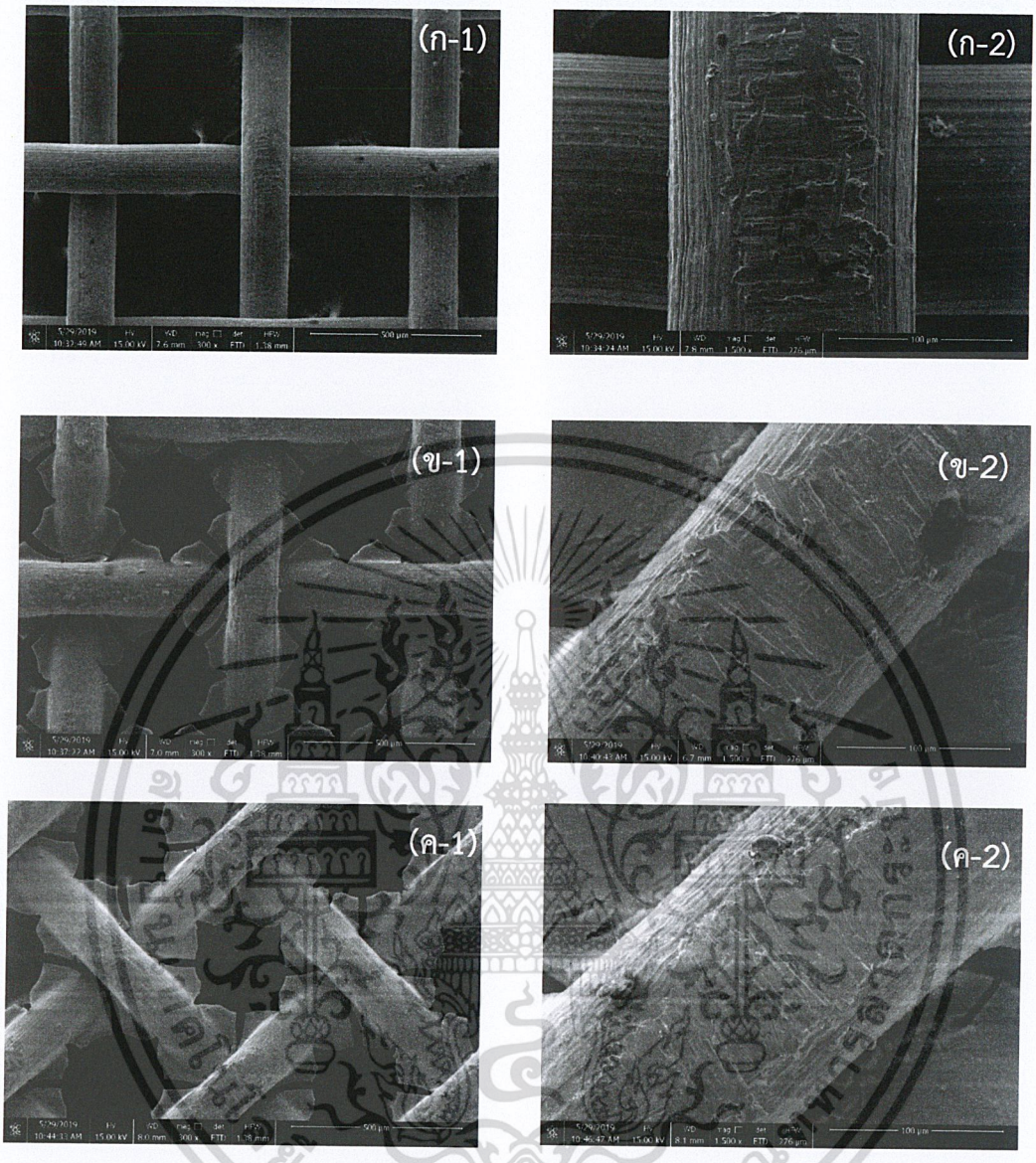

**รูปที่ 4.3** ผลการทดสอบการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV–Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร

### 4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนแผ่นลวดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนแผ่นลวดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบการเคลือบติดของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสที่เกาะอยู่บนแผ่นลวดสแตนเลส พบว่าแผ่นลวดสแตนเลสที่ไม่มีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ จะเห็นร่องรอยการขัดด้วยกระดาษทรายหยาบสำหรับเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ดังแสดงในรูป 4.4 (ก-1) และ (ก-2) ที่กำลังขยาย 300x และ 1,500x ตามลำดับ เมื่อเคลือบลวดสแตนเลสด้วย $TiO_2$, Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$ และ Ag-$TiO_2$/GO พบว่า มีการเคลือบติดของสารเร่งปฏิกิริยากระจายทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในรูป 4.4 (ข-จ)

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสหลังบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์พบว่า มีส่วนที่มีสีเข้มเพิ่มขึ้นในบางจุดของแผ่นลวดที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ แสดงดังรูป 4.5 (ก-1) และ (ก-2) เป็นผลมาจากซิลเวอร์ไนเตรททำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งอาจไปอุดตันตามพื้นที่ผิวหรือรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



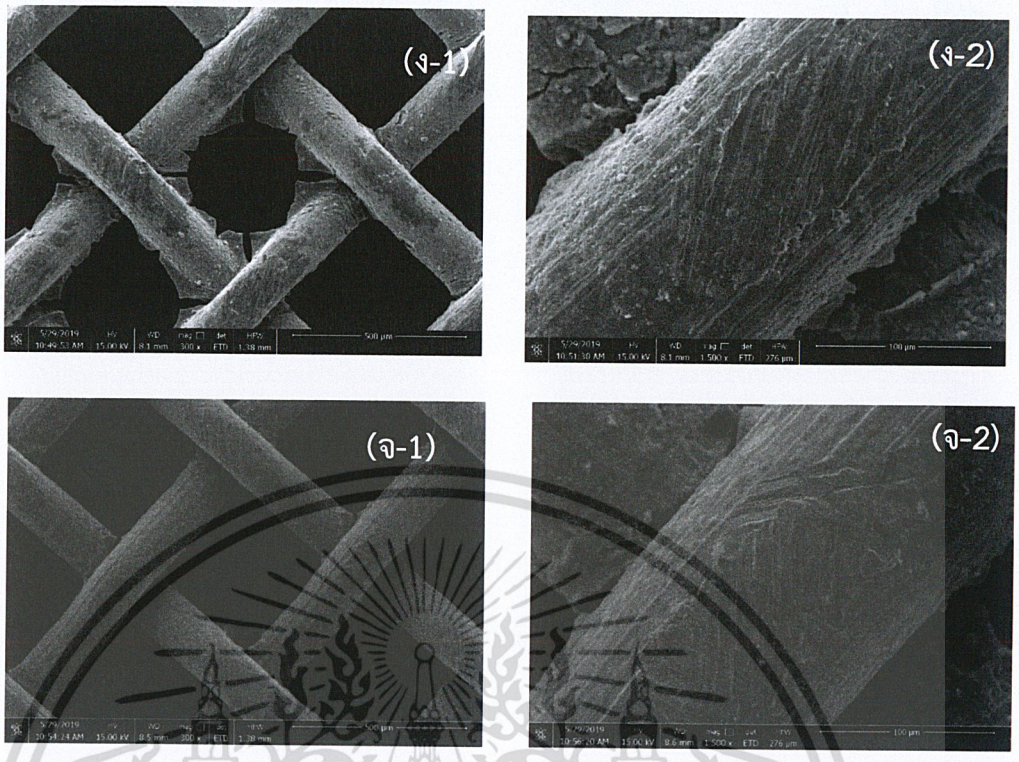

**รูปที่ 4.4** ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส (ต่อ)

(ก) แผ่นลวดสแตนเลส (ก-1) ที่กำลังขยาย 300x (ก-2) ที่กำลังขยาย 1,500x

(ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข-1) ที่กำลังขยาย 300x (ข-2) ที่กำลังขยาย 1,500x

(ค) 0.5% สัดส่วนโมล ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ค-1) ที่กำลังขยาย 300x (ค-2) ที่กำลังขยาย 1,500x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

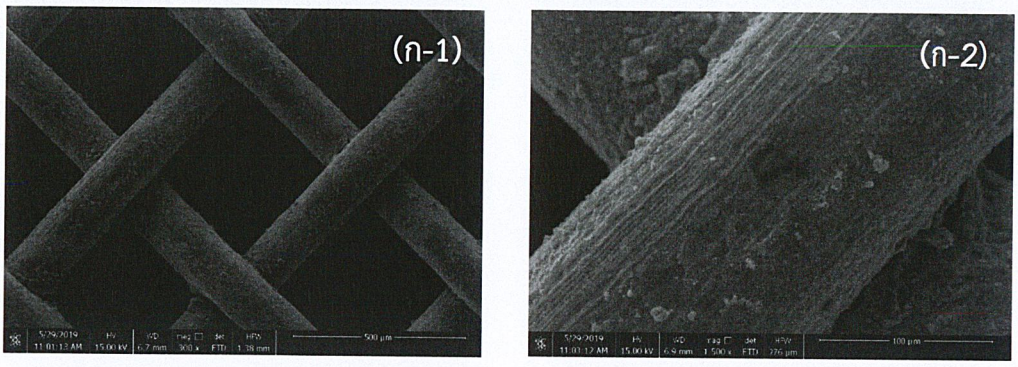



**รูปที่ 4.4** ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส (ต่อ)

(ง) กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ง-1) ที่กำลังขยาย 300x (ง-2) ที่กำลังขยาย 1,500x

(จ) ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (จ-1) ที่กำลังขยาย 300 เท่า (จ-2) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

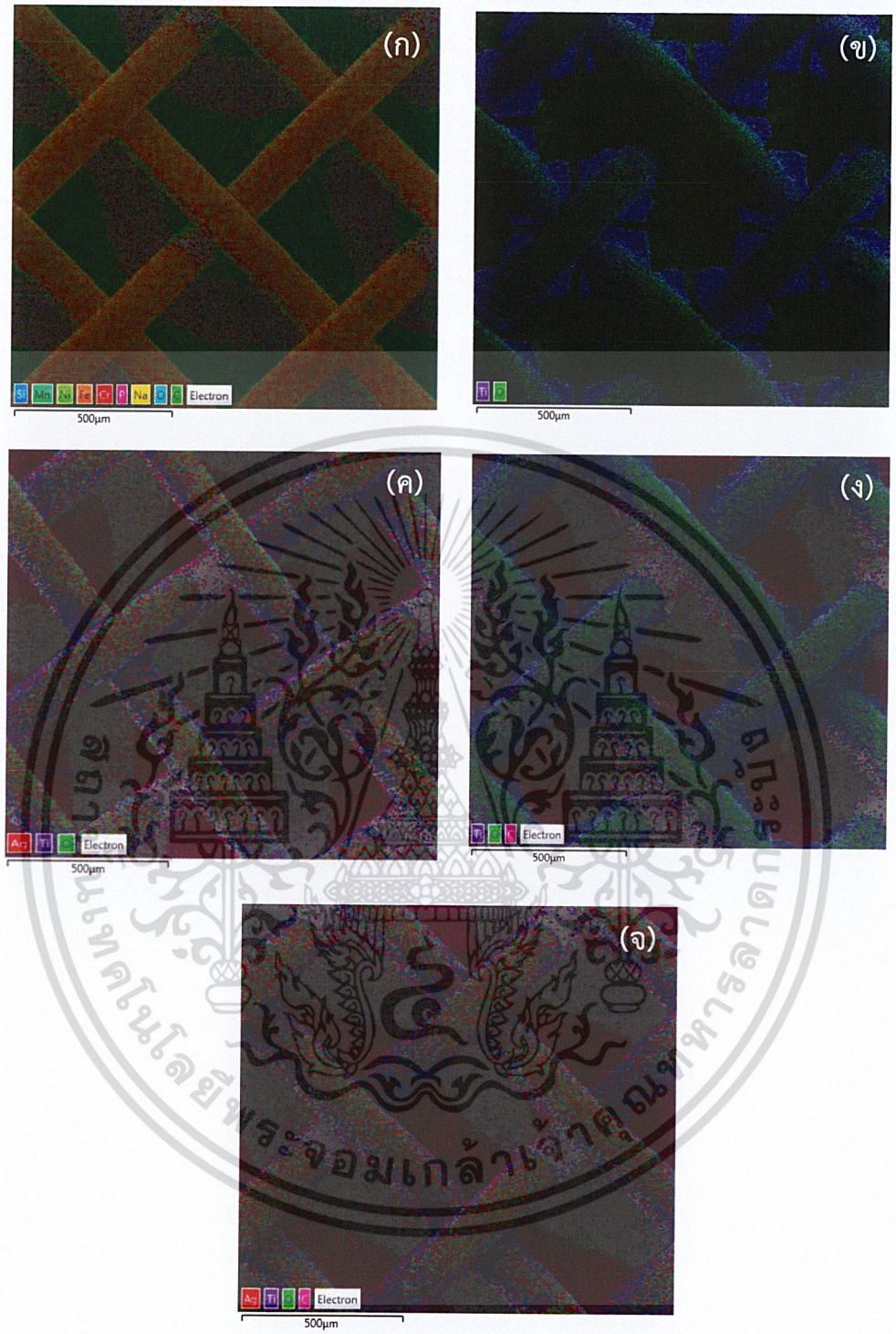



**รูปที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของ 0.5% สัดส่วนโมล ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสหลังบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์
(ก-1) ที่กำลังขยาย 300x (ก-2) ที่กำลังขยาย 1,500x

**4.1.6 ผลการวิเคราะห์ดูการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนแผ่นลวดด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)**

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวธาตุของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส พบว่าแผ่นลวดสแตนเลสเปล่ามีการกระจายตัวธาตุหลายชนิด เช่น ซิลิกอน แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม ฟอสฟอรัส ออกซิเจน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$ ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลสจะมีการกระจายตัวของธาตุ Ti และ O ทั่วทั้งแผ่นลวด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข), ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-$TiO_2$ มีการกระจายตัวของธาตุ Ti และ O ทั่วทั้งแผ่นลวด ส่วนธาตุ Ag จะมีการปรากฏบางพื้นที่ของแผ่นลวด เนื่องจากมีการเติมธาตุ Ag ในปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ค), ตัวเร่งปฏิกิริยา GO-$TiO_2$ มีการกระจายตัวของธาตุ Ti, O และ C ทั่วแผ่นลวดอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-$TiO_2$/GO มีการกระจายตัวของธาตุ Ti, O, C และ Ag ทั่วทั้งแผ่นลวด แต่จะเห็นการกระจายตัวของธาตุ C ไม่ชัดเจน เนื่องจากขั้นตอนการทดลองที่ได้ทำการเติมอนุภาค Ag ภายหลังการปั่นกวนผสมระหว่าง $TiO_2$ และกราฟีนออกไซด์ (GO) ทำให้อนุภาค Ag บดบังอนุภาคของกราฟีนออกไซด์ (GO) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.6** ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวธาตุของโฟโตคะตะลิสต์ที่เคลือบบนแผ่นลวดสแตนเลส (ก) แผ่นลวดสแตนเลส (ข) $TiO_2$ (ค) GO-$TiO_2$ (ง) 0.5% โดยโมล Ag-$TiO_2$ (จ) Ag-$TiO_2$/GO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา $TiO_2$, Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$ และ Ag-$TiO_2$/GO ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงยูวีซี

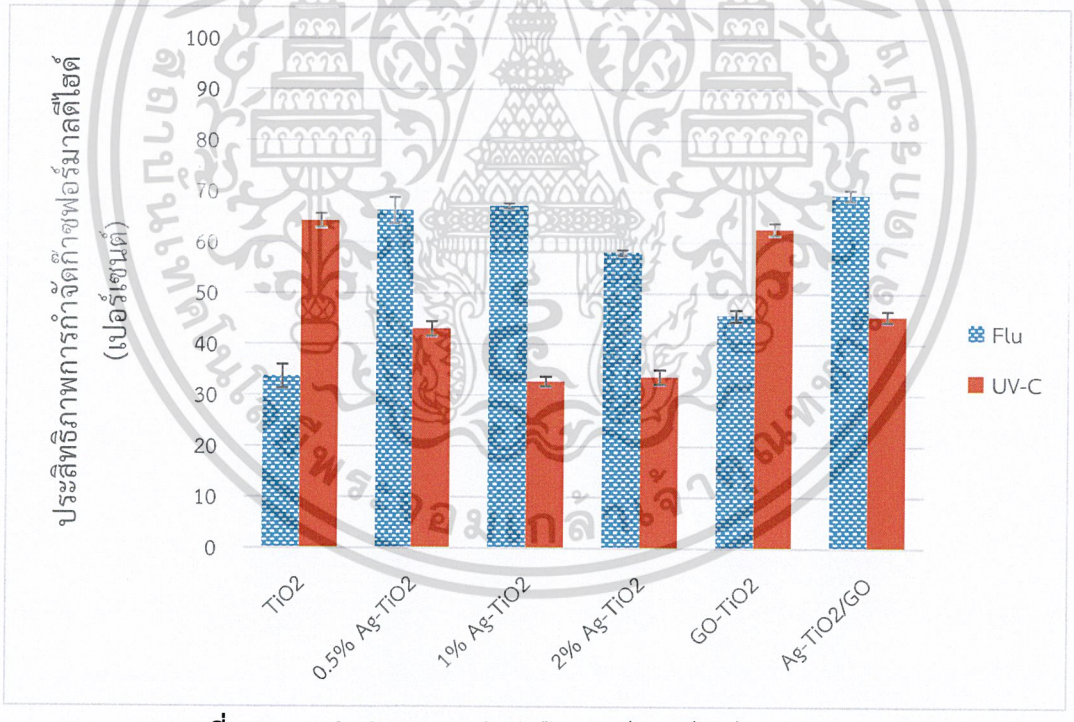
ผลการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่สัดส่วน 0.5%, 1%, 2% โดยโมลของไทเทเนียมไดออกไซด์, กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงยูวีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตาราง ค-1-ค-2 ภาคผนวก ค) พบว่า ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศภายใต้แสงที่มองเห็นได้และแสงยูวีซี จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-1 ภาคผนวก ง)

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่สัดส่วน 0.5%, 1%, 2% โดยโมลของไทเทเนียมไดออกไซด์, กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ภายใต้แสงยูวีซี เท่ากับ 64.20±1.38, 43.01±1.41, 32.68±0.95, 33.62±1.39, 62.65±1.21 และ 45.50±1.10 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-2 ภาคผนวก ง) เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และกราฟีนออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงช่วง UV ได้ดี สอดคล้องกับการทดสอบการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) ในผลการทดลองหัวข้อ 4.1.4 นอกจากนี้ อนุภาคของธาตุซิลเวอร์ ($Ag^0$) จะบดบังแสง UV ที่ตกกระทบบนพื้นที่ผิวของ $TiO_2$ ทำให้การแตกตัวของไอออนลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ของ $TiO_2$ ภายใต้แสงยูวีซีลดลง

ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$), ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่สัดส่วน 0.5%, 1%, 2% โดยโมลของไทเทเนียมไดออกไซด์, กราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$), และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) โดยใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์กำลัง 72 วัตต์ เท่ากับ 33.63±2.32, 66.23±2.58, 67.09±0.49, 58.00±0.53, 45.64±1.17 และ 69.26±1.06 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การเติมซิลเวอร์ ($Ag^0$) ลงไปในไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ เนื่องจากธาตุซิลเวอร์ ($Ag^0$) ที่เติมลงไป จะทำให้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ที่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

ดูดกลืนแสงของซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ในผลการทดลองหัวข้อ 4.1.4 ซึ่งธาตุซิลเวอร์ ($Ag^0$) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์จะทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน และช่องว่างอิเล็กตรอนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำ, หมู่ไฮดรอกซิล ($OH^-$) และซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($O_2^-$) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล ($OH^•$) และซุปเปอร์ออกไซด์แรดิคอล ($^•O_2^-$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำให้โมเลกุลของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์แตกตัวกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) 1% สัดส่วนเชิงโมล และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-3 ภาคผนวก ง) จึงเลือกใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่ 0.5% และ 1% สัดส่วนเชิงโมลมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-5 ภาคผนวก ง) จึงใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0.5% โดยสัดส่วนเชิงโมล เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ในการทดลองต่อไป




**รูปที่ 4.7** ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ของโฟโตคะตะลิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี

## 4.3 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-$TiO_2$

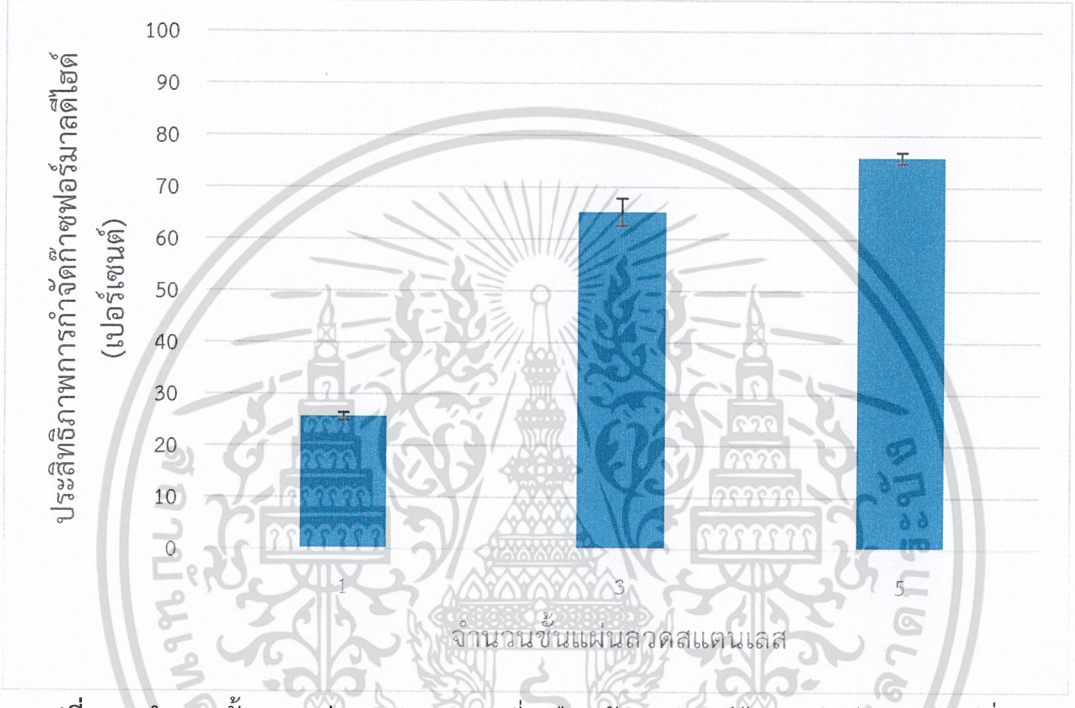
จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ 0.5% สัดส่วนเชิงโมลของ Ag-$TiO_2$ จึงได้นำไปศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ ได้ผลการทดลองดังนี้

**4.3.1 ผลของจำนวนชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม**

จากการศึกษาการกำจัดฟอร์มาดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวด 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้โดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์ โดยแปรค่าจำนวนชั้นสารเร่งปฏิกิริยา 1 ชั้น, 3 ชั้นและ 5 ชั้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตาราง ค-3 ภาคผนวก ค)



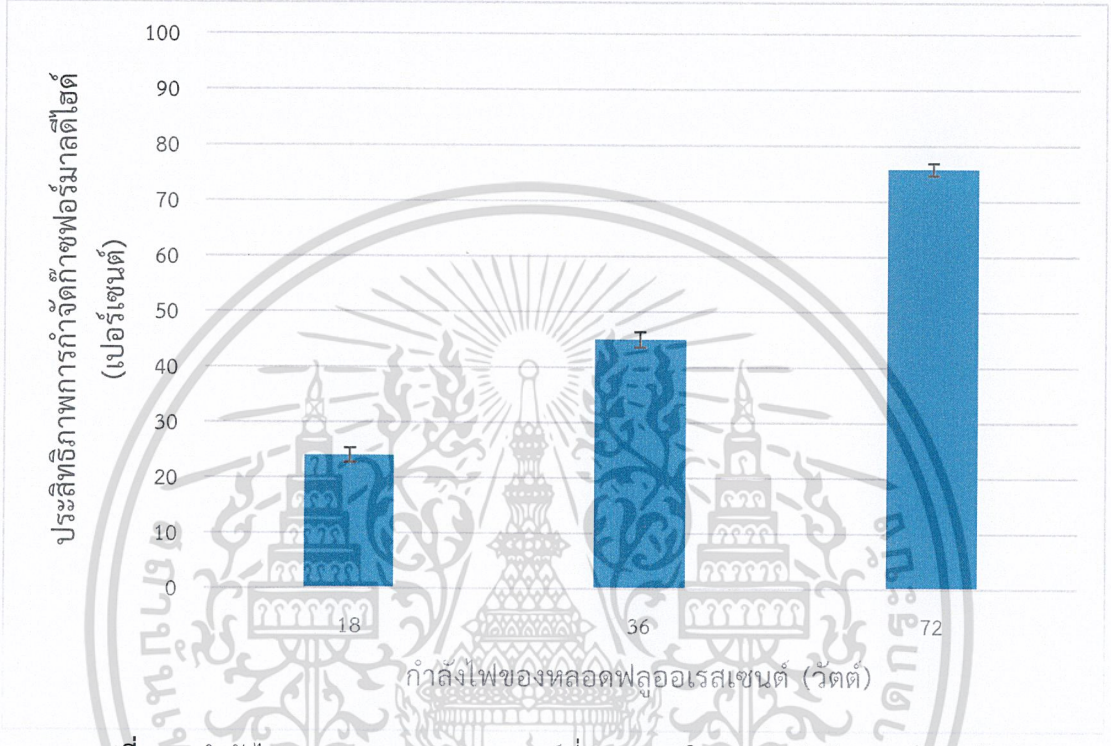

**รูปที่ 4.8** จำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ผลของประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสัดส่วนเชิงโมล จำนวน 1 ชั้น, 3 ชั้น และ 5 ชั้น มีค่าเท่ากับ 25.62±0.72, 65.20±2.66 และ 75.74±1.09 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-6 ภาคผนวก ง) พบว่าจำนวนชั้นแต่ละชั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยิ่งจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์มาก ก็จะมีตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้น การทดลองนี้จึงใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 5 ชั้น ในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ผลของกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เหมาะสม

การศึกษาการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวด 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) จำนวน 5 ชั้น ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ โดยแปรค่ากำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 18 วัตต์, 36 วัตต์ และ 72 วัตต์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตาราง ค-4 ภาคผนวก ค)



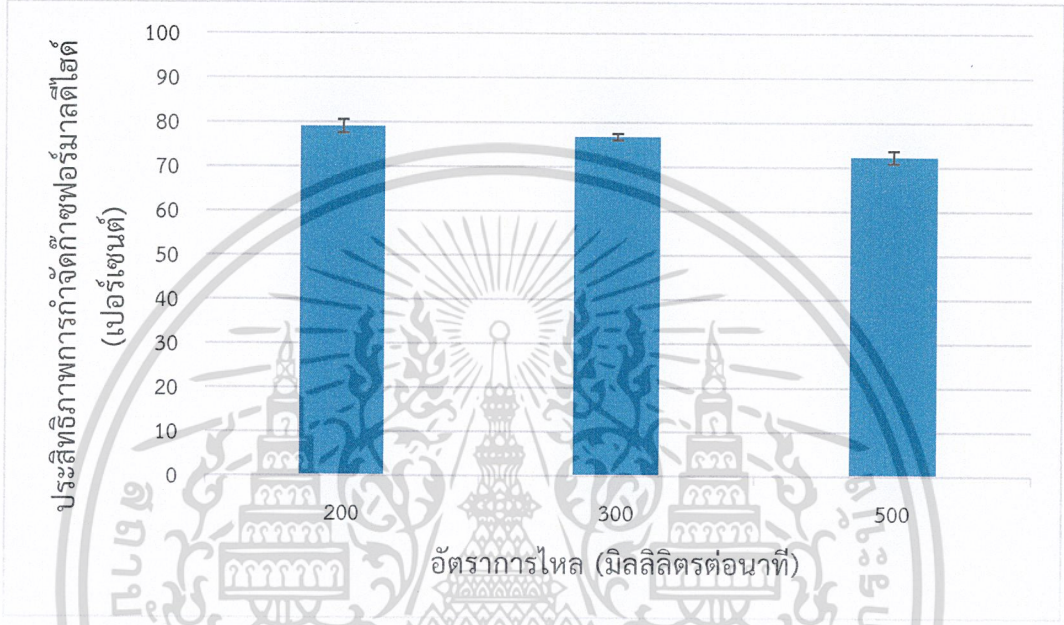

**รูปที่ 4.9** กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 18, 36 และ 72 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 24.03±1.31, 45.03±1.38 และ 75.74±1.09 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดในตาราง ง-7 ภาคผนวก ง) เนื่องจากกำลังไฟของแหล่งกำเนิดแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังนั้น กำลังของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 72 วัตต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เหมาะสม เพราะเมื่อได้รับแสงมากจะไปกระตุ้นให้ธาตุซิลเวอร์เกิดการสั่นในโมเลกุลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ระดับพลังงานและปฏิกิริยาการตกกลับของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ (เจษฎากรและคณะ, 2560) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของชญตาและคณะ (2561) ที่พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีขึ้น เมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ การทดลองนี้จึงใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 5 ชั้น และกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 72 วัตต์ ในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสม

การศึกษาการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) จำนวน 5 ชั้น กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 72 วัตต์ โดยแปรค่าอัตราการไหลที่ 200, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตาราง ค-5 ภาคผนวก ค)




**รูปที่ 4.10** อัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหล 200, 300, และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 78.99±1.52, 76.71±0.73 และ 72.22±1.41 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher's Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า อัตราการไหล 200 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที (ดูรายละเอียดในตาราง ง-8 ภาคผนวก ง) เนื่องจากค่า Retention time ของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศอยู่ในคอลัมน์ที่อัตราการไหลที่ 200 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที มากกว่าที่อัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์มีระยะเวลาในการทำปฏิกิยามากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์สูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ชญตาและคณะ (2561) ที่พบว่า เมื่ออัตราการไหลของก๊าซที่อยู่ในระบบยิ่งมีอัตราการไหลช้าช่วยให้ให้ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ได้นานยิ่งขึ้น ทำให้ค่า Retention time เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการกำจัดดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

การกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงยูวีซีดีกว่าแสงที่ตามองเห็นได้ การเติมธาตุซิลเวอร์ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) และกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) ทำให้สารเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็นได้

สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศภายใต้แสงที่ตามองเห็นได้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ที่สัดส่วน 0.5% โดยโมลของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที (ระยะเวลาการกักเก็บ (Retention time) 10.61 นาที) กำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 72 วัตต์ และจำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) 5 ชั้น พบว่าสามารถกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศได้ 76.71±0.73 เปอร์เซนต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการบำบัดมลพิษทางอากาศอื่นๆ โดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์

2. ควรศึกษาการบำบัดมลพิษทางอากาศอื่นๆ โดยใช้แผ่นลวดกราฟีนออกไซด์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (GO-$TiO_2$) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์/กราฟีนออกไซด์ (Ag-$TiO_2$/GO) ภายใต้แสงอาทิตย์

3. ควรศึกษาการใช้ซ้ำของแผ่นลวดเคลือบด้วยซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มาลดีไฮด์. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. [Online]. Available: http://php.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/formaldehyde.pdf หน้า 91-92.

กรมอนามัย. 2558. **มลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพ.** กระทรวงสาธารณสุข [Online]. Available: http://advisor.anamai.mopg.go.th/หน้า 63-65.

เกรียงไกร ทองลิ่ม, และคณะ 2558. **ปฏิกิริยาโฟโตคะไลซิสของฟิมล์กรองแสงเคลือบด้วยฟิมล์ไทเทเนียมและเงิน.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. The National Graduate Research Conference *34th*. PM02. มหาลัยขอนแก่น.

เคมีครัวเรือน. 2560. **หลอดฟลูออเรสเซนต์/หลอดนีออน ข้อดีอันตรายจากหลอดฟลูออเรสเซนต์** [Online]. Available: http://siamchemi.com/.

เคมีอุตสาหกรรม. 2560. **ไทเทเนียมไดออกไซด์/ $TiO_2$ และประโยชน์ไทเทเนียมออกไซด์** [Online]. Available: http://www.siamchemi.com/. Accessed on: 21st January 2019

จิตรา และคณะ 2555. **รังสีอัตราไวโอเลต** [Online]. Available: http://www.thaigoogview.com/node/129218. Accessed on: 21st January 2019

จุฑารัตน์ และคณะ 2555. **พิษจากฟอร์มาลดีไฮด์.** ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. [Online]. Available: http://dpm.nida.ac.th/. Accessed on: 30th January 2019

ชดานุช กันตระกูล. 2557. **โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกไทเทเนียม.** ภาควิชาวิกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา.

ชลดา ธีรการุณวงศ์. 2554. ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, นครสวรรค์. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน พ.ศ. 2554.

ธนพงศ์ แสงส่องสิน. 2560. “Formaldehyde” มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. [Online]. Available: http://www.summacheeva.org/. Accessed on: 3rd February 2019

เทอดชัย นบธราสุภาพ. 2560. **หลอดฟูออเรสเซนต์.** โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ. [Online]. Available: http://dss.go.th/ Accessed on: 3rd February 2019

บังอร ฉางทรัพย์. 2558. ฟอร์มาลดีไฮด์/ฟอร์มาลีน ภัยร้ายใกล้ตัว. สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ ฉบับที่ 1. หน้า 2-8

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2558. **ฟอร์มาลดีไฮด์/ฟอร์มาลีน.** ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร [Online]. Available: www.foodnetworksolution.com/. Accessed on: 3rd February 2019

มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2560. **ฐานข้อมูลความปลอดภัยวัสดุนาโน.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก. [Online]. Available: http://web.eng.nu.ac.th/ Accessed on: 5th February 2019



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รชานนท์ กลอนดอน. 2556. **การกำจัดมลพิษทางอากาศด้วนกระบวนการโฟโตคะตะไลติกโดยเคลือบสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์บนผิวเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียน**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. จังหวัดนครราชสีมา

สถาบันมะเร็งแห่งชาติ. 2554. **ฟอร์มาลดีไฮด์และความเสี่ยงมะเร็ง.** สถาบันมะเร็งแห่งชาติที่สถาบันสุขภาพแห่งชาติ

สนาวุฒ สุราษฎร์มณี. 2561. อันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์ในสำนักงานและที่พักอาศัย. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, ปทุมธานี

สรรค์ จิตรใคร่ครวญ. 2552. **การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไทเทเนียมไดออก-ไซด์.** วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. หน้า 21-22.

สุพิณ แสงสุข. 2550. **ไทเทเมียมไดออกไซด์.** นักวิจัยสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. [Online]. Available: http://material.chula.ac.th/. Accessed on: 6th February 2019

อานนท์ จริยนเศรษฐ์. 2560. วิทยานิพนธ์เรื่อง **การกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โธฟอสเฟตด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลติก.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร. KMITL-2017-SC-M-016-022

อัญชลี และคณะ. 2560. รังสีอัลตราไวโอเลต/รังสียูยูวี (UV) และอันตรายจากรังสียูวี. [Online]. Available: Accessed on: 6th February 2019 http://www.siamchemi.com/. Accessed on: 17th February 2019

Chen K., Feng X., Tian H. and Li Y. 2014. **Silver-decorated Titanium Dioxide Nanotube Arrays with Improved Photocatalytic Activity for Visible Light Irradiation.** Journal of Materials Research. 29(11): 1302-1308.

Choojun K., Prasanseang W. and Sriwong C. 2017. **Effect of Synthesized Ag-Nanoparticles by using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolodone for Ag-Natural Rubber Hybrid Sheets and their Antibacterial Properties.** Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Key Engineering Materials: 1662-9795,

He Z., Cai Q., Fang H., Situ G., Qiu J., Song S. and Chen J. 2013. **Photocatalytic Activity of $TiO_2$ Containing Anatase Nanoparticles and Rutile Nanoflower Structure Consisting of Nanorods.** Journal of Environmental Science. 25(12): 2460-2468.

Jin Y., Li J. and Liang W. 2011. **Photo-catalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde by $TiO_2$/ UV, Ag/ $TiO_2$/ UV and Ce/ $TiO_2$/ UV.** College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Building and Environment 51: 345-350.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lua Y. W., Wanga M. Y., Yang C. X. and Zhng X. J. 2015. **Photocatalytic Decomposition of Foormaldehyde by Combination of Ozone and AC Network with UV 365 nm, UV 254 nm and UV 254+ 185 nm.** College of Environment and Engineering, Beijing University of Technology, China Procedia Engineering Volume 121, 521-527.

Ohama, Y. and Gemert, D. V. editor. 2011. Appications of Titanium Dioxide Photocatalysis to construction Materials. Berlin: Springer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## ก-1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย (Flinn Scientific)

### ก-1.1. สต๊อกกรดอะซิติก เข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

ปิเปตกรดอะซิติก เข้มข้น 99.85 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ 2.86 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### ก-1.2. สต๊อกแอซิติลแอซิโตน เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร

ปิเปตแอซิติลแอซิโตน เข้มข้น 99.5 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ 2.06 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### ก-1.3. สต๊อกแอมโมเนียมแอซิเตท เข้มข้น 1.89 โมลต่อลิตร

ชั่งแอมโมเนียมแอซิเตท 145.6812 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้สารละลาย เทสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### ก-1.4. สต๊อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 2,000 พีพีเอ็ม

ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 36.5-38 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ 6.36 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### ก-1.5. สต๊อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม

ปิเปตสารละลายสต๊อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 2,000 พีพีเอ็ม 250 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### ก-1.6. สารดูดซึมสำหรับวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ (Kawakami Y. et al., 2015)

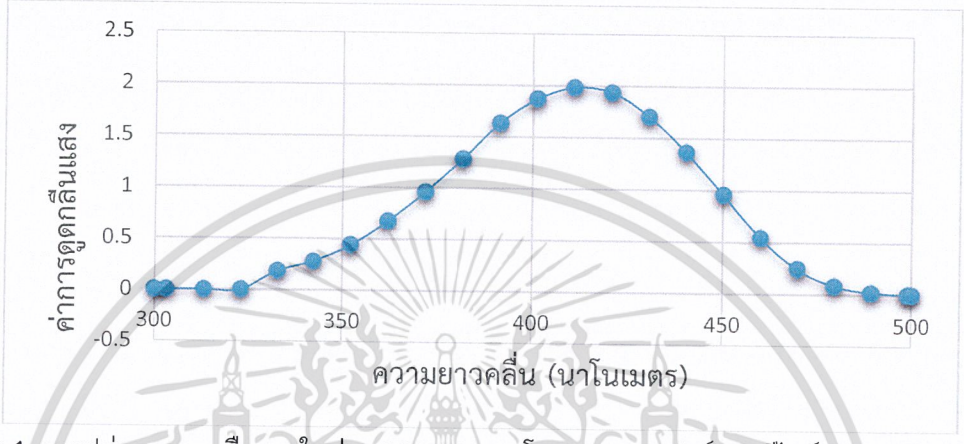
สารดูดซึมประกอบด้วย กรดอะซิติก เข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร , แอซิติลแอซิโตน เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร และแอมโมเนียมแอซิเตท เข้มข้น 1.89 โมลต่อลิตร ผสมกันในสัดส่วน 1:1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ก-2 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 0, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 พีพีเอ็ม**

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มา 0, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารดูดซึม

**ก-3 กราฟการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์**



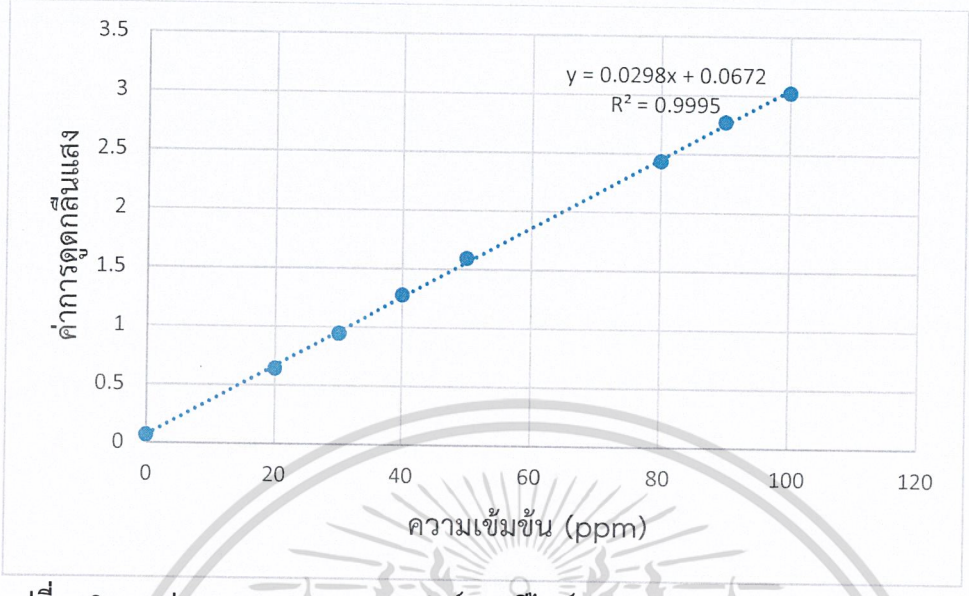

**รูปที่ ก.1** กราฟค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์

**ตาราง ก-1** ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์

| ความยาวคลื่น (nm) | Abs. | ความยาวคลื่น (nm) | Abs. |
|---|---|---|---|
| 300 | 0 | 411.0 | 1.985 |
| 303.2 | 0 | 420.8 | 1.938 |
| 313 | 0 | 430.6 | 1.708 |
| 322.8 | 0 | 440.4 | 1.366 |
| 332.6 | 0.183 | 450.2 | 0.957 |
| 342.4 | 0.279 | 460.0 | 0.548 |
| 352.2 | 0.439 | 469.8 | 0.245 |
| 362.0 | 0.674 | 479.6 | 0.084 |
| 371.8 | 0.961 | 489.4 | 0.022 |
| 381.6 | 1.284 | 499.2 | 0.004 |
| 391.4 | 1.635 | 500.0 | 0.000 |
| 401.2 | 1.870 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก-4 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์




รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

ตาราง ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

| ค่าความเข้มข้น (ppm) | Abs. |
|---|---|
| 0 | 0.068 |
| 20 | 0.642 |
| 30 | 0.944 |
| 40 | 1.278 |
| 50 | 1.594 |
| 80 | 2.438 |
| 90 | 2.772 |
| 100 | 3.024 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

## ข-1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. การคำนวณ Retention time (RT)

   RT (min) = V ($cm^3$) / Flow rate (mL/min)

2. การคำนวณหาความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์

   สมการเส้นตรง $y = mx + b$

   ความเข้มข้น $= (y - b) / m$

   เมื่อ $y$ = ค่าการดูดกลืนแสง

   $b$ = ค่าคงที่

   $m$ = ความชัน

3. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัด

$$\% \text{ Removal} = \frac{Cs - Ci}{Ci} \times 100$$

เมื่อ $C_i$ = ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)

$C_s$ = ความเข้มข้นที่สารดูดซึมดักจับ (ppm)

**ตัวอย่างการคำนวณ ข-1 (อัตราการไหล 200 mL/min 30 นาที 72 วัตต์)**

Abs. in = 3.203 Abs. out = 0.044

$$\text{RT (min)} = \frac{\pi \times 4.5^2 \times 50}{300} = 10.61 \text{ นาที}$$

จากสมการเส้นตรง $y = 0.0298x + 0.0672$

ความเข้มข้นเข้า = (3.203-0.0672) / 0.0298 = 105.23 ppm

ความเข้มข้นออก = (1.207-0.0672) / 0.0298 = 38.25 ppm

$$\% \text{ Removal} = \left(\frac{105.23 - 38.25}{105.23}\right) \times 100 = 63.65 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค

## ค-1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ภายใต้แสงยูวีซี

**ตาราง ค-1** ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ภายใต้แสงยูวีซี

| คะตะลิสต์ | ซ้ำที่ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (ppm) | การกำจัด (%) | ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%) | S.D. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 1 | 110.43 | 37.83 | 65.74 | 64.20 | 1.38 |
| | 2 | 110.43 | 39.99 | 63.79 | | |
| | 3 | 110.43 | 40.78 | 63.07 | | |
| 0.5% Ag-$TiO_2$ | 1 | 109.97 | 61.02 | 44.51 | 43.01 | 1.41 |
| | 2 | 109.97 | 64.10 | 41.71 | | |
| | 3 | 109.97 | 62.89 | 42.81 | | |
| 1% Ag-$TiO_2$ | 1 | 108.25 | 72.09 | 33.40 | 32.68 | 0.95 |
| | 2 | 108.25 | 74.04 | 31.60 | | |
| | 3 | 108.25 | 72.47 | 33.05 | | |
| 2% Ag-$TiO_2$ | 1 | 109.44 | 71.29 | 34.86 | 33.62 | 1.39 |
| | 2 | 109.44 | 74.30 | 32.11 | | |
| | 3 | 109.44 | 72.36 | 33.89 | | |
| GO-$TiO_2$ | 1 | 108.79 | 39.31 | 63.87 | 62.65 | 1.21 |
| | 2 | 108.79 | 40.66 | 62.63 | | |
| | 3 | 108.79 | 41.93 | 61.46 | | |
| Ag-$TiO_2$/GO | 1 | 110.24 | 58.81 | 46.66 | 45.50 | 1.10 |
| | 2 | 110.24 | 61.21 | 44.48 | | |
| | 3 | 110.24 | 60.22 | 45.37 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ค-2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ ภายใต้แสงที่มองเห็นได้**

**ตาราง ค-2** ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยโฟโตคะตะลิสต์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้

| คะตะลิสต์ | ซ้ำที่ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (ppm) | การกำจัด (%) | ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%) | S.D. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 1 | 109.29 | 72.14 | 33.99 | 33.63 | 2.32 |
| | 2 | 109.29 | 75.25 | 31.14 | | |
| | 3 | 109.29 | 70.22 | 35.75 | | |
| 0.5% Ag-$TiO_2$ | 1 | 110.29 | 34.54 | 68.68 | 66.23 | 2.58 |
| | 2 | 110.29 | 36.97 | 66.48 | | |
| | 3 | 110.29 | 40.21 | 63.54 | | |
| 1% Ag-$TiO_2$ | 1 | 107.75 | 34.94 | 67.57 | 67.08 | 0.49 |
| | 2 | 107.75 | 36.00 | 66.59 | | |
| | 3 | 107.75 | 35.46 | 67.09 | | |
| 2% Ag-$TiO_2$ | 1 | 108.22 | 45.38 | 58.06 | 58.00 | 0.53 |
| | 2 | 108.22 | 46.05 | 57.44 | | |
| | 3 | 108.22 | 44.91 | 58.50 | | |
| GO-$TiO_2$ | 1 | 107.23 | 56.96 | 46.88 | 45.64 | 1.17 |
| | 2 | 107.23 | 59.46 | 44.55 | | |
| | 3 | 107.23 | 58.47 | 45.48 | | |
| Ag-$TiO_2$/GO | 1 | 109.39 | 32.33 | 70.45 | 69.26 | 1.06 |
| | 2 | 109.39 | 33.98 | 68.94 | | |
| | 3 | 109.39 | 34.57 | 68.40 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ค-3** ผลการทดลองหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

**ตาราง ค-3** ผลการทดลองหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดสแตนเลสเคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

| จำนวนชั้น | ซ้ำที่ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (ppm) | การกำจัด (%) | ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%) | S.D. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 105.30 | 77.56 | 26.34 | 25.62 | 0.75 |
| | 2 | 105.30 | 78.25 | 25.68 | | |
| | 3 | 105.30 | 79.13 | 24.85 | | |
| 3 | 1 | 107.02 | 34.54 | 67.72 | 65.20 | 2.66 |
| | 2 | 107.02 | 36.97 | 65.46 | | |
| | 3 | 107.02 | 40.21 | 62.43 | | |
| 5 | 1 | 107.84 | 24.85 | 76.96 | 75.74 | 1.09 |
| | 2 | 107.84 | 27.10 | 74.87 | | |
| | 3 | 107.84 | 26.55 | 75.38 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค-4** ผลการทดลองหากำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

**ตาราง ค-4** ผลการทดลองหากำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

| กำลังไฟ (วัตต์) | ซ้ำที่ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (ppm) | การกำจัด (%) | ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%) | S.D. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 18 | 1 | 106.00 | 80.38 | 24.17 | 24.03 | 1.31 |
| | 2 | 106.00 | 81.99 | 22.65 | | |
| | 3 | 106.00 | 79.22 | 25.27 | | |
| 36 | 1 | 105.03 | 56.39 | 46.31 | 45.03 | 1.38 |
| | 2 | 105.03 | 59.28 | 43.56 | | |
| | 3 | 105.03 | 57.55 | 45.21 | | |
| 72 | 1 | 107.84 | 24.85 | 76.96 | 75.74 | 1.09 |
| | 2 | 107.84 | 27.10 | 74.87 | | |
| | 3 | 107.84 | 26.55 | 75.38 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค-5** ผลการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

**ตาราง ค-5** ผลการทดลองหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

| อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที) | ซ้ำที่ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (ppm) | การกำจัด (%) | ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%) | S.D. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 1 | 105.63 | 20.34 | 80.74 | 78.99 | 1.52 |
| | 2 | 105.63 | 23.24 | 78.00 | | |
| | 3 | 105.63 | 23.00 | 78.23 | | |
| 300 | 1 | 105.00 | 23.86 | 77.28 | 76.70 | 0.73 |
| | 2 | 105.00 | 25.32 | 75.89 | | |
| | 3 | 105.00 | 24.20 | 76.95 | | |
| 500 | 1 | 107.84 | 28.23 | 73.82 | 72.22 | 1.41 |
| | 2 | 107.84 | 31.10 | 71.16 | | |
| | 3 | 107.84 | 30.55 | 71.67 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ง

**ง-1 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี**

**One-way ANOVA:**

**Factor of Variance**

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Factor | 2 | Flu, UV-C |

**Analysis of Variance**

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Factor | 1 | 846.3 | 846.3 | 4.86 | 0.034 |
| Error | 34 | 5916.0 | 174.0 | | |
| Total | 35 | 6762.3 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างกันภายใต้การใช้ฟลูออเรสเซนต์และยูวีซี โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Light source | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| Flu | 18 | 56.64 | A |
| UV-C | 18 | 46.94 | B |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-2 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีซี**

**One-way ANOVA:**

**Factor of Variance**

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Cat. | 6 | $TiO_2$, 0.5% Ag-$TiO_2$, 1% Ag-$TiO_2$, 2% Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$, Ag-$TiO_2$/GO |

**Analysis of Variance**

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Cat. | 5 | 2828.37 | 565.673 | 360.55 | 0.000 |
| Error | 12 | 18.83 | 1.569 | | |
| Total | 17 | 2847.19 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างกันภายใต้แสงยูวีซี โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Cat. | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 3 | 64.20 | A |
| 0.5% Ag-$TiO_2$ | 3 | 43.01 | C |
| 1% Ag-$TiO_2$ | 3 | 32.68 | D |
| 2% Ag-$TiO_2$ | 3 | 33.62 | D |
| GO-$TiO_2$ | 3 | 62.65 | A |
| Ag-$TiO_2$/GO | 3 | 45.50 | B |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-3 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Cat. | 6 | $TiO_2$, 0.5% Ag-$TiO_2$, 1% Ag-$TiO_2$, 2% Ag-$TiO_2$, GO-$TiO_2$, Ag-$TiO_2$/GO |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Cat. | 5 | 3038.72 | 607.745 | 242.12 | 0.000 |
| Error | 12 | 30.12 | 2.510 | | |
| Total | 17 | 3068.84 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่แตกต่างกันภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Cat. | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 3 | 33.63 | E |
| 0.5% Ag-$TiO_2$ | 3 | 66.23 | B |
| 1% Ag-$TiO_2$ | 3 | 67.09 | A B |
| 2% Ag-$TiO_2$ | 3 | 58.00 | C |
| GO-$TiO_2$ | 3 | 45.64 | D |
| Ag-$TiO_2$/GO | 3 | 69.26 | A |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-4 ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีซี**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Percent | 4 | $TiO_2$, 0.5% Ag-TiO2, 1% Ag-$TiO_2$, 2% Ag-$TiO_2$ |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Percent | 3 | 1929.51 | 643.170 | 380.87 | 0.000 |
| Error | 8 | 13.51 | 1.689 | | |
| Total | 11 | 1943.02 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-$TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงยูวีซี โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Cat. | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 3 | 64.20 | A |
| 0.5% Ag-$TiO_2$ | 3 | 43.01 | B |
| 1% Ag-$TiO_2$ | 3 | 32.68 | C |
| 2% Ag-$TiO_2$ | 3 | 33.62 | C |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-5 ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Percent | 4 | $TiO_2$, 0.5% $Ag\text{-}TiO_2$, 1% $Ag\text{-}TiO_2$, 2% $Ag\text{-}TiO_2$ |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Percent | 3 | 2195.81 | 731.938 | 233.13 | 0.000 |
| Error | 8 | 25.12 | 3.140 | | |
| Total | 11 | 2220.93 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบสัดส่วนในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2$) ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Cat. | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| $TiO_2$ | 3 | 33.63 | C |
| 0.5% $Ag\text{-}TiO_2$ | 3 | 66.23 | A |
| 1% $Ag\text{-}TiO_2$ | 3 | 67.09 | A |
| 2% $Ag\text{-}TiO_2$ | 3 | 58.00 | B |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-6 ผลของการเปรียบเทียบจำนวนชั้นของ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Column | 3 | 1, 3, 5 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Column | 2 | 4188.97 | 2094.48 | 714.07 | 0.000 |
| Error | 6 | 17.60 | 2.93 | | |
| Total | 8 | 4206.56 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบจำนวนชั้นของ 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Column layer | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 25.62 | C |
| 3 | 3 | 65.20 | B |
| 5 | 3 | 75.74 | A |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-7 ผลของการเปรียบเทียบกำลังไฟของหลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Light | 3 | 18, 36, 72 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Light | 2 | 4057.72 | 2028.86 | 1260.04 | 0.000 |
| Error | 6 | 9.66 | 1.61 | | |
| Total | 8 | 4067.38 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบกำลังของแหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซ ฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Light power (watts) | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| 18 | 3 | 24.03 | C |
| 36 | 3 | 45.03 | B |
| 72 | 3 | 75.74 | A |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ง-8 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลส 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์**

One-way ANOVA:

Factor of Variance

| Factor | Levels | Values |
|---|---|---|
| Flow rate | 3 | 200, 300 ,500 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| Flow rate | 2 | 71.159 | 35.579 | 22.02 | 0.002 |
| Error | 6 | 9.697 | 1.616 | | |
| Total | 8 | 80.856 | | | |

**ผลของการเปรียบเทียบอัตราการไหลที่เหมาะสม โดยใช้แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วย 0.5% ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ จำนวน 5 ชั้น ในการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์จากแหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ 72 วัตต์ โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons**

Grouping Inforrmation Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

| Flow rate (ml/min) | N | Mean | Grouping |
|---|---|---|---|
| 200 | 3 | 78.99 | A |
| 300 | 3 | 76.71 | A |
| 500 | 3 | 72.22 | B |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้