การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น

STUDY ON OPTIMUM CONDITIONS FOR REMOVAL OF FORMALDEHYDE FROM AIR BY PHOTOCATALYSIS USING SILVER–DOPED TiO_2 UNDER VISIBLE LIGHT

ชญตา ไสโยธา

ปรีญาพัชญ์ เขมรัชต์บุรานนท์

ปัทมาพร ธูปหอม

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON OPTIMUM CONDITIONS FOR REMOVAL OF FORMALDEHYDE FROM AIR BY PHOTOCATALYSIS USING SILVER–DOPED TiO_2 UNDER VISIBLE LIGHT

CHAYATA SAIYOTHA
PRIYAPHAT KHEMMARATBURANON
PATTAMAPORN TOOPHOM

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น Study on Optimum Conditions for Removal of Formaldehyde from Air by Photocatalysis using Silver – doped TiO_2 under Visible Light
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชญตา ไสโยธา รหัสนักศึกษา 58050597 นางสาวปรีญาพัชญ์ เขมรัชต์บุรานนท์ รหัสนักศึกษา 58050646 นางสาวปัทมาพร ธูปหอม รหัสนักศึกษา 58050649
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชญตา ไสโยธา รหัสนักศึกษา 58050597
	นางสาวปรีญาพัชญ์ เขมรัชต์บุรานนท์ รหัสนักศึกษา 58050646
	นางสาวปัทมาพร ธูปหอม รหัสนักศึกษา 58050649
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน) 18 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการทดสอบในตู้ปฏิกรณ์ขนาด 50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่บรรจุคอลัมน์ขนาด 6×6×26.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีลวดสแตนเลสเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา $Ag\text{-}TiO_2$ ที่สัดส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ได้แก่ อัตราการไหลของก๊าซ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มแสง และจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์เตรียมโดยให้ความร้อนสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือโดยการดูดซับโดยสารดูดซึม จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน จำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 72.63±1.70 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพแผ่นลวด $Ag\text{-}TiO_2$ ที่ใช้ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศสามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง

คำสำคัญ : ไทเทเนียมไดออกไซด์, ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์, ฟอร์มาลดีไฮด์, แสงที่ตามองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study on Optimum Conditions for Removal of Formaldehyde from Air by Photocatalysis using Silver-doped TiO_2 under visible Light		
Students	Miss Chayata	Saiyotha	Student ID 58050597
	Miss Priyaphat	Khemmaratburanon	Student ID 58050646
	Miss Pattamaporn	Toophom	Student ID 58050649
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

Abstract

This special project studied a removal of formaldehyde in air by photocatalysis using silver-titanium dioxide (Ag-TiO_2) as a catalysts. Fluorescent lamps 18 watts (1,030 lumen) was used as a light source. The experiment was carried out in a laboratory scale. An acrylic column (size 6x6x26.5 cm^3) containing stainless steel wire coated with Ag-TiO_2 1 : 15 by weight was placed in a wood box (size 50x45x80 cm^3). The optimum conditions for the removal efficiency of formaldehyde in air were investigated e.g. flow rate of gas, contact time, light intensity and number layer of Ag-TiO_2. Formaldehyde gas was prepared by heating 20 ppm formaldehyde solution at 60-70°C. After treatment, the remained formaldehyde was trapped with absorbent and then measured by spectrophotometer at wavelength 410 nm. Repeatability of the use of silver-droped TiO_2 catalyst was also examined. The results showed that the optimum conditions for removal of formaldehyde in air were flow rate 200 mL/min, contact time 30 min, light intensity 1,030 lumen, Ag-TiO_2 2 layer. Under these optimum conditions, the removal efficiency of formaldehyde in air was 72.63 ±1.70 %. Ag-TiO_2 catalyst could reuse twice.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความกรุณาและความร่วมมือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูนที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือ เสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่อง ปรับปรุงและเอาใจใส่ใจรายละเอียดของโครงงานพิเศษ จนโครงงานพิเศษฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องของอุปกรณ์และสารเคมี เสนอแนะ และเอาใจใส่อย่างละเอียด

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบโครงงานพิเศษ และ ผศ.ดร.ชมพูนุช ไชยรักษ์ กรรมการสอบโครงงานพิเศษ

ขอขอบคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยเอื้ออำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณ พ่อ-แม่ ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ชญตา ไสโยธา
ปรีญาพัชญ์ เขมรัชต์บุรานนท์
ปัทมาพร ธูปหอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูป ..... ช
คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ซ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์ 4
2.1.1 ประโยชน์ของฟอร์มาลดีไฮด์ 5
2.1.2 อันตรายจากการได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 5
2.1.3 การปฐมพยาบาลเบื้องต้นเมื่อได้รับสาร 6
2.1.4 วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 6
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ 7
2.2.1 คุณสมบัติเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ 7
2.2.2 ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ 7
2.2.3 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 8
2.2.4 การได้รับเข้าสู่ร่างกาย 10
2.2.5 ความเป็นพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ 11
2.3 แสง 11
2.3.1 แสงฟลูออเรสเซนต์ 12
2.3.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 12
2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของหลอดฟลูออเรสเซนต์ 13
2.3.4 อันตรายจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 13
2.4 หลักการทำงานของโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ 13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 19
3.1 วัสดุหรืออุปกรณ์ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1 สารเคมี 19
3.1.2 วัสดุหรืออุปกรณ์ 20
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย 21
3.2.1 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ 21
3.2.2 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส 21
3.2.3 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 23
3.2.4 ศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 25
3.2.5 ศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 26
3.2.6 ศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 26
3.2.7 ศึกษาประสิทธิภาพแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น 26
3.2.8 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 28
4.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 28
4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 29
4.3 ผลการศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 30
4.4 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ 31
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น 32
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 33
5.1 สรุปผลการวิจัย 33
5.2 ข้อเสนอแนะ 33
เอกสารอ้างอิง 34
ภาคผนวก ก 39
ภาคผนวก ข 44
ภาคผนวก ค 46
ภาคผนวก ง 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ ก-4 ค่าการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 36.5-38% 41
ตารางที่ ก-5 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 500 nm ของฟอร์มาลดีไฮด์ 42
ตารางที่ ก-6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 43
ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัด 46
ฟอร์มาลดีไฮด์ที่เวลา 30 นาที ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน
ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์..... 47
ที่อัตราการไหล 200 mL/min ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน
ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์..... 48
ที่อัตราการไหล 200 mL/min เวลา 30 นาที
ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 49
เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่อัตราการไหล 200 mL/min เวลา 30 นาที
ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวด 50
ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในสภาวะที่เหมาะสม
ตารางที่ ง-1 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัด..... 51
ฟอร์มาลดีไฮด์
ตารางที่ ง-2 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัด 52
ฟอร์มาลดีไฮด์
ตารางที่ ง-3 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัด..... 53
ฟอร์มาลดีไฮด์
ตารางที่ ง-4 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของจำนวนชั้นของแผ่นลวด 54
ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์
ตารางที่ ง-5 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวด..... 55
ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในสภาวะที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)..... 7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์ อนาเลส และบรูคไคท์ 8
รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์..... 12
รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ 15
รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์..... 15
รูปที่ 3.1 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส..... 22
รูปที่ 3.2 คอลัมน์อะคริลิกบรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์..... 22
รูปที่ 3.3 ระบบการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 24
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์..... 28
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์..... 29
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์..... 30
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม 31
ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำในการกำจัด..... 32
ฟอร์มาลดีไฮด์
รูปที่ ก-5 กราฟค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-500 nm ของฟอร์มาลดีไฮด์..... 41
รูปที่ ก-6 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์..... 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
FLU	แสงฟลูออเรสเซนต์
TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์
Ag-TiO_2	ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์
nm	นาโนเมตร
PVP	พอลิไวนิลไพโรลิโดน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในชุมชน รวมถึงก่อให้เกิดโรคทางระบบทางเดินหายใจและอาจถึงขั้นเสียชีวิต และผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป มลพิษอากาศอาจเป็นสิ่งที่มองเห็นหรือสัมผัสได้ แต่มีมลพิษหลายชนิดที่เป็นอันตรายที่ไม่มีสีไม่มีกลิ่น ซึ่งสารมลพิษในบรรยากาศมีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์ ไฟไหม้ป่า การระเบิดของภูเขาไฟ และแหล่งกำเนิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น โรงงานอุตสาหกรรม การจราจร การเผาขยะชุมชน

ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ลักษณะโดยทั่วไปเป็นสารที่ใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน จัดเป็นสารรีดิวซ์ที่รุนแรง ฟอร์มาลดีไฮด์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมการแปรรูปไม้และผลิตไม้อัด อุตสาหกรรมการผลิตเรซินสังเคราะห์ นอกจากนี้ ยังพบการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ได้ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก งานเคลือบ ใช้ป้องกันรอยยับในอุตสาหกรรมเสื้อผ้า (บังอร, 2558) ฟอร์มาลดีไฮด์นั้นปกติจะอยู่ในรูปแก๊ส แต่ถ้าถูกทำให้อยู่ในรูปสารละลายที่เป็นของเหลวจะเรียกว่าฟอร์มาลิน (Formalin) ฟอร์มาลินถูกนำไปใช้ในทางที่ผิดคือ ลักลอบผสมในอาหาร เพื่อช่วยให้อาหารคงความสด ไม่เน่าเสียได้ง่ายและเก็บรักษาได้นาน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กับอาหารที่เน่าเสียได้ง่าย เช่น ผักสดชนิดต่างๆ อาหารทะเลสดและเนื้อสัตว์ เป็นต้น ซึ่งสารฟอร์มาลินจะมีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและทางการแพทย์เท่านั้น ห้ามนำมาใส่อาหารเพื่อรักษาสภาพอาหาร กระทรวงสาธารณสุขจึงกำหนดให้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลิน เป็นวัตถุห้ามใช้ในอาหาร ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 151 (พ.ศ. 2536) แห่งพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ.2522 (พิมพ์เพ็ญ, 2558) หากสูดดมสารนี้ในปริมาณสูงและเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดระคายเคือง โดยเฉพาะการอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่เนื้อเยื่อในโพรงจมูกหลอดลม ท่อลม และถุงลมในปอดขึ้นได้ หากได้รับในปริมาณมากจะระคายเคืองอย่างรุนแรงทำให้เกิดปอดอักเสบและหอบหืดได้ อย่างไรก็ตาม การได้รับสารในปริมาณน้อย ๆ อย่างสม่ำเสมอ อาจจะยังไม่เกิดอาการเด่นชัด มีเพียงการเจ็บคอ ไอ จนถึงการอักเสบของหลอดลม เท่านั้น ทั้งนี้มีรายงานว่าถ้าความเข้มข้นของสารฟอร์มาลดีไฮด์ที่ร่างกายได้รับสูงเกิน 0.1 ppm ทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อตา จมูกและทางเดินหายใจ แต่ถ้าได้รับปริมาณเข้มข้นสูงเกิน 100 ppm อาจทำให้หมดสติ และอาจถึงแก่ชีวิตในที่สุด เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงๆ สารฟอร์มาลินจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดฟอร์มิค (Formaic acid) ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายระบบการทำงานของเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย อาการเรื้อรังหากได้รับปริมาณน้อยแต่ระยะยาวจะทำให้เกิดผลเสียกับระบบร่างกายต่างๆ หรือก่อให้เกิดมะเร็งได้ (จุฑารัตน์, 2555) ดังนั้น การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ จะช่วยส่งผลให้สุขภาพของมนุษย์ดีขึ้นและยังช่วยลดสาเหตุของการเกิดโรค ซึ่งวิธีการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์มีได้หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี เช่น การดักจับด้วยไอน้ำ (wet scrubber) และการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยกระตุ้นด้วยรังสียูวีซี เป็นวิธีกำจัดอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์จะถูกสลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ อย่างไรก็ตามรังสียูวีซีที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยานั้นก่อให้เกิดอันตรายโดยอาจทำให้เกิดกระจกตาอักเสบ รู้สึกแสบตา มะเร็งผิวหนัง ทำลายเซลล์เม็ดเลือดขาวและทำลายระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย ดังนั้นการใช้แสงฟลูออเรสเซนต์ซึ่งมีอันตรายน้อยกว่ามาแทนรังสียูวีซีในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จึงได้เริ่มมีผู้สนใจศึกษา แต่ยังมีผู้ศึกษาการกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิส ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ไม่มากนัก

โครงงานพิเศษนี้ ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($Ag\text{-}TiO_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้สัดส่วน Ag ต่อ TiO_2 1 : 15 โดยน้ำหนัก ไปศึกษาหาอัตราการไหลของก๊าซ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์และจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ รวมทั้ง ศึกษาประสิทธิภาพการใช้แผ่นลวด $Ag\text{-}TiO_2$ ซ้ำ สำหรับการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศภายใต้แสงที่ตามองเห็น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น

2. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศซ้ำ ด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสภายใต้แสงที่ตามองเห็น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. สร้างคอลัมน์ขนาด 6×6×26.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่แผ่นลวดสแตนเลสที่เคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ขนาด 8×8 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ไว้ในตู้ปฏิกรณ์ ขนาด 50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์ (1,030 lumen) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด อยู่ภายใน

2. ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น โดยให้ความร้อนแก่สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 20 ppm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศไหลที่อัตราการไหล 200, 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ด้วยสารดูดซึมประกอบด้วย แอมโมเนียแอซิเตท สต็อกกรดอะซิติก และสารละลายแอซิติลแอซิโตน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น โดยให้ความร้อนแก่สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 20 ppm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศไหลที่อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง เป็นเวลา 20, 30 และ 40 นาที ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ด้วยสารดูดซึม แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

4. ศึกษาความเข้มแสงจากหลอดฟลูออกเรสเซนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์ที่สร้างบรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็น โดยให้ความร้อนแก่สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 20 ppm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศไหลที่อัตราการไหล และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลอง แปรค่าความเข้มแสง 0, 1,030, 2,060 และ 4,120 ลูเมน ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ด้วยสารดูดซึม แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

5. ศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์ที่สร้างบรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็นโดยให้ความร้อนแก่สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 20 ppm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศไหลที่อัตราการไหล ระยะเวลาสัมผัส และความเข้มแสงที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยศึกษาแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จำนวน 1 และ 2 ชั้น ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ด้วยสารดูดซึม แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

6. ศึกษาประสิทธิภาพการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ โดยนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง มาศึกษาการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ จำนวน 5 ครั้ง ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ด้วยสารดูดซึม แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดปริมาณมลพิษทางอากาศ
2. ลดอันตรายที่เกิดจากการใช้รังสียูวีซี ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
3. สามารถประยุกต์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลเวอร์–ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่ตามองเห็นในการบำบัดมลพิษอากาศชนิดอื่น ๆ โดยวิธีโฟโตคะตะไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์ (เคมีอุตสาหกรรม, 2560)

สารฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) จัดเป็นสารกลุ่ม Non-chlorinated VOCs มีสถานะเป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุนแสบจมูก ทำให้สำลัก หายใจไม่ออก เป็นก๊าซไวไฟ ถ้าอยู่ในรูปของก๊าซเรียกชื่ออื่น ๆ ว่า Methanal, Methyl aldehyde, Methyleneoxide ถ้าอยู่ในรูปของสารละลายเรียกชื่อว่า Formalin (30-50 % formaldehyde โดยน้ำหนักปกติ จะประกอบด้วย 6-20 % methanol) มีน้ำหนักโมเลกุล 30.0 จุดเดือด –3 องศาฟาเรนไฮด์ จุดวาบไฟ 122-185 องศาฟาเรนไฮด์ อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง 806 องศาฟาเรนไฮด์ ฟอร์มาลดีไฮด์ที่อยู่ในรูปของเหลวเป็นสารติดไฟ Class IIIB จะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์อย่างแรง ด่างและกรดฟีนอล ยูเรีย โดยปกติคนสามารถได้รับกลิ่นของฟอร์มาลดีไฮด์ในระดับที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ppm (Odour Threshold = 0.8 ppm) ฟอร์มาลดีไฮด์ละลายได้ดีในน้ำ แอลกฮอล์ และ อีเทอร์ (กรมอนามัย, 2558) เป็นสารที่เกิดโดยธรรมชาติ มีความสำคัญต่อกระบวนการเกี่ยวกับการสันดาปอาหารของพืชและสัตว์ และยังสามารถพบได้ในธรรมชาติที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ท่อไอเสียรถยนต์ การเผาหญ้า การเผาไม้ เตาหม้อต้มอุตสาหกรรมและจากควันบุหรี่ เป็นต้น ในทางการค้านิยมใช้อยู่ในรูปของสารละลายในน้ำ ที่ประกอบด้วยความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นประมาณ 37-50% โดยน้ำหนัก ซึ่งสารนี้เป็นอนุพันธุ์ของสารในกลุ่มอะลิฟาติกแอลดีไฮด์ มีสูตรเคมี คือ HCHO หรือ CH_2O สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทิลแอลกอฮอล์กับออกซิเจน โดยใช้ทองแดงหรือเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา มีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างไปจากสารประกอบในกลุ่มแอลดีไฮด์ทั่วไป เนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์มีไฮโดรเจนเพียงอะตอมเดียว (H) ที่เกาะกับหมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) และไม่มีอนุมูลของหมู่อัลคิลในโมเลกุล จึงเป็นสารที่มีความไวต่อปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่อยู่ในสถานะของก๊าซที่ไม่เสถียร โดยจะเปลี่ยนแปลงเป็นกรดฟอร์มิกเพิ่มขึ้นตลอดเวลา โดยเฉพาะการเก็บรักษาในอุณหภูมิสูง การเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำจะช่วยลดอัตราการเกิดกรดได้ แต่มีข้อเสียคือ จะทำให้เกิดพาราฟอร์มาลดีไฮด์ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนตามมา ดังนั้นจึงต้องเติมสารปรับเสถียร เช่น เมทานอล ในความเข้มข้นประมาณ 5-15% จะทำให้สารฟอร์มาลีนอยู่ในรูปของพาราฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งค่อนข้างมีความเสถียรหรือคงตัว เหมาะแก่การนำไปใช้ในด้านต่างๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อพาราฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ในภาวะอุณหภูมิประมาณ 4.4 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนรูปไปเป็นพอลิเมอร์พาราฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนและเป็นพิษต่อร่างกาย เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะสัตว์น้ำได้ กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงจัดให้สารนี้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 โดยการผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือมีไว้ครอบครองต้องแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบก่อนและต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ ซึ่งการผลิตหรือการนำเข้าต้องขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย (จุฑารัตน์, 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประโยชน์ของฟอร์มาลดีไฮด์ (บังอร, 2558)

1. ด้านการแพทย์ นำไปใช้ในการคงสภาพไม่ให้ย่อยสลาย หรือเก็บรักษาเนื้อเยื่อทางกายวิภาค เพื่อนำไปวิเคราะห์และวินิจฉัย รวมไปถึงการฆ่าเชื้อโรคในเครื่องมือต่างๆ และไอระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ยังสามารถนำมาอบห้องเพื่อฆ่าเชื้อโรคในโรงพยาบาลได้อีกด้วย

2. ด้านอุตสาหกรรม นำไปใช้ในกระบวนการผลิตวัสดุต่างๆหลายชนิด เช่น การผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ ใช้เป็นกาวสำหรับเฟอร์นิเจอร์ไม้ ใช้ในวัสดุก่อสร้าง ใช้ทำโฟม ใช้ในการผลิตเรซิน ใช้ในการสังเคราะห์สีต่าง ๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะครีลิก ใช้ในการย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่น ใช้ในการฟอกสี งานด้านการพิมพ์ การฟอกหนัง นำไปผสมโลหะเพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อรักษาผ้าไม่ให้ยับย่น ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้ ใช้ผสมในสีทาบ้าน วอลเปเปอร์พลาสติก กาว ผ้าใยสังเคราะห์ น้ำยาเคลือบเงา ไม้ พรมสังเคราะห์ น้ำยาทำความสะอาด และกระดาษทิชชู เป็นต้น จากลักษณะดังกล่าวจะเห็นว่าสารนี้เป็นส่วนผสมในวัสดุต่าง ๆ อยู่รอบตัวเรา ทั้งนี้กรมโรงงานอุตสาหกรรมรายงานปริมาณการใช้ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์มากที่สุดถึงร้อยละ 70 ของปริมาณการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ทั้งหมด

3. ด้านความงาม นำไปใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางเพื่อป้องกันไม่ให้เหงื่อออก และผสมในยาทาเล็บ ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก ครีมโกนหนวด ยาระงับกลิ่นตัว รวมไปถึงการผลิตแชมพูของสัตว์เลี้ยง ทั้งนี้การใช้ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าว เพื่อเป็นการฆ่าเชื้อเท่านั้น และจะต้องใช้ในปริมาณที่ต่ำมาก เนื่องจากมีการศึกษาพบว่าสารนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดอาการแพ้

4. ด้านการเกษตร นำไปใช้ในการทำลายหรือป้องกันจุลินทรีย์ที่ทำให้ต้นไม้เป็นโรค ใช้ฆ่าเชื้อราในดิน ป้องกันความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรในระหว่างการขนส่ง ช่วยเก็บรักษาผลผลิตให้สามารถเก็บไว้ได้นานทั้งผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ จึงมักมีข่าวตรวจพบแม่ค้าผสมสารฟอร์มาลีนในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ เช่น หมู ไก่ กุ้ง ปลาหมึก เป็นต้น

2.1.2 อันตรายจากการได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ (ไพรจิตต์, 2559)

ในกรณีที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณที่น้อย ร่างกายจะสามารถกำจัดได้ แต่หากได้รับในปริมาณที่สูงขึ้นหรือมีความเข้มข้นสูงขึ้น ฟอร์มาลดีไฮด์จะเปลี่ยนเป็นกรดฟอร์มิก (Formic acid) ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายการทำงานของเซลล์ในร่างกาย อาจทำให้เซลล์ตายได้ และมีผลกระทบต่อระบบต่างๆ ทั่วร่างกาย ดังนี้

1. อันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เมื่อมีการสูดดมสารนี้ในปริมาณสูงและเป็นระยะเวลานาน จะทำให้ระคายเคือง โดยเฉพาะการอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่เนื้อเยื่อในโพรงจมูก หลอดลม ท่อลม และถุงลมในปอดขึ้นได้ และในกรณีที่รุนแรงอาจทำให้เกิดน้ำท่วมปอด (Pneumonia) หายใจลำบาก แน่นหน้าอก จนอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ อย่างไรก็ตาม การได้รับในปริมาณที่น้อยอย่างสม่ำเสมอ อาจจะยังไม่ได้เกิดอาการเด่นชัด มีเพียงอาการเจ็บคอ ไอ จนถึงการอักเสบของหลอดลมเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อรับประทานอาหารที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณมาก หรือประมาณ 30 - 60 มิลลิลิตร จะทำให้ปวดศีรษะอย่างรุนแรง หัวใจเต้นเร็ว แน่นหน้าอก ปากและคอแห้ง คลื่นไส้อาเจียน ท้องเดิน หมดสติ เกิดแผลในกระเพาะอาหาร และอาจทำให้เสียชีวิตได้

3. อันตรายต่อผิวหนัง เมื่อมีการสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้เกิดผื่นคัน ผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน จนถึงผิวหนังไหม้เป็นสีขาวได้

4. อันตรายต่ออวัยวะอื่นๆ เมื่อได้รับฟอร์มาลดีไฮด์อย่างสม่ำเสมอ จะเกิดพิษต่อระบบประสาท พิษต่อเลือด พิษทางพันธุกรรม พิษต่อระบบสืบพันธุ์ และอาจเกิดมะเร็งในปอดและโพรงจมูก เป็นต้น

2.1.3 การปฐมพยาบาลเบื้องต้นเมื่อได้รับสาร (จุฑารัตน์, 2555)

กรมควบคุมโรงงานอุตสาหกรรมได้ให้คำแนะนำในการปฐมพยาบาลเบื้องต้นไว้ดังนี้

1. การหายใจเข้าไป ให้รีบเคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกมายังสถานที่อากาศบริสุทธิ์ และให้ผู้ป่วยสูดไอน้ำจากน้ำที่เติมแอมโมเนียสำหรับสูดดมลงไป 2-3 หยด แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

2. การกินเข้าไป ถ้ามีสติห้ามทำให้อาเจียน แต่ควรดื่มน้ำ/นมมากๆ พร้อมกับล้างบริเวณปากผู้ป่วย และให้บ้วนปากด้วยน้ำ แล้วรีบนำส่งแพทย์ทันที

3. การสัมผัสทางผิวหนัง/ดวงตา ให้รีบถอดเสื้อผ้าออก ล้างบริเวณที่สัมผัสสารด้วยน้ำอย่างน้อย 15 นาที หากยังมีการระคายเคืองอยู่ให้รีบไปพบแพทย์ทันที

2.1.4 วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

การจัดการของเสียจากฟอร์มาลดีไฮด์ ต้องดำเนินการอย่างถูกต้อง และจัดเก็บตามลักษณะของของเสีย ดังนี้

1. การกำจัดของเสียที่เป็นก๊าซจากการผลิตไอของสารจากถังเก็บ ถูกดักจับด้วยระบบไอที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางจับไอ (Wet scrubber) ทำให้เกิดน้ำที่ปนเปื้อน ซึ่งต้องนำเข้าบำบัด หากมีฟอร์มาลีนปนเปื้อนสูง อาจนำมากลั่นแยกและกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่หากมีน้อยสามารถนำไปบำบัดได้ต่อไป และการกำจัดก๊าซจากการผลิต เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซของเสียที่มีไฮโดรเจนปนอยู่ ให้เผาที่เตาเผากากของเสีย

2. การกำจัดของเสียที่เป็นของเหลวจากกระบวนการผลิต ของเสียฟอร์มาลีนที่มีพาราฟอร์มาลดีไฮด์หรือสารเคมีอื่นๆผสมอยู่มาก อันเนื่องมาจากการผลิตและไม่สามารถนำไปใช้หรือจำหน่ายได้ หากมีอุปกรณ์ในการกำจัด เช่น เตาเผา สามารถกำจัดโดนผสมกับตัวทำละลายที่ไวไฟและฉีดสารละลายฝอยเข้าไปในเตาเผากากของเสียอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

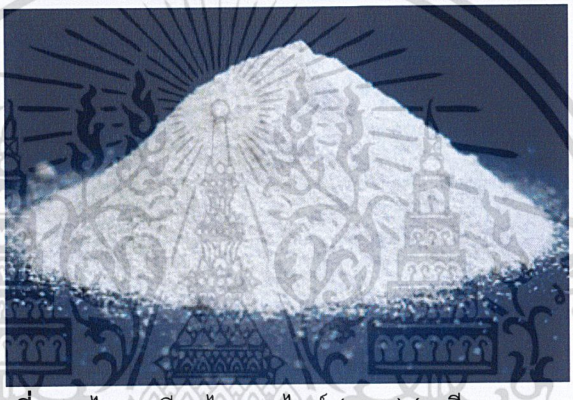
3. การกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งจากกระบวนการผลิต ควรกำจัดพาราฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (ประมาณ 800 องศาเซลเซียส) ไม่ควรฝังกลบ เพราะสลายตัวได้ยากและมีโอกาสปนเปื้อนน้ำใต้ดิน หากสถานที่และวิธีการฝังกลบไม่ได้มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (เคมีอุตสาหกรรม, 2560)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไทเทนิกแอนไฮไดร์ (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania) (รูปที่ 2.1)

ไทเทเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรด-ด่างได้ดี ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่อิลเมไนต์ (Llmenite) หรือลิวโซซีน (Leuxocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี Rutile beach sand



รูปที่ 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) (เคมีอุตสาหกรรม, 2560)

2.2.1 คุณสมบัติเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
2. ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส
4. จุดหลอมเหลว 1,850 องศาเซลเซียส
5. ไม่ละลายน้ำ
6. มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาเคมี ที่ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดอนาเทส เมื่ออยู่ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตหรือภายใต้แสงอาทิตย์ (Photocatalysis)

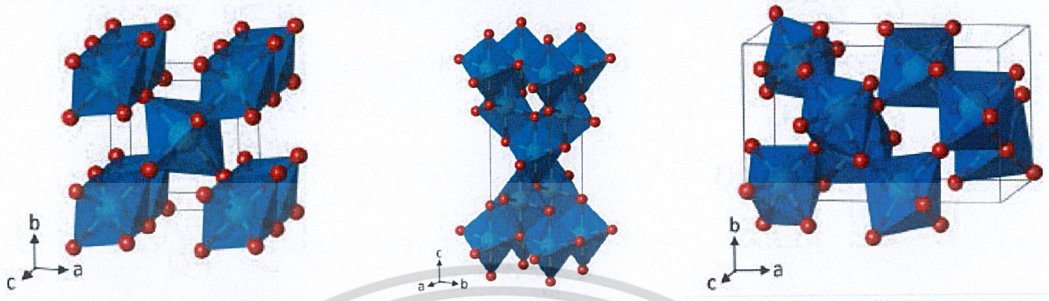
2.2.2 ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์

แบ่งตามโครงสร้างของผลึก (รูปที่ 2.2) ได้แก่

1. รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal crystal system) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิสูง
2. อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal crystal system) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามมิให้ผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บรูคไคท์ (Brookkite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทรอมบิก (Orthorhombic crystal system) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์ อนาเลส และบรูคไคท์ (Esch *et al.*, 2014)

2.2.3 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (Rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (Anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ ได้แก่

1. ใช้สำหรับสารให้สี อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้อง มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืนและหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์ งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้อง การผลิตสุขภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนั้น การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้อีกทาง

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้า มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติมีค่าคงที่ทางไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผงละเอียดสีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาทับ เป็นต้น

6. อุตสาหกรรมพลาสติก นิยมใช้เป็นส่วนผสมของสี หรือน้ำยาเคลือบผิว โดยลักษณะสมบัติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ เป็นลักษณะเฉพาะที่มีค่าดรรชนีหักเหสูง ทำให้ดูดซับแสงอัลตราไวเลตได้ดีทำให้พลาสติกคงทนในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์

7. อุตสาหกรรมยาง ลักษณะสมบัติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ เป็นลักษณะเฉพาะที่มีค่าดัชนีหักเหสูงทำให้ดูดซับแสงอัลตราไวเลตได้ดีทำให้ยางคงทนในการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์

8. อุตสาหกรรมกระดาษ นิยมใช้เป็นส่วนผสมของผงสีในการผลิตกระดาษ ผิว โดยลักษณะสมบัติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ เป็นลักษณะเฉพาะที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ทำให้กระดาษมีสีขาวและสว่าง

9. อุตสาหกรรมก่อสร้าง นิยมใช้เป็นส่วนผสมในการเคลือบผิวกระเบื้อง ผลิตภัณฑ์เซรามิค สุขภัณฑ์ นิยมในผลิตภัณฑ์การทำความสะอาดด้วยตัวเอง ทำให้คราบสกปรกที่มักอยู่ในรูปของสารอินทรีย์สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วย ปฏิกิริยาเคมีทางแสง (Photochemistry) และการฆ่าเชื้อโรค (Antibacteria) ทำให้จุลินทรีย์ต่างๆถูกกำจัดไปด้วยปฏิกิริยาเคมีทางแสง

10. อุตสาหกรรมกระจก นิยมใช้ในการเคลือบผิวกระจก ลักษณะสมบัติที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์คือ การแผ่กระจายของน้ำ (Superhydrophilicity) และการทำความสะอาดด้วยตัวเอง โดยเมื่อน้ำตกกระทบกับพื้นผิวของกระจกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ หยดน้ำจะรวมตัวกันเป็นแผ่นไหลลงมาด้านล่าง ลดการเกาะของหยดน้ำใส ทำให้กระจกไม่เป็นฝ้ามัว ไม่เป็นคราบ คราบฝุ่นต่างๆที่เกาะอยู่ที่ผิวกระจกจะถูกชะล้างออกได้ง่ายเมื่อมีน้ำไหลผ่านอย่างเพียงพอ ซึ่งจะทำความสะอาดพื้นผิวที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ง่ายกว่าหยดน้ำที่แตกกระจายออกเป็นหยดๆ ลักษณะสมบัตินี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระจกไร้ฝ้า (Anti-fog mirror) กระจกรถยนต์ กระจกบนอาคารสูง เป็นต้น รวมไปถึงผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำยาเคลือบต่างๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่ถูกเคลือบที่มีลักษณะเฉพาะตัวในรูปแบบเดียวกัน

11. อุตสาหกรรมผลิตสารเร่งปฏิกิริยา การนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมักนิยมใช้ในส่วนของการเป็น catalytic converter ซึ่งนิยมนำไปใช้กับรถยนต์หรือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ลักษณะสมบัติที่นำไปใช้ในการเป็นผลิตภัณฑ์คือ การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วขึ้น

12. ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

12.1 ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.2 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสง และความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำและอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไก ดังนี้

- สำหรับการต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิล แรดิคัล (OH^-) และซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน (O^{2-}) ออกมาสู่อากาศ และอะตอมดังกล่าวจะเข้าดึงอะตอมไฮโดรเจน และคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่น ทำให้จุลินทรีย์และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป

- สำหรับการบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอัลตราไวโอเลตในช่วงคลื่น 300 - 400 นาโนเมตร จะทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษดังกล่าวทำให้กลายเป็นกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง

- สำหรับบำบัดมลพิษในน้ำ ด้วยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคดังที่กล่าวข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.1

$$C_nO_mH + OH^- + O^{2-} \rightarrow nCO_2 + (n\text{-}m\text{-}1)\ H_2O \qquad (2.1)$$

2.2.4 การได้รับเข้าสู่ร่างกาย (มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2560)

1. การได้รับไทเทเนียมทางการหายใจ

รูปแบบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายได้โดยง่ายอยู่ในรูปของผง หรือละอองลอยที่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์แขวนลอยในอากาศ ซึ่งทำให้เกิดการรับเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงทางการหายใจ เมื่อได้รับไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าสู่ร่างกายแล้วจะทำให้เกิดอาการคัดจมูก ระคายเคืองจมูก ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยใส่หน้ากากป้องกันการหายใจทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน

2. การได้รับไทเทเนียมทางปาก

โดยทั่วไปแล้วการได้รับไทเทเนียมไดออกไซด์โดยทางปากนั้น มักไม่เกิดขึ้นโดยง่าย การได้รับทางปากเกิดขึ้นได้หากมีการปนเปื้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์ขณะปฏิบัติงาน เช่น อาจติดมือเป็นต้น จากนั้นเข้าสู่ปากผ่านอาหาร น้ำดื่ม หรือการสูบบุหรี่ เมื่อได้รับไทเทเนียมไดออกไซด์ทางปากจะไม่แสดงอาการให้เห็นเด่นชัด แต่จะเกิดการสะสมภายในร่างกาย ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการใส่ถุงมือชนิดที่เหมาะสมทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน และทำความสะอาดร่างกายก่อนรับประทานอาหารและน้ำดื่ม

3. การได้รับวัสดุนาโนทางผิวหนัง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปของตะกอนแขวนลอยในของเหลว (น้ำ) จะลดการได้รับไทเทเนียมในรูปของผงจากทางการหายใจ แต่ในขณะปฏิบัติงานกับไทเทเนียมอาจเกิดการหก หรือกระฉอกของของเหลว ทำให้เกิดการได้รับผ่านทางผิวหนังได้ นอกจากนี้ การสัมผัสกับอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานด้วยมือเปล่า เช่น ถุงมือที่ใช้แล้ว เครื่องมือในการสังเคราะห์ ชุดคลุม เป็นต้น อาจทำให้ได้รับไทเทเนียมทางผิวหนังผ่านการสัมผัสได้เช่นกัน ถ้าได้รับทางผิวหนังที่ไม่มีแผลเปิด มักไม่แสดงอาการใดๆ แต่ถ้าได้รับทางผิวหนังที่มีแผลเปิด อาจเกิดอาการระคายเคือง และสามารถเข้าสู่ผิวหนังในชั้นลึกลงไปได้

4. การได้รับไทเทเนียมเข้าสู่ดวงตา

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถปลิวหรือฟุ้ง กระจายเข้าสู่ดวงตาได้ง่าย หากเข้าสู่ดวงตาจะทำให้ตาแดง

2.2.5 ความเป็นพิษของไทเทเนียมไดออกไซด์ (สุพิณ, 2550)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง สารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ สารที่ทำให้ตัวอ่อนในครรภ์เกิดความผิดปกติ หรือสารที่มีพิษ ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ใช่สารที่มีพิษ โดยทั่วไปมีความปลอดภัยในการใช้กับอาหาร ยารักษาโรค สี และเครื่องสำอาง อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาพบว่าอนุภาคขนาดเล็กของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบอนาเทส ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ก่อให้เกิดโรคได้ นอกจากนี้ การบาดเจ็บต่อเซลล์ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ยิ่งขนาดอนุภาคเล็กความเป็นพิษก็ยิ่งมากขึ้น โดยขนาด 70 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านถุงลมในปอดได้ ขนาด 50 นาโนเมตร สามารถแทรกผ่านเซลล์ได้ และขนาด 30 นาโนเมตร สามารถแทรกเข้าสู่ระบบประสานส่วนกลางได้ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกันแดดมีขนาดเล็กอาจสามารถแทรกผ่านเซลล์และนำไปสู่การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสภายในเซลล์ได้ และก่อให้เกิดความเสียหายแก่ DNA เมื่อได้รับแสง ส่งผลให้อาจจะจะก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง การศึกษาโดยการใช้สารกันแดดที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กทุกวันเป็นเวลา 2-4 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่าผิวหนังสามารถดูดซับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กได้

2.3 แสง (จรัส, 2556)

แสงคือพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากอะตอม เป็นกลุ่มก้อนของพลังงานที่มีโมเมนตัมแต่ไม่มีมวล อนุภาคเหล่านี้เรียกว่า “โฟตอน” นั่นคืออิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบ หมุนอยู่รอบนิวเคลียสที่มีประจุบวกซึ่งอิเล็กตรอนมีอยู่หลายตัว แต่ละตัวอยู่ในวงโคจรที่แตกต่างกันพลังงานวัดได้จากระยะห่างจากนิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานในแต่ละระดับแตกต่างกัน โดยอิเล็กตรอนที่มีวงโคจรไกลจากนิวเคลียสมีพลังงานมากกว่าวงโคจรใกล้นิวเคลียส เมื่ออะตอมได้รับพลังงานจากภายนอกอิเล็กตรอนวงโคจรต่ำจะถูกกระตุ้นเปลี่ยนไปอยู่ในวงโคจรสูง ซึ่งไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจะหมุนอยู่ในวงโคจรนี้ชั่วครู่ และตกลงสู่วงโคจรเดิมปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในรูปของโฟตอน ความยาวคลื่นของแสงที่ได้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณของพลังงาน และตำแหน่งของอิเล็กตรอน ดังนั้นอะตอมของธาตุแต่ละประเภท จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน นั่นคือสีของแสงขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมหรือธาตุที่ได้รับการกระตุ้น

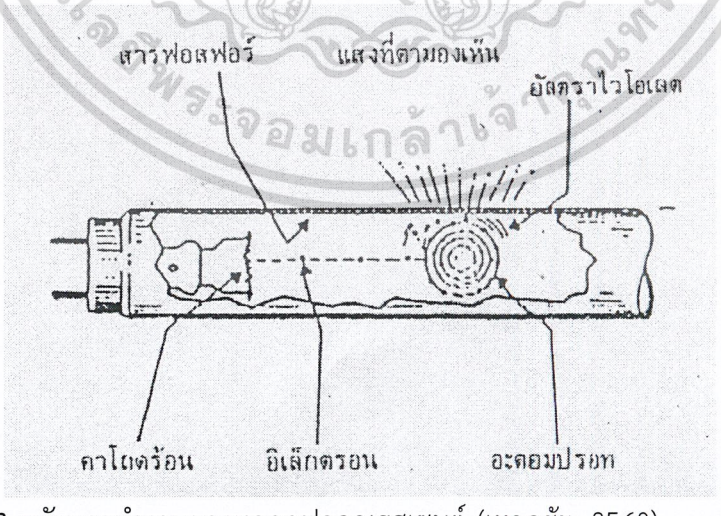
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 แสงฟลูออเรสเซนต์ (เคมีครัวเรือน, 2560)

หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent tube) หรือเรียกหลอดเรืองแสง หลอดฟลูออเรสเซนต์ส่วนมากจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีปลายทั้งสองด้านถูกปิดสนิทด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ตัวหลอดทำด้วยแก้วที่ผนังหลอดด้านในถูกฉาบด้วยผงฟลูออเรสเซนต์หรือสารอื่นๆที่ทำให้เกิดแสงสี ซึ่งทำหน้าที่ในการเรืองแสงให้เป็นสีต่างๆ และสูบอากาศออกจนหมด ก่อนจะบรรจุด้วยไอปรอท และก๊าซเฉื่อย เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านไอปรอทจะทำให้ไอปรอทถูกกระตุ้น และปล่อยพลังงานออกมาในช่วงคลื่นรังสีอัลตราไวโอเลตที่ตามมนุษย์มองไม่เห็น ก่อนจะเข้ากระทบกับสารเรืองแสงที่เคลือบบริเวณผนังหลอดด้านใน หลังจากนั้น จึงเกิดการเรืองแสงเป็นสีต่างๆตามชนิดของสารเรืองแสง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของสารเรืองแสงกับรังสีอัลตราไวโอเลต

2.3.2 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอดฟลูออเรสเซนต์ผ่านขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดร้อนและทำให้สารปล่อย ที่ถูกเคลือบไว้บนไส้หลอดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา นอกเหนือจากอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาโดยความร้อนแล้ว ก็ยังมีอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากความแตกต่างของค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ข้างด้วย อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จากขั้วอิเล็กโทรดขั้วหนึ่งไปยังอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่ง ก่อให้เกิดลำอิเล็กตรอน หรือ อาร์ต ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านไอปรอท ทำให้ไอปรอทได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอน และทำให้หลอดได้รับความร้อนและเพิ่มค่าแรงดันไอปรอทจนถึงจุดที่หลอดจะมีประสิทธิภาพสูงสุด คุณสมบัติสำคัญคือ การก่อให้เกิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และแสงอัลตราไวโอเลต เมื่ออิเล็กตรอนที่หลุดวงโคจรออกมาจะกลับคืนสู่วงจรเดิม พลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร แสงอัลตราไวโอเลตจะถูกเปลี่ยนเป็นแสงที่ตาสามารถมองเห็นได้โดยสารเรืองแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (เทอดชัย, 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (เคมีครัวเรือน, 2560)

ข้อดี อายุการใช้งานนาน ราคาต่ำ มีค่าดัชนีเทียบสีค่อนข้างสูง มีหลากหลายสีให้เลือก สามารถหรี่แสงได้ หลอดไม่ร้อน ทำให้อากาศโดยรอบไม่ร้อน ส่งแสงแบบกระจาย แสงไม่จ้าแยงตา

ข้อเสีย ประสิทธิภาพการกำเนิดแสงยังไม่สูงมากนัก ใช้เวลา 2 - 3 วินาที หลอดจึงจะติด แต่ยกเว้นหลอดชนิดติดเร็ว ต้องใช้สตาร์ทเตอร์ และบัลลาสท์ ต่อพ่วงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ติดตั้งมีน้ำหนักมาก ควบคุมทิศทางของแสงได้ยาก

2.3.4 อันตรายจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (เคมีครัวเรือน, 2560)

1. ปรอท

- พิษเฉียบพลัน เกิดแผลพุพอง เนื้อเยื่อภายในอักเสบ มีเลือดออก อุจจาระเป็นเลือด เจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก ปวดท้อง และมีอาการอาเจียน หมดสติ

- พิษเรื้อรัง เนื้อเยื่อช่องปากอักเสบ เบื่ออาหาร ร่างกายอ่อนเพลีย เนื้อเยื่ออวัยวะภายในถูกทำลาย ไตเสื่อม ปัสสาวะน้อยหรือปัสสาวะไม่ออก ระบบประสาทถูกทำลาย ความจำเสื่อม หูเสื่อม ไม่ได้ยินเสียง สายตามัว มองเห็นไม่ชัด พูดจาไม่ชัด ไม่เป็นคำ มือเท้าชา มีอาการหงุดหงิด และมีอาการทางจิต กล้ามเนื้อใบหน้า มือ และเท้าสั่นกระตุก เป็นโรคผิวหนังหรือผดผื่นได้ง่าย

2. ไอของก๊าซ ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดมะเร็ง

3. เศษแก้ว คมจากเศษแก้วทำให้เกิดบาดแผล

2.4 หลักการทำงานของโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (สรรค์, 2552)

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Phototcatalysis)คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสสารให้เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่เกี่ยวข้องกับตัวคะตะลิสต์ แต่การฉายแสงอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และประจุลบของซุปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียและเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส ได้การเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอินทรีย์กลายเป็นออกไซด์ จนในที่สุดจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสลายก๊าซพิษต่างๆและสารก่อมะเร็ง เช่น acetaldehyde, benzene และ formaldehyde โดยสารกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบคือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) แถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างระหว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กั้นอยู่ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสใน aqueous phase คือ กระบวนการการโฟโตออกซิเดชัน (photo oxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสงซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน E_g ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนที่แถบวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h+vb ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e–cb ซึ่ง h+vb และ e–cb สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้อีกโดยจะเรียกว่า recombination ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในสารละลายเรียกว่า รีดักชัน (reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (donor) ในสารละลายไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (strong oxidation)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะมีแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ประมาณ 3.2 eV จึงจำเป็นต้องใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน มากระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนกับช่องว่างอิเล็กตรอน (hole) ซึ่งกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 390 นาโนเมตร (ช่วงรังสียูวี) ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ จะเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปที่แถบคอนดักชัน (conduction band) ทิ้งช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนไว้ เรียกช่องว่างอิเล็กตรอนนี้ว่า hole ในขณะที่อิเล็กตรอนมีประจุลบ โดยที่ช่องว่างอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนอิเล็กตรอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่เกิดเป็นซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ซึ่งซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถระเหยและสลายไปในอากาศ จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นสามารถย่อยสลายเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และเชื้อไวรัสได้ (ชลดา, 2554) ดังแสดงในสมการที่ 2.2-2.12 (Lua *et al.*, 2015) และรูปที่ 2.4

$$TiO_2 + h\nu \longrightarrow h + e^- \quad (2.2)$$

$$H_2O + h \longrightarrow OH + H^+ \quad (2.3)$$

$$O_2 + e^- \longrightarrow {}^{\bullet}O_2^- \quad (2.4)$$

$$HCHO + {}^{\bullet}OH \longrightarrow {}^{\bullet}CHO + H_2O \quad (2.5)$$

$${}^{\bullet}CHO + {}^{\bullet}OH \longrightarrow HCOOH \quad (2.6)$$

$${}^{\bullet}CHO + {}^{\bullet}O_2^- \longrightarrow HCO_3^- \quad (2.7)$$

$$HCO_3^- + H^+ \longrightarrow HCOOOH \quad (2.8)$$

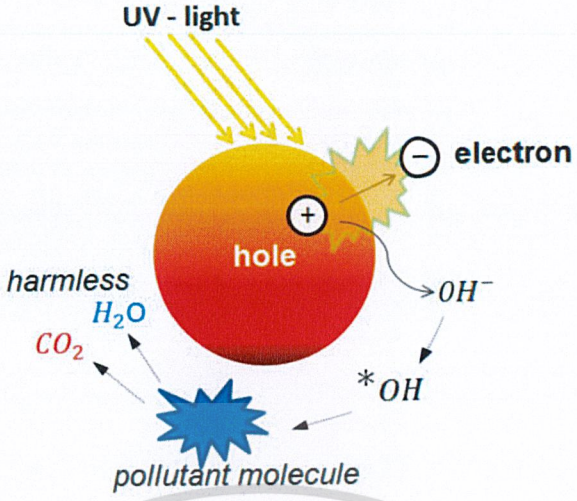
$$HCOOOH + HCHO \longrightarrow CHOOH \quad (2.9)$$

$$CHOOH \longrightarrow HCOO^- \quad (2.10)$$

$$HCOO^- + h^+ \longrightarrow H^+ + {}^{\bullet}CO_2^- \quad (2.11)$$

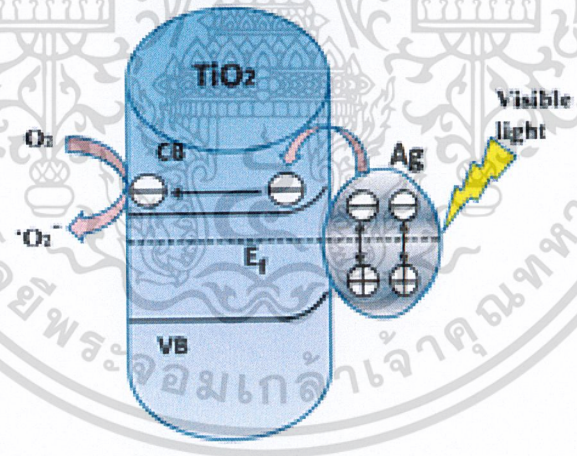
$${}^{\bullet}CO_2^- + [O][{\bullet}OH], h^+ \longrightarrow CO_2 \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์
(Gonzalez-Perez and Persson, 2016)

เมื่อมีการเติมซิลเวอร์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าซิลเวอร์ช่วยลดระดับพลังงานให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์ และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับแสงในช่วงสเปกตรัมที่มองเห็นได้ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์
(Chen *et al.*, 2014)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (อานนท์, 2560)

1. ความเข้มแสง การเพิ่มความเข้มแสงจะทำให้โฟตอนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

2. ปริมาณคะตะลิสต์ เนื่องจากตัวคะตะลิสต์ทำหน้าที่การดูดซับบนพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณคะตะลิสต์จะทำให้พื้นที่ผิวของการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย มีผลต่อปฏิกิริยา ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง เนื่องจากในขณะเกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตัวกลางของสารก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้ยับยั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำให้การส่องผ่านของแสงไปยังสารละลายไม่ทั่วถึงทำให้ปฏิกิริยาลดลง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รชานนท์ (2556) ศึกษาการเตรียมวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่าง ไทเทเนียมไดออกไซด์กับซิลิกอนไดออกไซด์ และนำไปเคลือบลงบนผิวเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียนเพื่อกำจัดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไอเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ส่วนแรกศึกษาการเตรียมซิลิกอนไดออกไซด์ จากแกลบข้าว โดยการนำแกลบแช่ในสารสะลายกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-1,000 °C ส่วนที่สอง ศึกษาการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ด้วยวิธีการโซล-เจล และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 400-600 °C ส่วนที่สาม ศึกษาการเตรียมวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ ในสัดส่วนต่าง ๆ ด้วยวิธีการโซล-เจล ส่วนที่สี่ ศึกษาการเคลือบวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาผสมลงบนผิวเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียนด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ พ่นเคลือบ และเคลือบด้วยวิธีของชาวบ้านด่านเกวียน และทดสอบประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยการสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันธูป และไอเบนซีน สำหรับการศึกษาในส่วนสุดท้ายคือ การจำลองกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเบื้องต้นโดยอาศัยวิธีการมอลติคาร์โล

เกรียงไกร และคณะ (2558) พัฒนาและศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิลเวอร์ (Ag) เคลือบบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ ที่มีค่าการกรองแสงแตกต่างกันในการสลายสีเมทิลลีนบลู ฟิล์มซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยมีไทเทเนียมบิวทอกไซด์ และซิลเวอร์ไนเทรตเป็นสารตั้งต้นในสัดส่วน Ag : Ti เท่ากับ 1 : 10 โดยโมล จากนั้นเคลือบบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ ด้วยวิธีการหมุนเคลือบ พบว่าผลึกที่ได้เป็นแบบอะนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็นได้มากขึ้น ผลึกซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาด 20-60 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าผลึกของไทเทเนียมขนาด 10-30 นาโนเมตร และประสิทธิภาพการสลายสีเมทิลลีนบลูบนแผ่นพลาสติกใสและบนแผ่นฟิล์มกรองแสงติดรถยนต์ที่มีค่าการกรองแสงร้อยละ 40 ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ สูงสุด 61.68 และ 53.97 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

มานิตย์ และคณะ (2557) ออกแบบและควบคุมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะคู่ที่มีโลหะแพลเลเดียมแป็นปลือกหุ้มและอนุภาคโลหะเงินรูปแผ่นเป็นแกนกลาง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดฟอร์มิก การสังเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการควบคุมการสังเคราะห์อนุภาคนาโนโลหะ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

เงินรูปแผ่นโดยใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์เป็นตัวรีดิวซ์และพอลิเมอร์พอลีไวนิลไพโรลิโดนเป็นสารช่วยเสถียร ขั้นต่อมาเป็นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแพลเลเดียมไอออนและการควบคุมการเกาะของแพลเลเดียมอะตอมบนพื้นผิวของโลหะเงิน ตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนที่เตรียมได้โดยการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวจากเซอร์เฟจ พลาสมอน เรโซแนนซ์สเปกตรัมโดยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี และศึกษาการดูดซับคาร์บอนมอนอกไซด์บนพื้นผิวโดยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นชนิดเปลือกหุ้มแกนกลาง (โลหะเงินและแพลเลเดียม) ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีประสิทธิภาพสูงต่อปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดฟอร์มิกสามารถผลิตก๊าซรวม (ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เท่ากับ 6.25 ลิตร ต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ที่เวลา 1 ชั่วโมง โดยสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเดี่ยวแพลเลเดียมถึง 2.5 เท่า เนื่องจากผลการทำงานร่วมกันของโลหะสองชนิด ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมบัติ เชิงอิเล็กตรอนและสมบัติเชิงโครงสร้าง

เจษฎากรณ์ และคณะ (2560) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้หลอดยูวีซี (254 นาโนเมตร) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอดเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการทดลองในตู้ปฏิกรณ์ขนาด 50×45×80 เซนติเมตร ที่บรรจุคอลัมน์ขนาด 6×6×26.5 เซนติเมตรที่มีลวดสแตนเลสเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ศึกษาสัดส่วนของ Ag:TiO_2 ที่เหมาะสมในการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ โดยแปรค่าที่ 0:1, 1:5, 1:10, 1:15, 1:20, 1:25 และ 1:30 โดยน้ำหนัก วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร จากนั้น นำค่าสัดส่วน Ag:TiO_2 ที่เหมาะสมที่ได้ไปศึกษาการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 31.53 เปอร์เซ็นต์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พ่นอากาศที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านเข้าไปในคอลัมน์เป็นเวลา 10 นาที ดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือด้วยสารดูดซึม จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร จากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO_2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลีนบลูดีกว่าการใช้ TiO_2 เพียงอย่างเดียวทั้งภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทิลีนบลูของ Ag-TiO_2 ภายใต้รังสียูวีซีสูงกว่าภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ สัดส่วนระหว่าง Ag:TiO_2 ที่เหมาะสมในการกำจัดเมทิลีนบลูภายใต้แสงยูวีซีคือ 1:20 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดได้ 44.77±2.52 เปอร์เซนต์ และสัดส่วนระหว่าง Ag:TiO_2 ที่เหมาะสมในการกำจัดสีเมทิลีนบลูภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ คือ 1:15 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดได้ 33.46±1.73 เปอร์เซ็นต์ จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ พบว่า การใช้แผ่นลวดชุบ TiO_2 ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ สามารถกำจัดได้ 61.03±5.39 และ 27.20±1.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้แผ่นลวดเคลือบ Ag-TiO_2 (1:15) ภายใต้รังสียูวีซีและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงฟลูออเรสเซนต์สามารถกำจัดได้ 66.43±3.29 และ 68.33±1.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

Lua *et al.* (2015) ทดลองใช้แผ่นฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกขึ้น เพื่อกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยแผ่นฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ภายใต้รังสี UV 365 นาโนเมตร, UV 254 นาโนเมตร และ UV 254+185 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้ผลพลอยได้เป็นโอโซน ในขณะเดียวกันนั้นโอโซนยังสามารถส่งผลต่อการสลายของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ได้โดยตรง ซึ่งโอโซนที่เป็นผลพลอยจากปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นมีค่าต่ำกว่า 0.214 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นไปตามกำหนดของมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารของประเทศจีน

Jin *et al.* (2011) ศึกษาการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นสารมลพิษในอากาศ โดย Nano-structured TiO_2, Ag-TiO_2 และ Ce-TiO_2 ถูกเตรียมโดยวิธี sol gel ที่อุณหภูมิห้องและใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ photocatalyst โดยศึกษาผลของการเติม Ag/Ce/TiO_2, ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มข้นของออกซิเจน ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น ความยาวคลื่นแสงยูวี ปริมาณ TiO_2 ในการสลายตัวของฟอร์มาลดีไฮด์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติม Ag หรือ Ce ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกได้ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกภายใต้สภาวะการทดลอง อัตราการสลายตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกลดลงด้วยเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์และใช้ความสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงขนาด 254 นาโนเมตรดีกว่า 365 นาโนเมตร ประสิทธิภาพในการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณต่ำกว่า 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 มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกที่ดีที่สุดในตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุหรืออุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) ความเข้มข้น 99.85 เปอร์เซ็นต์ เกรด วิเคราะห์ บริษัท Duksan Pure Chemicals, ประเทศเกาหลี
2. แอซิโตน (Acetone, C_3H_6O) ความเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
3. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ความเข้มข้น 18.01 โมลต่อลิตร เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
4. สารละลายแอซิติลแอซิโตน (Acetyl acetone solution, $C_5H_8O_2$) ความเข้มข้น 99.5 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
5. แอมโมเนียแอซิเตท (Ammonium acetate, CH_3COONH_4) ความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals, ประเทศอินเดีย
6. สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde solution, CH_2O) ความเข้มข้น 36.5-38 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
7. เอทานอล (Ethanol, C_2H_6O) ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ เกรดการค้า องค์การสุรา กรมสรรพสามิต, ประเทศไทย
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
9. พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Sigma-Aldrich, ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulfite, Na_2SO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
11. ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate, $AgNO_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents, ประเทศอิตาลี
12. แอคทิเวเตทคาร์บอน (Activated carbon)
13. ผงผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Degussa P25 (Titanium dioxide, TiO_2) ได้รับความอนุเคราะห์จากวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วัสดุหรืออุปกรณ์

1. เครื่อง UV/Vis Spectrophotometer รุ่น UH5300, บริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องเก็บอากาศ รุ่น GilAtr5, บริษัท Gilian Manufactured by Sensidyne Clear mater, FL. ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวัดอัตราการไหล (High Flow) รุ่น Defender 520-H, บริษัท Bios International Corp ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น Metter Toledo, บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
5. เครื่องพ่นอากาศ รุ่น Millipore, บริษัท Billerica ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องปั่นกวน รุ่น Stuart, บริษัท Cole-Parmer Scientific Experts ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน (Magnetic bar)
8. Hot plate รุ่น MR Hei-Tec, บริษัท Beacthai Bangkok Equipment & Chemical, Co., Ltd. ประเทศไทย
9. ตู้อบ รุ่น Isotermp Oven, บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. เตาอบไมโครเวฟ รุ่น Ceramic Inside, บริษัท Samsung จำกัด ประเทศไทย
11. เทอร์โมมิเตอร์ รุ่น Pt1000 V4A, บริษัท Heidolph Instruments ประเทศเยอรมนี
12. ตู้ปฏิกรณ์ ขนาด 50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร
13. แผ่นลวดสแตนเลส จำนวน 50 ช่อง ต่อ 1 นิ้ว, บริษัท เจริญวิทย์ เทรดดิ้ง จำกัด ประเทศไทย
14. ไมโครปิเปต ขนาด 100-1,000 µL รุ่น Light & Ergonomic Pipette, บริษัท Nichiryo ประเทศญี่ปุ่น
15. ไมโครปิเปต ขนาด 20-200 µL รุ่น Biohit, บริษัท Sartorius ประเทศเยอรมนี
16. เดซิเคเตอร์
17. คอลัมน์อะคริลิก ขนาด 6×6×26.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
18. หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 18 วัตต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน)
19. Water bath
20. กระดาษทรายอะลูมิเนียม
21. ฟอยล์
22. พาราฟิน
23. สายยาง
24. น้ำแข็ง
25. เครื่องแก้วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมแผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์ – ไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดลองนี้เตรียมแผ่นลวดสแตนเลสซิลเวอร์ – ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 : 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองของเจษฎากรและคณะ (2560) โดยมีวิธีเตรียมดังนี้

1. นำแผ่นลวดสแตนเลสตัดให้มีขนาด 8×8×0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วขัดด้วยกระดาษทราย

2. นำแผ่นลวดสแตนเลสจากข้อ 1 แช่น้ำกลั่น เป็นเวลา 10 นาทีและนำไปแช่แอซิโตน ความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำความสะอาด

3. นำแผ่นลวดวางบนถาดอลูมิเนียมที่รองด้วยฟอยล์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

4. ชั่งไทเทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณ 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

5. ปิเปตเอทานอล ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ ใส่ลงในบีกเกอร์ ปริมาตร 4.883 มิลลิลิตร แล้วคนให้สารละลายเข้ากัน

6. ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ ใส่ลงในบีกเกอร์ ปริมาตร 0.117 มิลลิลิตร แล้วคนให้สารละลายเข้ากัน

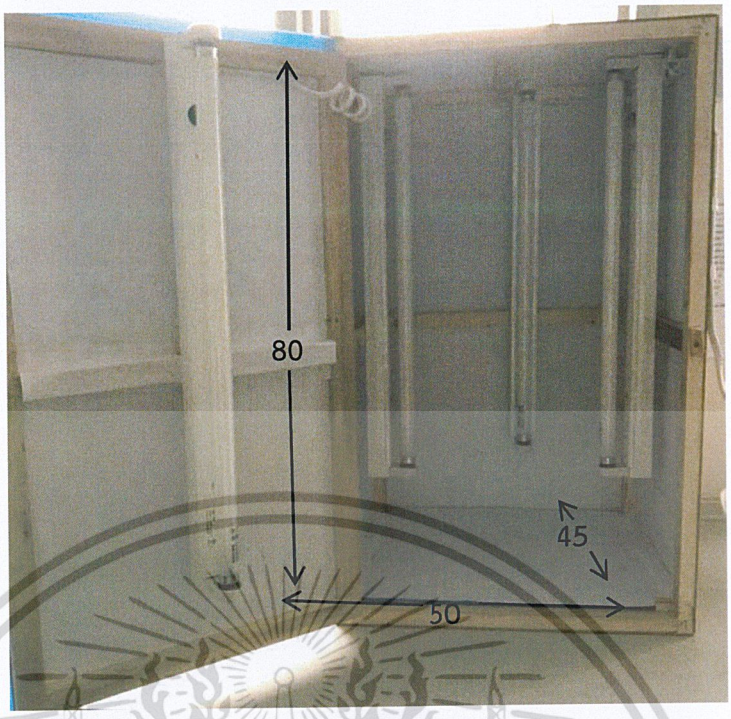
7. นำแผ่นลวดที่เตรียมไว้ใส่ลงบีกเกอร์ที่มีสารเร่งปฏิกิริยา ชุบแผ่นลวดให้สารเร่งปฏิกิริยาติดทั่วแผ่น

8. วางแผ่นลวดที่ผ่านการชุบแล้วลงในกระจกนาฬิกา นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วเก็บในถุงซิปวางในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปใช้ต่อไป

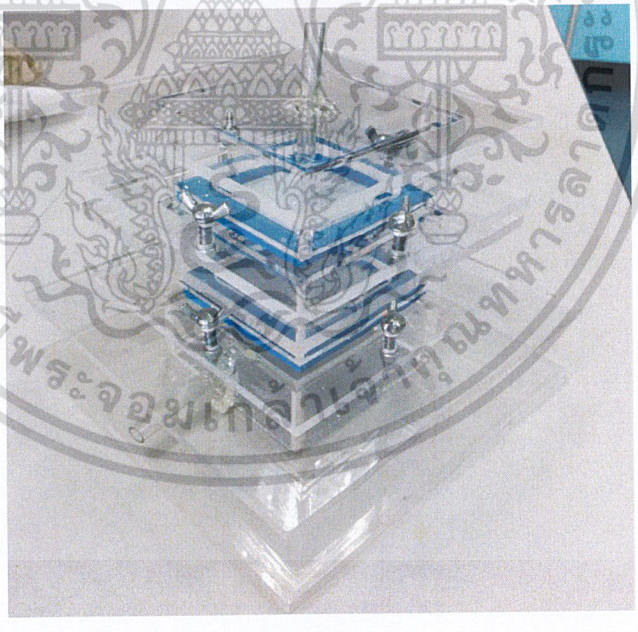
3.2.2 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส

ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสเป็นตู้ไม้ทึบ ขนาด 50×45×80 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีรางไฟสำหรับใส่หลอดไฟ จำนวน 4 ราง มีสวิตช์สำหรับเปิด-ปิด จำนวน 1 ตัว โดยเป็นการควบคุมแบบ 1 สวิตช์ 1 รางไฟ ดังรูปที่ 3.1 และมีคอลัมน์อะคริลิก ขนาด 6×6×26.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 1 คอลัมน์ โดยมีชั้นสำหรับวางแผ่นลวดสแตนเลสที่ชุบสารเร่งปฏิกิริยาแล้ว จำนวน 2 ชั้น มีช่องอากาศเข้าด้านล่างและช่องอากาศออกด้านบนดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตู้ปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 3.2 คอลัมน์อะคริลิกบรรจุแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

2. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 เข้ากับเครื่องพ่นอากาศ และขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2 ที่วางใน water bath ที่บรรจุน้ำแข็ง

3. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 ที่บรรจุสารดูดซึม ประกอบด้วย แอมโมเนียมแอซิเตท 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตร และ แอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์

4. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 5 เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก)

5. นำแผ่นลวดสแตนเลส ใส่เข้าคอลัมน์แต่ละชั้น จำนวน 2 ชั้น

6. ต่ออิมพิงเจอร์ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอน 3-5 กรัม เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศส่วนบุคคล

7. ให้ความร้อนกับสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยวัดอัตราการไหลของปั๊มก่อนและหลังการทดลอง จำนวน 10 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย บันทึกอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

8. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร (ดูรายละเอียดภาคผนวก ก-5)

9. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

10. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 เข้ากับเครื่องพ่นอากาศ และขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2 ที่วางใน water bath ที่บรรจุน้ำแข็ง

11. ต่อขวดรูปชมพู่เปล่าใบที่ 2 เข้ากับคอลัมน์ในตู้ปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นลวดชุบซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 2 ชั้น ที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน (18 watt) จำนวน 4 หลอด (4,120 ลูเมน) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)

12. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 ที่บรรจุสารดูดซึม ประกอบด้วย แอมโมเนียมแอซิเตท 1.80 โมลต่อลิตร, กรดอะซิติก 0.05 โมลต่อลิตร และ แอซิติลแอซิโตน 0.02 โมลต่อลิตร ปริมาณ 200 มิลลิลิตร (ดูรายละอียดในภาคผนวก ก-1) เพื่อดักจับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือหลังจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

13. ต่อขวดรูปชมพู่ใบที่ 5 เข้ากับคอลัมน์ในตัวปฏิกรณ์และปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอิมพิงเจอร์ที่บรรจุแอคติเวเตทคาร์บอน 3-5 กรัม

14. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

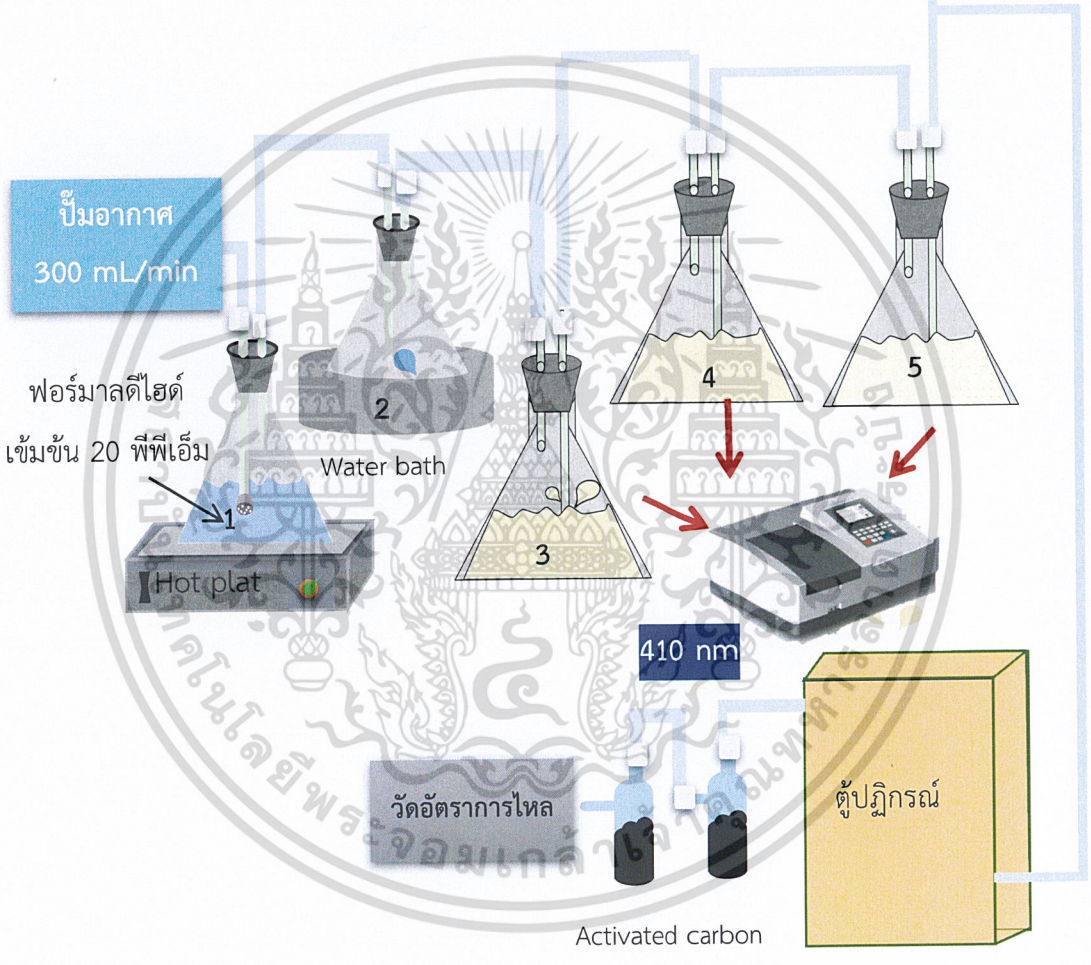
วัดอัตราการไหลก่อนและหลังการทดลองของปั๊ม จำนวน 10 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย บันทึกอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

15. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร (ดูรายละเอียดภาคผนวก ก-5)

16. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-15 อีก 2 ซ้ำ

17. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-16 แต่เปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 200 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที

(ก)

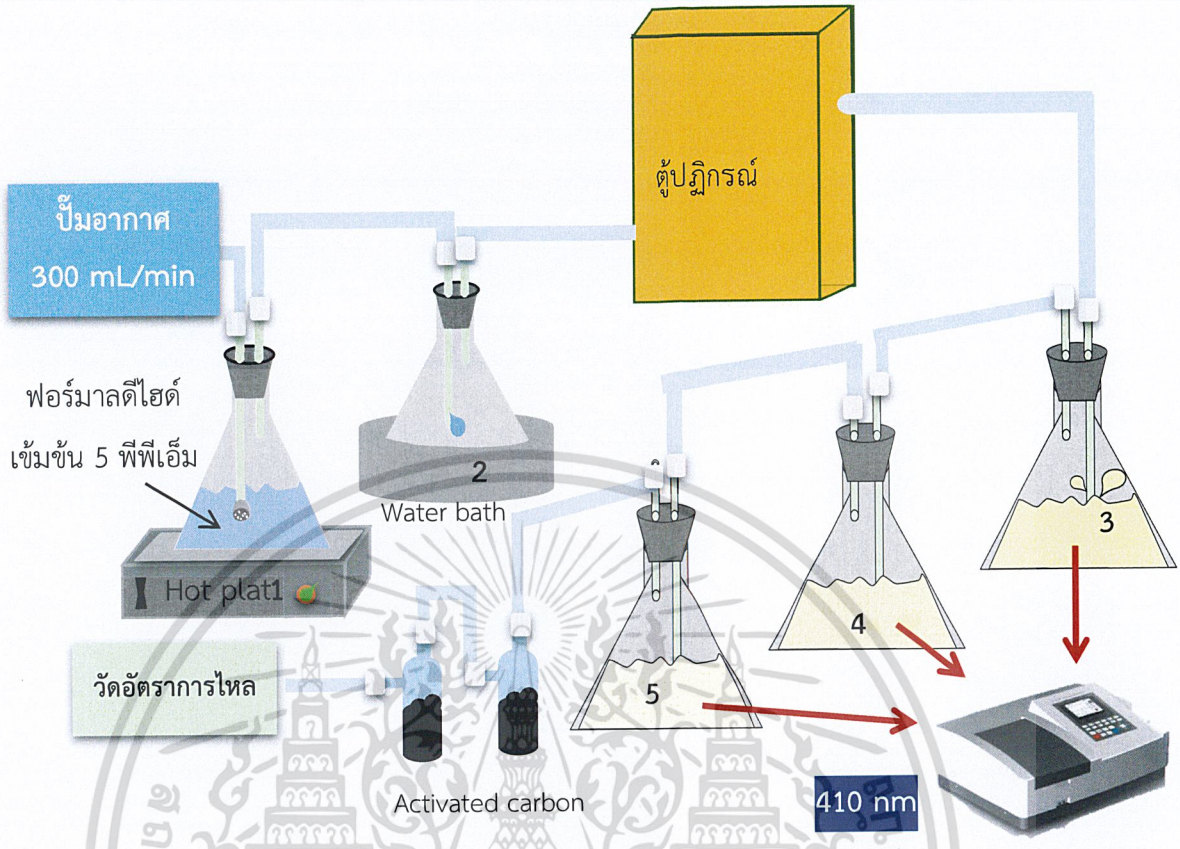


รูปที่ 3.3 ระบบการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

(ก) เก็บตัวอย่างฟอร์มอร์ดีไฮด์ก่อนบำบัด (ข) เก็บตัวอย่างฟอร์มาลดีไฮด์หลังบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)



รูปที่ 3.3 ระบบการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ต่อ)
(ก) เก็บตัวอย่างฟอร์มอร์ดีไฮด์ก่อนบำบัด (ข) เก็บตัวอย่างฟอร์มาลดีไฮด์หลังบำบัด

3.2.4 ศึกษาการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. ต่ออุปกรณ์เช่นเดียวกับข้อ 1-15 ในหัวข้อ 3.2.3

2. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

3. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ ที่อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง เป็นเวลา 20 นาที

4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 2 ซ้ำ

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนเวลาเป็น 30 และ 40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ศึกษาการหาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. ต่ออุปกรณ์เช่นเดียวกับข้อ 1-15 ในหัวข้อ 3.2.3

2. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

3. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ ที่อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.2.3 และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.2.4

4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 2 ซ้ำ

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนความเข้มแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็น 0, 1,030 และ 2,060 ลูเมน

3.2.6 ศึกษาการหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. ต่ออุปกรณ์เช่นเดียวกับข้อ 1-15 ในหัวข้อ 3.2.3

2. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

3. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ ที่อัตราการไหลและเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.2.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.2.4 และความเข้มแสงที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.5

4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนจำนวนชั้นเป็น 1 ชั้น

3.2.7 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซ้ำในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

1. ต่ออุปกรณ์เช่นเดียวกับข้อ 1-15 ในหัวข้อ 3.2.3

2. ตวงสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 20 พีพีเอ็ม 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร (ใบที่ 1)

3. ให้ความร้อนกับฟอร์มาลดีไฮด์ในขวดรูปชมพู่ใบที่ 1 ด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส โดยเปิดปั๊มพ่นอากาศ อัตราการไหลและเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.2.4 ความเข้มแสงที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.5 และจำนวนชั้นของแผ่นลวดที่เคลือบซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 3.2.6

4. นำสารละลายในขวดรูปชมพู่ใบที่ 3, 4 และ 5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

5. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 อีก 4 ซ้ำ โดยใช่แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์แผ่นเดิม

3.2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลผลการทดลองจะวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Minitap รุ่น 17 ใช้ความวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวหรือ One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

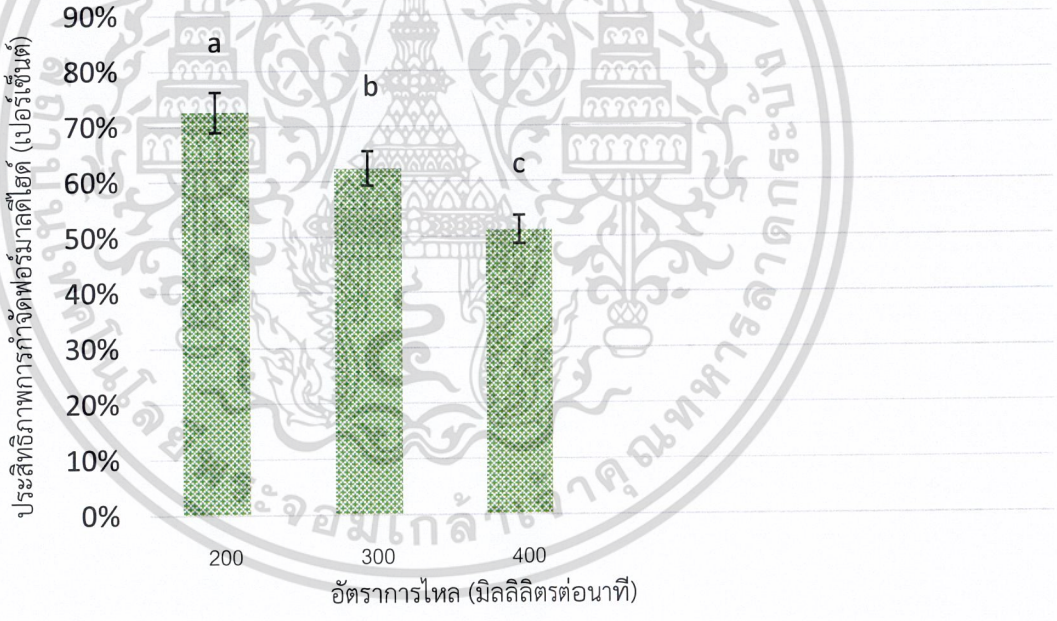
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโต-คะตะไลซิส โดยใช้แผ่นลวดที่ชุบด้วยซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) ภายใต้แสงที่ตามองเห็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

แสดงผลการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยศึกษาที่อัตราการไหล 200, 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค-1)



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

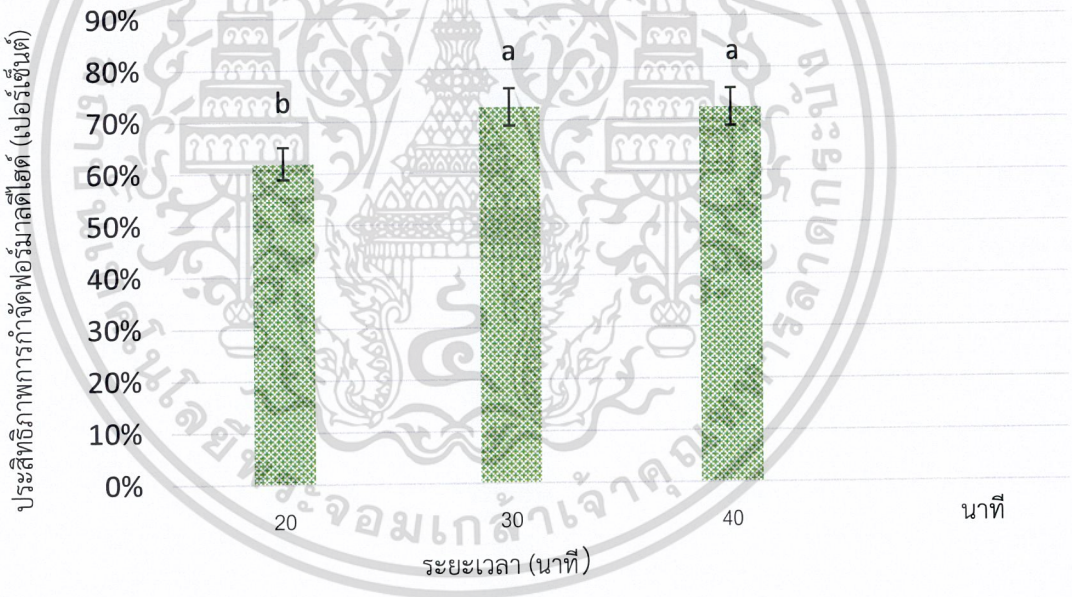
ผลการทดลอง พบว่า อัตราการไหลที่ 200, 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 72.63±1.70, 62.40±1.98 และ 51.23±1.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง-1) ซึ่งอัตราการไหล 200, 300 และ

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า มีค่า Retention time 4.77, 3.18 และ 2.38 นาที เนื่องจากอัตราการไหลที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถทำให้ Retention time ของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศอยู่ในคอลัมน์ได้นานกว่าที่อัตราการไหล 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้มากกว่าอัตราการไหล 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที

4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

แสดงผลการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) ภายใต้แสงที่ตามองเห็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อศึกษาหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยศึกษาที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค-2)



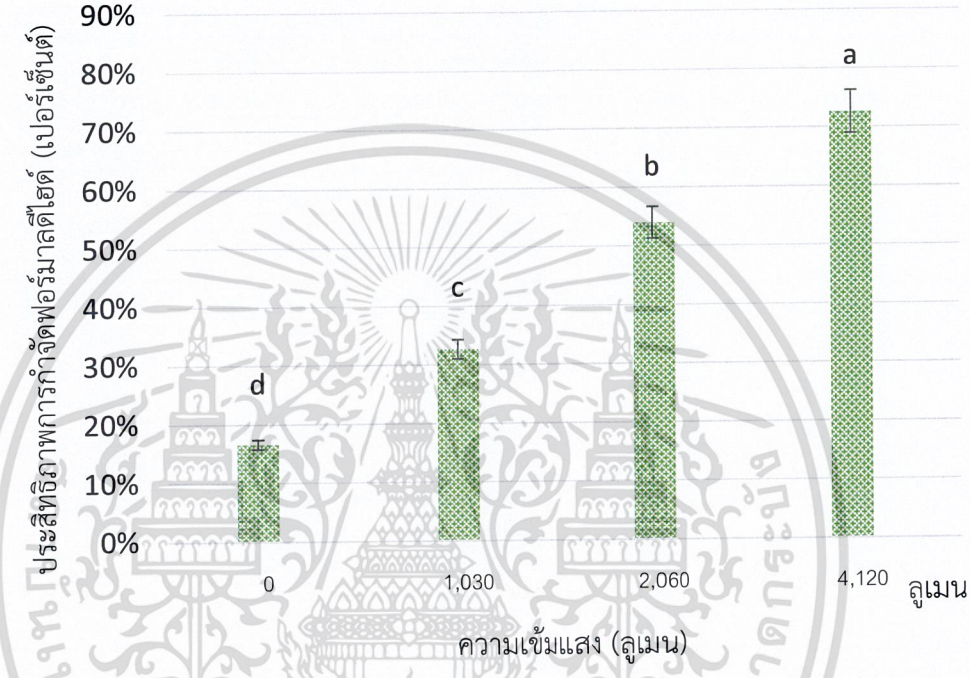
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

ผลการทดลอง พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 62±01.95, 72.63±1.70 และ 72.34±2.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ระยะเวลา 20 นาที แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับที่ระยะเวลา 30 และ 40 นาที ส่วนที่ระยะเวลา 30และ40 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

แสดงผลการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อศึกษาหาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยศึกษาความเข้มแสงจากหลอดหลอดฟลูออรสเซนต์ที่มีความเข้มแสง 0, 1,030, 2,060 และ 4,120 ลูเมน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค-3)



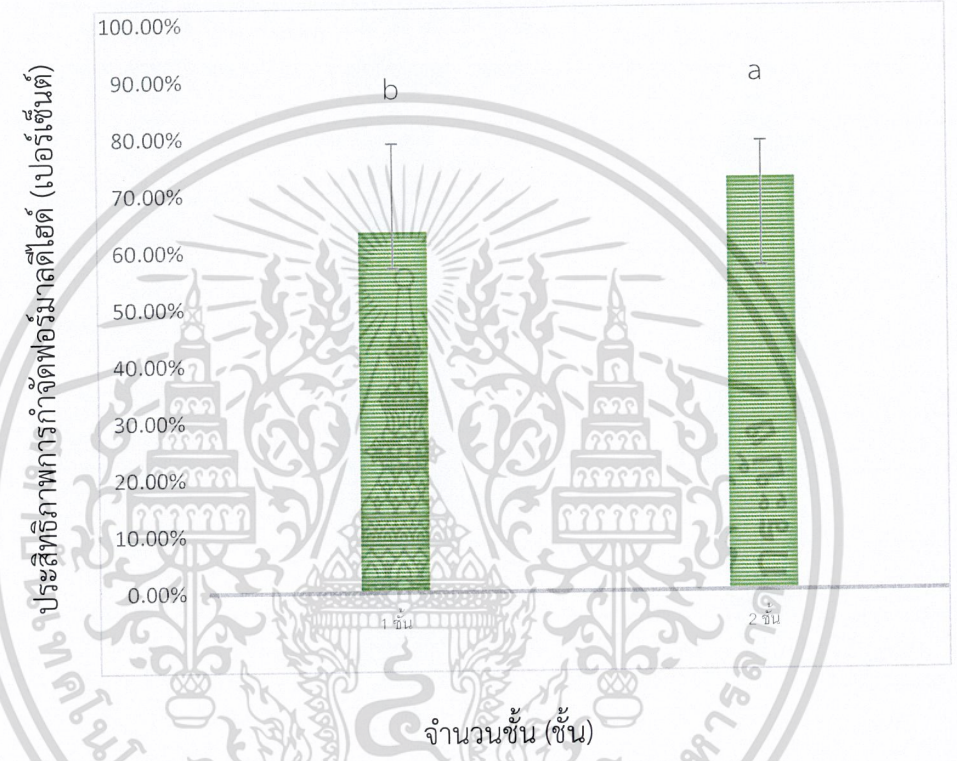
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

ผลการทดลอง พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 16.61±1.72, 32.66±1.62, 54.00±0.62 และ 72.63±1.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของฟิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง-3) เนื่องจากความเข้มแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังนั้นความเข้มแสง 4,120 ลูเมน จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ดีที่สุด เพราะเมื่อได้รับแสงมากจะไปทำการกระตุ้นให้ธาตุซิลเวอร์เกิดการสั่นภายในโมเลกุลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ e^- กับไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ระดับพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เจษฎากรและคณะ (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

แสดงผลการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag-TiO_2) ภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อศึกษาหาจำนวนชั้นแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยศึกษาที่จำนวน 1 และ 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค-4)



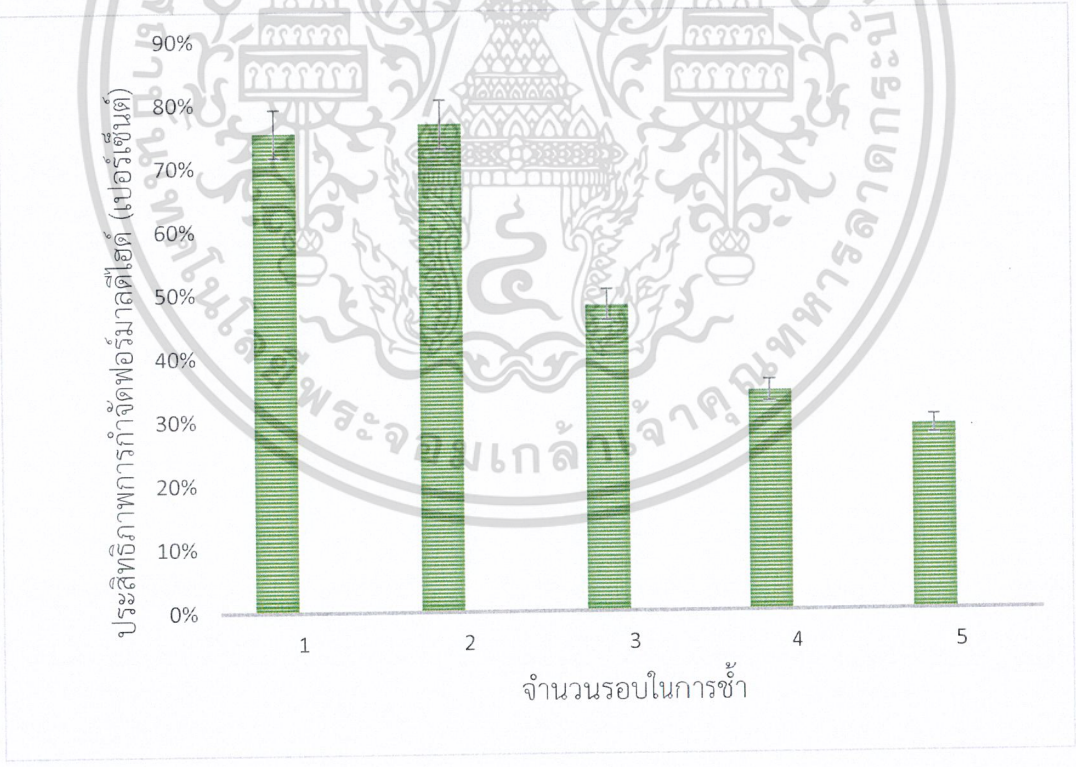
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

ผลการทดลอง พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 63.57±1.77 และ 72.63±1.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากยิ่งจำนวนชั้นมากก็มีปริมาณ Ag-TiO_2 มาก ทำให้สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียง 2 ชั้น จึงควรเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในการทดลองต่อไป จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

รูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค-5) แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวด Ag-TiO_2 ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลา 20 นาที ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน และจำนวนแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น พบว่า การใช้แผ่นลวด Ag-TiO_2 ซ้ำที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ เท่ากับ 75, 77, 48, 34 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One way ANOVA และวิธีเปรียบเทียบเชิงซ้อนของพิชเชอร์ (Fisher'S Least Significant Difference: LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยประสิทธิภาพครั้งที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ดูรายละเอียดภาคผนวก ง-5) จากการทดลองจะพบว่า แผ่นลวด Ag-TiO_2 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีเพียงแค่ 1-2 ครั้ง จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์จะถูกดูดซับบนโฟตอน ทำให้โฟตอนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghanbarian *et al.* (2013)



รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้แสงที่มองเห็นได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์

อัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ คือที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลากักเก็บ (retention time) 4.77 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม 30 นาที ความเข้มแสงที่เหมาะสม 4,120 ลูเมน และจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม 2 ชั้น พบว่า สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศได้ 72.63±1.70 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวด Ag-TiO_2 ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ภายใต้แสงที่ตามองเห็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์

ประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวด Ag-TiO_2 ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ คือ สามารถใช้ซ้ำได้ 2 ครั้ง โดย สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศได้สูงสุด 77 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์
2. ควรศึกษาการแปรค่าอัตราการไหลที่มีค่าต่ำกว่า 200 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ปั๊มอากาศ
3. ควรทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์
4. ควรศึกษาการบำบัดมลพิษอากาศอื่น ๆ โดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงที่มองเห็นได้
5. ศึกษาการรีเจนเนอเรต แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการใช้ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มาลดีไฮด์.** กรมโรงงานอุตสาหกรรม. [Online]. Available: http://php.diw.go.th/ หน้า 91-92

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

เกรียงไกร ทองลิ่ม, ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล และ สิริลักษณ์ เจียรากร. 2558. **ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลสิสของฟิล์มกรองแสงเคลือบด้วยฟิล์มไททาเนียและเงิน.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. The National Graduate Research Conference 34th. PMO2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

เคมีอุตสาหกรรม. 2560. **ไททาเนียมไดออกไซด์/TiO_2 และประโยชน์ไททาเนียมไดออกไซด์.** [Online]. Available: http://www.siamchemi.com/.

จุฑารัตน์. 2555. **พิษจากสารฟอร์มาลดีไฮด์.** ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. [Online]. Available: http://dpm.nida.ac.th/

จรัส บุญยธรรมา. 2556. **ธรรมชาติของแสง**.ฟิสิกส์ราชมงคล [Online]. Available: http://www.atom.rmutphysics.com/

เจษฎากร วิลามาตย์, ณัฐริกา บุญชูดำ, อรรถกานต์ ใจเฉื่อย. 2560 วิทยานิพนธ์เรื่อง **การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนลวดสแตนเลสภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร

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

ชลดา ธีรการุณวงศ์. 2554. **ปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์.** ภาควิชาวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, นครสวรรค์. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน

ธนพงศ์ แสงส่องสิน. 2560. “**Formaldehyde.**” มูลนิธิสัมมาอาชีวะ. [Online]. Available: http://www.summacheeva.org/

เทอดชัย นบธีราสุภาพ. 2560. **หลอดฟลูออเรสเซนต์**. โครงการฟิสิดส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ. [Online]. Available: http://www.dss.go.th/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

นัดดา เวชชากุล. 2555. **ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ**. ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 26-28

บังอร ฉางทรัพย์. 2558. **ฟอร์มาลดีไฮด์/ฟอร์มาลิน ภัยร้ายใกล้ตัว.** สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ ฉบับที่ 1. หน้า 2-8

ไพรจิตต์ นอกคาม 2559. **อันตรายของสารฟอร์มาลดีไฮด์/ฟอร์มาลีน**. [Online]. Available: http://53010310108paijit.blogspot.com/

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2558. **ฟอร์มาลดีไฮด์/ฟอร์มาลีน.**ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร [Online]. Available: www.foodnetworksolution.com/

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

มานิตย์ แก้วพิมพา, ชลาธาร แสงเรืองฤทธิ์,การะเกด เทศศรี. 2557. **"การปรับประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนโลหะคู่ แพลเลเดียมเปลือกหุ้มโลหะเงินแกนกลาง (Ag@Pd) สำหรับการสลายตัวของกรดฟอร์มิก"**. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 19. ฉบับที่ Suppl 3. หน้า 263-270.

รชานนท์ กลอนดอน. 2556. "การกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก โดยเคลือบสารผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์บนผิวเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียน". คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา

สถาบันมะเร็งแห่งชาติ. 2554. **ฟอร์มาลดีไฮด์และความเสี่ยงมะเร็ง.** สถาบันมะเร็งแห่งชาติที่สถาบันสุขภาพแห่งชาติ.

สรรค์ จิตรใคร่ครวญ. 2552. **การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.** วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. หน้า 21-22

สุพิณ แสงสุข. 2550. **ไทเทเนียมไดออกไซด์**. นักวิจัยสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. [Online]. Available: http://www.material.chula.ac.th/

อานนท์ จริยนรเศรษฐ์. 2560. วิทยานิพนธ์เรื่อง **การกำจัดสารละลายลิเนียแอลคิลเบนซีนซัลโฟเนตและออร์โธฟอสเฟต ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร. KMITL-2017-SC-M-016-022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

อัญชลี. 2560. **รังสีอัลตราไวโอเลต/รังสียูวี (UV) และอันตรายจากรังสียูวี**. [Onine]. Available: http://www.siamchemi.com/

Chen K., Feng X., Li Y. and Tian H.. 2014. **Silver-decorated titanium dioxide nanotube arrays with improved photocatalytic activity for visible light irradiation.** Journal of Materials Research, Cambridge Core: 1302-1308

Choojun K., Prasanseang W. and Sriwong C. 2017. **Effect of Synthesized Ag Nanoparticles by Using the Different Amounts of Polyvinylpyrrolidone 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 ISSN: 1662-9795, Vol. 751: 270-276

Esch, T.R. Gadaczek, I. and Bredow, T. 2014. **Surface Structures and Thermodynamic of Low-Index of Rutile, Brookite and Anatase – A Comparative DFT Stady.** Applied Surface Science. 288 : 275-287

Gonzalez-Perez A. and Persson K. M.. 2016. **Bioinspired Materials for Water Purification**. Department of Water Resources Engineering, Lund University, Sweden. Materials 9(6), 447; doi:10.3390/ma9060447 Review.

He Z., Cai Q., Fang H., Situ G., Qiu J., Song S. and Chen J.. 2013. **Photocatalytic Activity of TiO2 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, China. Building and Environment 51: 345-350

Kawakami Y., Maruo Y. Y., Nakagawa T. and Saito H. 2015. **A screening method for detecting formaldehyde emitted from textile products.** Graduate School of Natural Science and Technology,Kanazawa University. Japan. Journal of ScienceDirect Measurement 62: 41-46.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Lua Y. W., Wanga M. Y., Yang C. X. and Zhang X. J.. 2015. **Photocatalytic Decomposition of Formaldehyde by Combination of Ozone and AC Network with UV365nm, UV254nm and UV254+ 185nm.** College of Environmental and Energy 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 ก

ภาคผนวก ก-1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย (Flinn Scientific)

ก-1.1. สต็อกกรดอะซิติก เข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

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

ก-1.2. สารละลายแอซิโตน เข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์

ตวงแอซิโตน เข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ มา 200 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 2,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.3. สต็อกแอซิติลแอซิโตน เข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร

ปิเปตแอซิติลแอซิโตน เข้มข้น 99.5 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ 2.06 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.4. สต็อกแอมโมเนียแอซิเตท เข้มข้น 1.89 โมลต่อลิตร

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

ก-1.5. สต็อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม

ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 36.5-38 เปอร์เซ็นต์ เกรดวิเคราะห์ 2.70 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.6. สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 20 พีพีเอ็ม

ปิเปตสต็อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 1000 พีพีเอ็ม 20 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.7. สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ เข้มข้น 1.13 โมลาร์

ชั่งโซเดียมซัลไฟต์ 14.24 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้สารละลาย เทสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.8. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตวงน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนให้สารละลาย เทสารละลายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.9. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มัล

ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.10. สารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 0.02 นอร์มัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิเปตกรดซัลฟูริก เข้มข้น 18.01 โมลต่อลิตร 2.83 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ก-1.11. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Choojun. *et al*, 2017)

ชั่งซิลเวอร์ไนเตรท 0.30XX กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ตวงน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ คนให้สารละลายเข้ากัน

1.ชั่งพอลีไวนิลไพโรลิโดน 0.225X กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วตวงน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ คนให้สารละลายเข้ากัน

2.เทสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทที่เตรียมไว้ ลงในสารละลายพอลีไวนิลไพโรลิโดน นำสารละลายไปเข้าตู้อบไมโครเวฟ ที่ความร้อน 300 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที โดยจะหยุดพัก ทุกๆ 15 วินาทีสารละลายที่ได้จะเป็นสีเหลืองแกมน้ำตาล ปิเปตสารละลายที่ได้ใส่ขวดแก้วแช่ที่อุณหภูมิ 4°C

ก-1.12. สารดูดซึมสำหรับวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ (Kawakami Y. et al., 2015)

สารดูดซึมประกอบด้วย แอมโมเนียแอซิเตทเข้มข้น 1.89 โมลต่อลิตร, สต็อกกรดอะซิติกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายแอซิติลแอซิโตนเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร ผสมกันในสัดส่วน 1:1:1

ภาคผนวก ก-2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ก-2.1. สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 6, 8 และ 10 พีพีเอ็ม

ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 500 พีพีเอ็ม มา 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารดูดซึม

ภาคผนวก ก-3 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท

1. ชั่งพอลีไวนิลไพโรลิโดน 0.225X กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วตวงน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร ใส่ลงไป คนให้ละลายเข้ากัน นำสารละลายไปเข้าตู้อบไมโครเวฟ ที่ความร้อน 300 วัตต์ 90 วินาที โดยจะหยุดพัก ทุกๆ 15 วินาที

2. นำกระจกนาฬิกา อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักกระจกนาฬิกาที่แน่นอน ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ 1,000 ไมโครลิตร ใส่ลงในกระจกนาฬิกา อันที่ 1 ปิเปตสารละลายซิลเวอร์ 1,000 ไมโครลิตร ใส่ลงในกระจกนาฬิกา อันที่ 2

3. นำกระจกนาฬิกาทั้ง 2 อัน อบที่ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ชั่งน้ำหนักกระจกนาฬิกาอีกครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายซิลเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก-4 หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 36.5-38% (Eugene R. Kennedy และคณะ, 1998)

1. ปิเปตสต็อกฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 36.5-38% 0.27 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. ตวงสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 1.13 โมลาร์ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนโดยไม่ต้องให้ความร้อน

3. วัดค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 8.5-10 บันทึกค่าพีเอชที่ได้

4. ปิเปตสารละลายที่เตรียมไว้ 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน วัดค่าพีเอชจะมีค่าเกิน 11

5. ไทเทรตสารละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มัล ให้ค่าพีเอชมีค่าเท่าเดิม

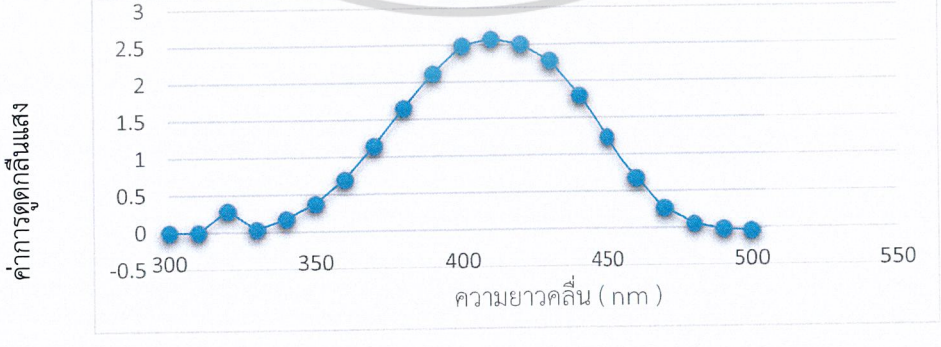
6. หากไทเทรตเกินจุดยุติ ทำการไทรตเทรตกลับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 นอร์มัล

7. คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ เข้มข้น 36.5-38%

ตาราง ก-4 ค่าการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 36.5-38 %

	ปริมาตร H_2SO_4 (mL)	ปริมาตร NaOH (mL)
Sample 1	0.00 – 5.80	0.00 – 1.40
Sample 2	5.80 – 11.45	1.40 – 2.60
Sample 3	11.45 – 17.15	2.60 – 3.80
Sample 4	17.15 – 22.95	3.80 – 5.10

ภาคผนวก ก–5 กราฟค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์



รูปที่ ก–5 กราฟค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก–5 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 500 นาโนเมตร ของฟอร์มาลดีไฮด์

ความยาวคลื่น (nm)	Abs.	ความยาวคลื่น (nm)	Abs.
300	0	410	2.585
310	0	420	2.505
320	0.298	430	2.281
330	0.041	440	1.811
340	0.180	450	1.245
350	0.381	460	0.685
360	0.707	470	0.274
370	1.154	480	0.062
380	1.656	490	-0.017
390	2.21	500	-0.039
400	2.491		

ภาคผนวก ก- 6 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์



รูปที่ ก–6 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-6 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

ความเข้มข้น (ppm)	Abs.
0.00	-0.055
0.50	0.075
0.10	0.215
0.15	0.301
2.00	0.473
4.00	0.945
6.00	1.366
8.00	1.813
10.00	2.276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข-1 การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท

$$\text{น้ำหนักของ Ag-NP (g/mL)} = \text{น้ำหนักของ Ag-NR} - \text{น้ำหนักของ PVP}$$

$$\text{ความเข้มข้นของ Ag-NP (mol/L)} = \frac{\text{น้ำหนักของ Ag-NP (g/mL)} \times 1000\ \text{mL}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของซิลเวอร์ (g/mol)}}$$

ภาคผนวก ข-2 คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

36.5-38 เปอร์เซ็นต์ (Eugene R. Kennedy, Ph.D., and Karen J. Williams, 2541)

$$C_S = \frac{30.0\ \{(N_a \times V_a) - (N_b \times V_b)\} \times 100}{V_s}$$

เมื่อ C_s = ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (เปอร์เซ็นต์)

N_a = ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (นอร์มัล)

N_b = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)

V_a = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

V_b = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตกลับ (มิลลิลิตร)

V_s = ปริมาตรของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ ข-2

$N_a = 0.02$ N $\quad N_b = 0.01$ N

$V_a = 5.8$ mL $\quad V_b = 1.4$ mL $\quad V_s = 10$ mL

$$C_S = \frac{30.0\ \{(0.02 \times 5.8) - (0.01 \times 1.4)\} \times 100}{10} = 30.60\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข-3 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. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นการกำจัด

$$\%Removal = \frac{(C_S \times 100)}{C_i}$$

   เมื่อ C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)

   C_s = ความเข้มข้นที่ TiO_2 ดักจับ (ppm)

ตัวอย่างการคำนวณ ข-3 (อัตราการไหล 200 mL/min 30 นาที 4 light)

Abs. in = 0.639 Abs. out = 0.144

$$RT\ (min) = \frac{6\ cm \times 6\ cm \times 26.5\ cm}{200\ mL/min} = 4.77\ min$$

จากสมการเส้นตรง $y = 0.2315x - 0.0254$

ความเข้มข้นเข้า = (0.639 + 0.0254) / 0.2315 = 2.8700 ppm

ความเข้มข้นออก = (0.144 + 0.0254) / 0.2315 = 0.7300 ppm

ความเข้าข้นที่ TiO_2 ดักจับ = (0.4700 + 0.0254) / 0.2315 = 2.1400 ppm

$$\%Removal = \frac{(2.1400 \times 100)}{2.8700} = 74.56\ \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค-1 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ที่เวลา 30 นาที ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน

อัตราการไหล (mL/min)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ออกจากระบบ (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ Ag - TiO_2 กำจัด (mg/L)	การกำจัด (%)	ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
200 mL/min	1	2.87	0.73	2.14	74.56	72.63	1.70
	2	2.93	0.84	2.09	71.33		
	3	2.93	0.82	2.11	72.01		
300 mL/min	1	2.95	1.06	1.89	64.07	62.40	1.98
	2	2.89	1.15	1.74	60.21		
	3	2.94	1.09	1.85	62.93		
400 mL/min	1	2.94	1.46	1.48	50.34	51.23	1.03
	2	2.98	1.46	1.52	51.00		
	3	2.96	1.41	1.55	52.36		

ภาคผนวก ค-2 ผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อัตราการไหล 200 mL/min ความเข้มแสง 4,120 ลูเมน

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ออกจากระบบ (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ Ag - TiO_2 กำจัด (mg/L)	การกำจัด (%)	ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
20 นาที	1	2.84	1.02	1.82	64.08	62.00	1.95
	2	2.90	1.11	1.79	61.72		
	3	2.89	1.15	1.74	60.21		
30 นาที	1	2.87	0.73	2.14	74.56	72.63	1.70
	2	2.93	0.84	2.09	71.33		
	3	2.93	0.82	2.11	72.01		
40 นาที	1	2.93	0.88	2.05	69.97	72.34	2.23
	2	2.89	0.79	2.10	72.66		
	3	2.85	0.73	2.12	74.39		

ภาคผนวก ค-3 ผลการทดลองเพื่อหาความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อัตราการไหล 200 mL/min เวลา 30 นาที

ความเข้มแสง	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ออกจากระบบ (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ Ag - TiO_2 กำจัด (mg/L)	การกำจัด (%)	ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
0 ลูเมน	1	2.87	2.40	0.47	16.38	16.61	1.72
	2	2.93	2.39	0.54	18.43		
	3	2.93	2.49	0.44	15.02		
1,030 ลูเมน	1	2.87	1.88	0.99	34.49	32.66	1.62
	2	2.93	2.01	0.92	31.40		
	3	2.93	1.94	0.99	32.08		
2,060 ลูเมน	1	2.87	1.33	1.54	53.69	54.3	0.63
	2	2.93	1.32	1.61	54.94		
	3	2.93	1.34	1.59	54.27		
4,120 ลูเมน	1	2.87	0.73	2.14	74.56	72.63	1.70
	2	2.93	0.84	2.09	71.33		
	3	2.93	0.82	2.11	72.01		

ภาคผนวก ค-4 ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อัตราการไหล 200 mL/min เวลา 30 นาที

จำนวนคอลัมน์ (ชั้น)	ซ้ำที่	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ออกจากระบบ (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ TiO_2 ดักจับไว้ (mg/L)	การกำจัด (%)	ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
1 ชั้น	1	2.84	1.00	1.84	64.79	63.57	1.77
	2	2.92	1.04	1.88	64.38		
	3	2.86	1.11	1.76	61.54		
2 ชั้น	1	2.87	0.73	2.14	74.56	72.63	1.70
	2	2.93	0.84	2.09	71.33		
	3	2.93	0.82	2.11	72.01		

ภาคผนวก ค-5 ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในสภาวะที่เหมาะสม

จำนวนครั้งที่ใช้แผ่นลวด Ag – TiO_2	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ออกจากระบบ (mg/L)	ความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ Ag - TiO_2 กำจัด (mg/L)	ค่าเฉลี่ยการกำจัด (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
ครั้งที่ 1	2.93	0.72	2.21	75.43	0.471
ครั้งที่ 2	2.93	0.68	2.25	76.79	0.397
ครั้งที่ 3	2.93	1.52	1.41	48.12	0.315
ครั้งที่ 4	2.93	1.92	1.01	34.47	0.560
ครั้งที่ 5	2.93	2.08	0.85	29.01	0.280

ภาคผนวก ง

ภาคผนวก ง-1 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของก๊าซที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

One-way ANOVA:

Factor Information

Factor	Levels	Values
Flow Rate	3	200, 300 และ 400 mL/min

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Flow Rate	2	687.38	343.69	130.62	0.000
Error	6	15.79	2.63		
Total	8	703.17			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่อัตราการไหลต่างกัน โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Flow Rate	N	Mean	Grouping
200 mL/min	3	72.633	A
300 mL/min	3	62.403	B
400 mL/min	3	51.233	C

Means that do share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง-2 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

One-way ANOVA:

Factor Information

Factor	Levels	Values
Time	3	20, 30 และ 40 mL/min

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Time	2	219.93	109.96	28.28	0.001
Error	6	23.33	3.89		
Total	8	243.26			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระยะเวลาต่างกัน โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Time	N	Mean	Grouping
20 min	3	62.003	B
30 min	3	72.633	A
40 min	3	72.340	A

Means that not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง-3 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบความเข้มแสง ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

One-way ANOVA:

Factor Information

Factor	Levels	Values
Light	4	0, 1,030, 2,060 และ 4,120 ลูเมน

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Light	3	5414.49	1804.83	813.53	0.000
Error	8	17.75	2.22		
Total	11	5432.24			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มแสงต่างกันต่างกันโดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Light	N	Mean	Grouping
0	3	16.610	D
1,030	3	32.657	C
2,060	3	54.300	B
4,120	3	72.633	A

Means that not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง-4 ตาราง ANOVA เปรียบเทียบผลของจำนวนชั้นของแผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

One-way ANOVA:

Factor Information

Factor	Levels	Values
Layer	2	1 และ 2 Layer

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Layer	1	123.22	123.22	40.85	0.003
Error	4	12.06	3.02		
Total	5	135.28			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระยะเวลาต่างกัน โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Layer	N	Mean	Grouping
1 Layer	3	63.570	B
2 Layer	3	72.633	A

Means that not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง-5 ตาราง ANOVA ประสิทธิภาพในการใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ซ้ำ ในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์

One-way ANOVA:

Factor Information

Factor	Levels	Values
Reuse	5	1, 2, 3, 4 และ 5 ครั้ง

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Reuse	4	6042.63	1510.66	8669.98	0.000
Error	10	1.74	0.17		
Total	14	6044.37			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระยะเวลาต่างกัน โดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Reuse	N	Mean	Grouping
1	3	76.79	A
2	3	75.49	B
3	3	48.12	C
4	3	34.47	D
5	3	29.01	E

Means that not share a letter are significantly different.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้