การสลายพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวแบบเกล็ด

PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF PARAQUAT AT HIGH CONCENTRATION IN SYNTHETIC WASTEWATER USING TiO_2 DOPED ON GRAIN COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON

นายกรวิชญ์ มณียศ

KORAWIT MANEEYOT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-220-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF PARAQUAT AT HIGH CONCENTRATION IN SYNTHETIC WASTEWATER USING TiO_2 DOPED ON GRAIN COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON

KORAWIT MANEEYOT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M-220-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสลายพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวแบบเกล็ด
นักศึกษา	นายกรวิชญ์ มณียศ
รหัสประจำตัว	61601081
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันติ์

บทคัดย่อ

เนื่องจากพาราควอตเป็นสารกำจัดศัตรูพืชมีผลกระทบทางลบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีการตรวจพบการปล่อยพาราควอตที่ความเข้มข้นค่อนข้างสูงจากโรงงานผสมสารกำจัดศัตรูพืชในประเทศไทย ด้วยเหตุนี้การกำจัดพาราควอตที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานหรือจากการเกษตรจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยปกตินิยมใช้การดูดซับเพื่อกำจัดพาราควอต แต่ยังมีข้อจำกัด คือ ความจุในการดูดซับ อีกทั้งเมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวจะต้องเปลี่ยนและนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วไปกำจัดจึงก่อให้เกิดของเสียหรือมลพิษมากขึ้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผงซึ่งจะทำให้การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยามีความซับซ้อนที่จะนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเพิ่มคุณสมบัติในการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้กับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยการนำไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (TiO_2/GAC) เพื่อทำให้การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาสะดวกต่อการใช้งานมากกว่าแบบผง ซึ่งอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า การเผา TiO_2/GAC ที่อุณหภูมิ 500 °C มีประสิทธิภาพในการสลายพาราควอตสูงที่สุด จากนั้นจึงทำการศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงยูวีโดยใช้ TiO_2/GAC 500 °C โดยจะทดสอบระหว่างการเติมอากาศและการเติมโอโซน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการสลาย จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการสลายพาราควอตสูงที่สุด คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.12 g/L ภายใต้อัตราการไหลของโอโซน 1,905 mg/h ซึ่งร้อยละการกำจัดพาราควอตทั้งหมดเท่ากับ 58.77 ซึ่งมีอัตราการสลายสูงที่สุดเท่ากับ 6.76 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ (ร้อยละการกำจัดโดยการดูดซับเท่ากับ 10.07 และการสลายเท่ากับ 48.70) อัตราการดูดซับพาราควอตสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ส่วนอัตราการสลายพาราควอตสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม ซึ่งแสดงถึงอัตราการสลายคงที่

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; พาราควอต; กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง; ไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Photocatalytic Degradation of Paraquat at High Concentration in Synthetic Wastewater Using TiO_2 Doped on Grain Coconut Shell Activated Carbon
Student	Mr. Korawit Maneeyot
Student ID.	61601081
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Nuttapol Lerkkasemsan

ABSTRACT

Since paraquat is a pesticide that harms organisms and the environment. Relatively high concentrations of paraquat had been found in pesticide-mixing plants in Thailand. Therefore, it is necessary to be treated before being discharged into water resources. Previously, the preferred methods for paraquat removal were adsorbent adsorption or catalytic degradation. Most research used powder catalysts for degradation, which were difficult to separate from the water after the completed reaction and unsuitable for industrial. Therefore, this study focused on the removal of paraquat at a high concentration in synthetic wastewater by increasing the function of photocatalytic degradation to the grain activated carbon. The preparation was done by photocatalytic degradation using titanium dioxide doped on grain–activated carbon (TiO_2/GAC) because the separation of the grain catalyst was less complicated than the powder catalyst. The calcined temperature affects the structure of the titanium dioxide. These results showed that the TiO_2/GAC preparation calcined at 500 °C had the highest paraquat degradation. In the degradation experiment, we studied the degradation of paraquat by UV catalysis using TiO_2/GAC during aeration and ozonation. The variables studied were air flow rate, ozone flow rate, catalyst loading, and degradation time. The experimental results showed that the optimum condition was a catalyst loading of 1.12 g/L under an ozone flow rate of 1,905 mg/h. Under these conditions, the paraquat removal percentage was 58.77% (Removal for adsorption = 10.07 %, Removal for degradation = 48.70 %), and the highest degradation rate was 6.76 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$. The adsorption of paraquat can be explained by pseudo–second–order (PSO) model that could be considered for describing the kinetic behavior. The degradation of paraquat in this study could be explained by a pseudo–zero–order (PZO) kinetic model, which represents a constant degradation rate.

Keywords: Activated carbon; Paraquat; Photocatalytic degradation; Titanium dioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันติ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ ให้คำชี้แนะ คำปรึกษาในงานวิจัยและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาที่ศึกษา เพื่อเป็นพื้นฐานและคำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทางานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณพิสันติ์ ผลโพธิ์ คุณพิมใจ ภู่ชนะกิจ และคุณเอกราช บำรุงไทยชัยชาญ ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ได้ทำงานวิจัยตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กรวิชญ์ มณียศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พาราควอต (Paraquat)	5
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)	6
2.2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	6
2.2.2 กลไกสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	8
2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	11
2.3.1 การแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามขนาดรูพรุน	11
2.3.2 การแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามขนาดอนุภาค	12
2.4 กระบวนการโซล – เจล (Sol – gel technology)	14
2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับและการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดย TiO_2/GAC	15
2.5.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)	15
2.5.2 จลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic degradation kinetics)	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	24
3.1 สารเคมี	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	25
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	25
3.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยกระบวนการโซล – เจล	26
3.5 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC	27
3.6 การศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศและโอโซน	27
3.6.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานพาราควอต	27
3.6.2 การเตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	27
3.7 การออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสม	30
3.7.1 การออกแบบการทดลองสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ	30
3.7.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	33
4.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	33
4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET (Brunauer–Emmett–Teller Method)	33
4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรวมกับเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (SEM–EDX)	35
4.1.3 วิเคราะห์คุณลักษณะทางอสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	36
4.1.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.5 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (WDXRF)	38
4.2 การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC	39
4.2.1 การศึกษาการดูดซับและจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	39
4.2.2 การศึกษาการสลายและจลนพลศาสตร์สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC	44
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตและสภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอต	60
4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ	60
4.3.2 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ	65
4.3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน	66
4.3.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก	86
ภาคผนวก ข	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างของพาราควอต	5
2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.3 กลไกสำหรับการดูดซับและกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อสลายพาราควอตบนวัสดุผสม TiO_2/GAC ภายใต้การฉายแสงยูวี	8
2.4 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง	12
2.5 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด	13
2.6 ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดขึ้นรูป	13
2.7 ขั้นตอนกระบวนการโซล – เจล ที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์	15
3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยกระบวนการโซล – เจล	26
3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง	28
4.1 ภาพ SEM–EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 ℃ (c) TiO_2/GAC 500 ℃ และ (d) TiO_2/GAC 600 ℃	35
4.2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 ℃ (c) TiO_2/GAC 500 ℃ และ (d) TiO_2/GAC 600 ℃	36
4.3 รูปแบบ FT–IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 ℃ (c) TiO_2/GAC 500 ℃ และ (d) TiO_2/GAC 600 ℃	38
4.4 ผลการทดลองการดูดซับพาราควอตของ TiO_2/GAC โดยสารละลายพาราควอตที่มีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และ TiO_2/GAC 2.0 กรัม	40
4.5 กราฟเชิงเส้นระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ เทียบกับเวลา t ของการดูดซับพาราควอตในที่มืด (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO	41
4.6 กราฟเชิงเส้นระหว่าง t/q_t เทียบกับเวลา t ของการดูดซับพาราควอตในที่มืด (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO	42
4.7 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการดูดซับพาราควอตในที่มืดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PSO	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งไม่มีการเติมอากาศ 44

4.9 การสลายพาราควอตภายใน 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบระหว่างการเติมอากาศโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมอากาศโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา 45

4.10 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ที่ซึ่งมีการเติมอากาศ 46

4.11 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เวลา 24 ชั่วโมงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ 48

4.12 กราฟเชิงเส้นระหว่าง ln (C/C_{D0}) เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO 49

4.13 กราฟเชิงเส้นระหว่าง 1/C เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO 49

4.14 กราฟการสลายพาราควอตเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ โดยใช้เส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PZO เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นจุดแทนผลลัพธ์ของ PSO 51

4.15 การสลายพาราควอตภายในเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบระหว่างการเติมโอโซนโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมโอโซนโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมโอโซนโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา 52

4.16 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน	53
4.18 กราฟเชิงเส้นระหว่าง ln (C/C_{D0}) เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO	55
4.19 กราฟเชิงเส้นระหว่าง 1/C เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO	55
4.20 กราฟแสดงความสามารถในการสลายเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนโดยใช้เส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PZO เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นจุดแทนผลลัพธ์ของ PSO	56
4.21 กราฟแสดงการกำจัดพาราควอตเทียบกับเวลาด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมอากาศ โดยจุดแทนผลจากการทดลองและเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของอัตราการสลาย ตามสมการที่ 4.1	58
4.22 กราฟแสดงการกำจัดพาราควอตเทียบกับเวลาด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมโอโซน โดยจุดแทนผลจากการทดลอง และเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของอัตราการสลาย ตามสมการที่ 4.1	59
4.23 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ ในสภาวะต่างๆ	60
4.24 Pareto Chart ของปัจจัยต่างๆ ต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25 Residual Plots ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ 62

4.26 Surface Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ 63

4.27 Contour Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ 64

4.28 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ 65

4.29 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน ในสภาวะต่างๆ 66

4.30 Pareto Chart ของปัจจัยต่างๆ ต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน 68

4.31 Residual Plots ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน 69

4.32 Surface Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซนต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน 70

4.33 Contour Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซนต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน 71

4.34 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ	30
3.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ	31
3.3 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน	32
3.4 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน	32
4.1 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	34
4.2 ตารางแสดงปริมาณสารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค WDXRF	39
4.3 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของแบบจำลอง PFO และ PSO	43
4.4 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศของแบบจำลอง PZO PFO และ PSO	50
4.5 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนของแบบจำลอง PZO PFO และ PSO	56
4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการสลายพาราควอตโดยใช้ TiO_2/UV	73
4.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูง	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สำนักงานสถิติแห่งชาติของประเทศไทยได้สำรวจลักษณะการทำงานของประชากร ปี 2557 พบว่าส่วนใหญ่มีการประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก ซึ่งผู้ประกอบอาชีพเกษตรกรรมคิดเป็นร้อยละ 34 ของผู้ประกอบอาชีพทั้งหมดในประเทศไทยซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุด [1] เนื่องจากการประกอบอาชีพเกษตรกรรมจำนวนมากทำให้มีการใช้สารเคมีปริมาณมากขึ้นด้วย และพบว่าปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ในปี พ.ศ. 2557 – 2561 สูงถึง 117,645 – 148,979 ตัน ซึ่งในปี พ.ศ. 2561 การนำเข้าอันดับที่ 1 คือ สารกำจัดวัชพืช (Herbicide) อันดับที่ 2 คือ สารกำจัดแมลง (Insecticide) และอันดับที่ 3 คือ สารป้องกันและกำจัดโรคพืช (Fungicide) [2] จากข้อมูลปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรของกรมวิชาการเกษตร แสดงให้เห็นว่า ในปี 2560 ประเทศไทยได้มีการนำเข้าสารกำจัดวัชพืชพาราควอต (Paraquat) ในปริมาณเท่ากับ 44,501 ตัน ซึ่งถือเป็นปริมาณการนำเข้าอันดับที่สอง แต่มีมูลค่าสูงถึง 3,816 ล้านบาท ซึ่งเป็นมูลค่าที่สูงเป็นอันดับหนึ่งของวัตถุอันตรายที่นำเข้ามาในประเทศไทย [3] ในประเทศไทยมีการตรวจพบพาราควอตในน้ำใต้ดินสูงถึง 18.9 ไมโครกรัม/ลิตร [4] และมีการตรวจพบการปนเปื้อนของพาราควอตในแม่น้ำจันทบุรี ในตะกอนดินพบการปนเปื้อนอยู่ที่ 3.33 – 8.28 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนตอนบนของแม่น้ำพบการปนเปื้อนอยู่ที่ 0.07 – 13.05 ไมโครกรัม/ลิตร [5] นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบพาราควอตในแหล่งน้ำต่างๆ ได้แก่ น้ำบนผิวดิน น้ำดื่ม และน้ำบาดาล [6] พาราควอตสามารถดูดซับได้ดีในดินและมีความเสถียรสูง ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของพาราควอตนั้นมากถึง 20 ปี และพาราควอตอาจเกาะกับตะกอนแขวนลอยในแหล่งน้ำ ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของพาราควอตในน้ำอยู่ระหว่าง 2 – 820 ปี ขึ้นอยู่กับแสงแดดและความลึกของน้ำ

พาราควอต (Paraquat) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการป้องกันและกำจัดวัชพืชชนิดดูดความชื้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม bipyridyl เป็นสารกำจัดวัชพืชแบบไม่เลือกทำลาย (Non-selective contact herbicide) ซึ่งเป็นสารทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Contacts membrane disputers) มีการใช้ที่บริเวณใบ มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นสูง และยังสามารถใช้ควบคุมวัชพืชน้ำได้ พาราควอตเป็นสารกำจัดวัชพืชประเภทไม่เลือกทำลาย ซึ่งสามารถยึดจับโดยอนุภาคดินได้ดี อีกทั้งยังมีโอกาสแพร่กระจายและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้น้อย เกษตรกรนิยมใช้ฉีดพ่นสำหรับวัชพืชหลังพืชงอก พาราควอตที่นำไปใช้จะอยู่ในรูปของเกลือพารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอตไดคลอไรด์ มีรายงานการศึกษาที่กล่าวถึงผลกระทบต่อสุขภาพของพาราควอตเป็นจำนวนมาก ซึ่งพาราควอตสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางการกิน การสัมผัส และการหายใจ โดยจะทำให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะส่วนต่างๆ ของร่างกายที่สัมผัส ได้แก่ เล็บ ตา จมูก ปาก และผิวหนัง [6], [7] ถ้าหากพาราควอตเข้าสู่ร่างกายโดยทางปากเพียงปริมาณเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อท่อทางเดินอาหารและทางเดินหายใจ และอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตได้ในที่สุด สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ได้จัดประเภทพาราควอตว่าพาราควอตเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ซึ่งเป็นพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจทำให้เกิดผลเสียระยะยาวต่อสุขภาพของมนุษย์และระบบนิเวศ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมร้ายแรง เนื่องจากมีการใช้พาราควอตกำจัดวัชพืชในจังหวัดจันทบุรีมาเป็นเวลาหลายสิบปี ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่าจะมีการแพร่กระจายและสะสมในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อากาศ น้ำ ดิน พืช และสัตว์ เป็นต้น อีกทั้งองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้จัดประเภทพาราควอตเป็นสารที่เป็นพิษประเภท 2 (เป็นพิษปานกลาง) แสดงให้เห็นว่า เกษตรกรและคนงานเกษตรที่ได้รับพาราควอต อาจส่งผลต่อการพัฒนาระบบประสาทหรือสมอง ผิวหนัง และการสืบพันธุ์ที่อาจเกิดความผิดปกติได้ [8]

การกำจัดพาราควอตสามารถทำได้หลายวีธี เช่น การดูดซับ การสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการสลายทางชีวภาพ [9] แต่การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการทางชีวภาพมีการใช้เวลานาน ส่วนการกำจัดโดยการดูดซับพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ เมื่อนำมาใช้ในการกำจัดพาราควอตที่มีความเข้มข้นสูง จากมีข้อจำกัดในเรื่องของความจุในการดูดซับ อีกทั้งเมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวจะต้องเปลี่ยนและนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วไปกำจัด ด้วยเหตุนี้จะก่อเกิดของเสียหรือมลพิษมากขึ้น ดังนั้นการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะกรณีที่พาราควอตมีความเข้มข้นสูง ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นผงในการกำจัดพาราควอต ซึ่งการแยกตัวเร่งปฏิกิริยามีความซับซ้อนสูง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาเคลือบลงบนถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นเกล็ด เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงให้กับถ่านกัมมันต์และเพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยปัจจัยที่ได้ศึกษาสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงยูวีโดยใช้ TiO_2/GAC โดยจะทดสอบระหว่างการเติมอากาศและการเติมโอโซน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการสลาย รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์และสภาวะที่เหมาะสมในการสลายพาราควอต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC

1.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายพาราควอตโดยมีการเติมอากาศและการเติมโอโซน

1.2.3 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ทั้งการเติมอากาศและการเติมโอโซน

1.2.4 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO2/GAC ทั้งการเติมอากาศและการเติมโอโซน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC โดยวิธีการโซล – เจล

1.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

(1) การวิเคราะห์คุณลักษณะทางอสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

(2) วิเคราะห์ลักษณะและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรวมกับเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (SEM–EDX)

(3) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR)

(4) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (WDXRF)

(5) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามเทคนิคของ BET

1.3.3 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของพาราควอตด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรอิสระ ได้แก่

(1) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 400 – 600 องศาเซลเซียส

(2) การทดลองการสลายพาราควอตแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ แบบเติมอากาศ และแบบเติมโอโซน

(2.1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 – 3.0 กรัม/ลิตร ภายใต้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 – 2.5 ลิตร/นาที

(2.2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 – 1.5 กรัม/ลิตร ภายใต้อัตราการไหลของโอโซนเท่ากับ 1,061 – 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง

(3) เวลาในการทำปฏิกิริยา 0 – 24 ชั่วโมง

ตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้นของสารละลายพาราควอตที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาต่างๆ

ตัวแปรควบคุม คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายพาราควอต 300 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มของแสงยูวี อุณหภูมิในการทดลอง และความเร็วรอบในการปั่นกวน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายพาราควอตและศึกษาตัวแปรทีมีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง รวมทั้งอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอต ซึ่งสามารถนำผลการทดลองที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมและการเกษตรที่มีการใช้สารพาราควอต เพื่อช่วยลดมลภาวะน้ำเสียก่อนหรือหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งอาจจะช่วยลดปัญหาการใช้ปริมาณตัวดูดซับให้น้อยลง นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

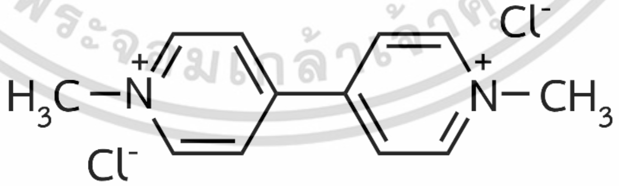
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งรวมทั้งศึกษาข้อมูลของสารพาราควอต ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดและการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการโซล – เจล รวมไปถึงการศึกษากลไกสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จลนพลศาสตร์การดูดซับและการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดย TiO_2/GAC และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พาราควอต (Paraquat)

พาราควอตเป็นสารกำจัดวัชพืชแบบไม่เลือกทำลาย (Non – selective contact herbicide) และใช้เพื่อป้องกันและกำจัดวัชพืชชนิดดูดความชื้น ซึ่งเป็นสารทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Contacts membrane disputers) มีการใช้ที่ใบและสามารถใช้ในน้ำได้ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม bipyridyl พาราควอตมีจำหน่ายทั่วไปทั้งในรูปของเหลวและเม็ด มีสูตรทางเคมีคือ 1,1’–dimethyl–4,4’–bipyridinium dichloride ($C_{12}H_{14}N_2Cl_2$) ชื่อทางการค้าที่พบมากที่สุดสำหรับพาราควอตคือ กรัมม็อกโซน (Gramoxone) [10] โดยมีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของพาราควอต

พาราควอตสามารถละลายได้ดีในน้ำ ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำได้ 700 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 257.16 กรัม/โมล พาราควอตเป็นสารที่ไม่ระเบิด ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวไฟ มีสมบัติในการกัดกร่อนโลหะ มีค่าครึ่งชีวิตยาวนาน และมีความเสถียรในสารละลายกรดหรือกลาง แต่จะแตกตัวง่ายในสารละลายด่าง จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของพาราควอตอยู่ที่ 300 และ 175 – 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่ความดันบรรยากาศ นอกจากนี้พาราควอตยังจัดเป็นสารพิษและสารก่อมะเร็ง ซึ่งเป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆของร่างกายที่สัมผัสสาร เช่น เล็บ ตา จมูก ปาก ผิวหนัง เป็นต้น อีกทั้งยังส่งผลต่อระบบหายใจ ระบบประสาท และไต

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ที่นิยมนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรมางเคมีสูง ไม่ละลายน้ำ ไม่เป็นพิษ ราคาถูก และคุณสมบัติทางแสง มีชื่อทางการค้า คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไททานิก แอนไฮไดร (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania) ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และสมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นของแข็งสีขาว มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.9 กรัม/โมล มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.84 – 4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่ละลายในน้ำ มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2,500 และ 1,850 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีพื้นที่ผิวประมาณ 50 ตารางเมตร/กรัม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 20 นาโนเมตร และความถ่วงจำเพาะ 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร [11]

2.2.1 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถแบ่งเป็น 3 โครงสร้างหลัก ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งโครงสร้างที่แตกต่างกันมีดังต่อไปนี้

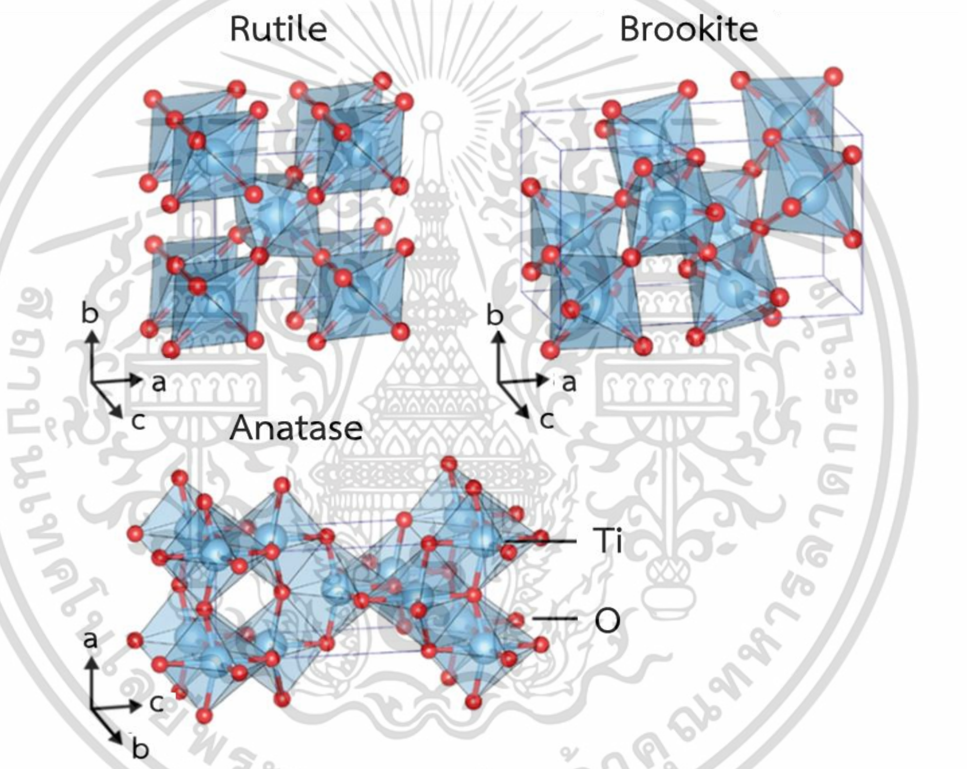
(1) อะนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ผลึกแบบนี้มีด้านยาวเท่ากัน 2 ด้าน ส่วนด้านที่ 3 มีความยาวต่างออกไป และทั้ง 3 ด้านทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกัน มีค่าแลตทิซ a b และ c เท่ากับ 3.782 3.782 และ 9.502 อังสตรอม ตามลำดับ หากได้รับความร้อนสูงกว่า 600 – 700 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นรูไทล์

(2) รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ผลึกแบบนี้มีด้านยาวเท่ากัน 2 ด้าน ส่วนด้านที่ 3 มีความยาวต่างออกไป และทั้ง 3 ด้านทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกันมีค่าแลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิช a b และ c เท่ากับ 4.584 4.584 และ 2.953 อังสตรอม ตามลำดับ รูไทล์เป็นโครงสร้างที่มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูง

(3) บรูไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างเป็นออโธรอมบิก (Orthorhombic) ผลึกแบบนี้ จะมีด้านทั้ง 3 ด้านยาวไม่เท่ากัน แต่จะทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกัน โดยมีแลตทิช a b และ c เท่ากับ 5.436 9.166 และ 5.135 อังสตรอม ตามลำดับ การเกิดโครงสร้างแบบบรูไคท์จะเกิดได้น้อย และเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 – 700 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นรูไทล์

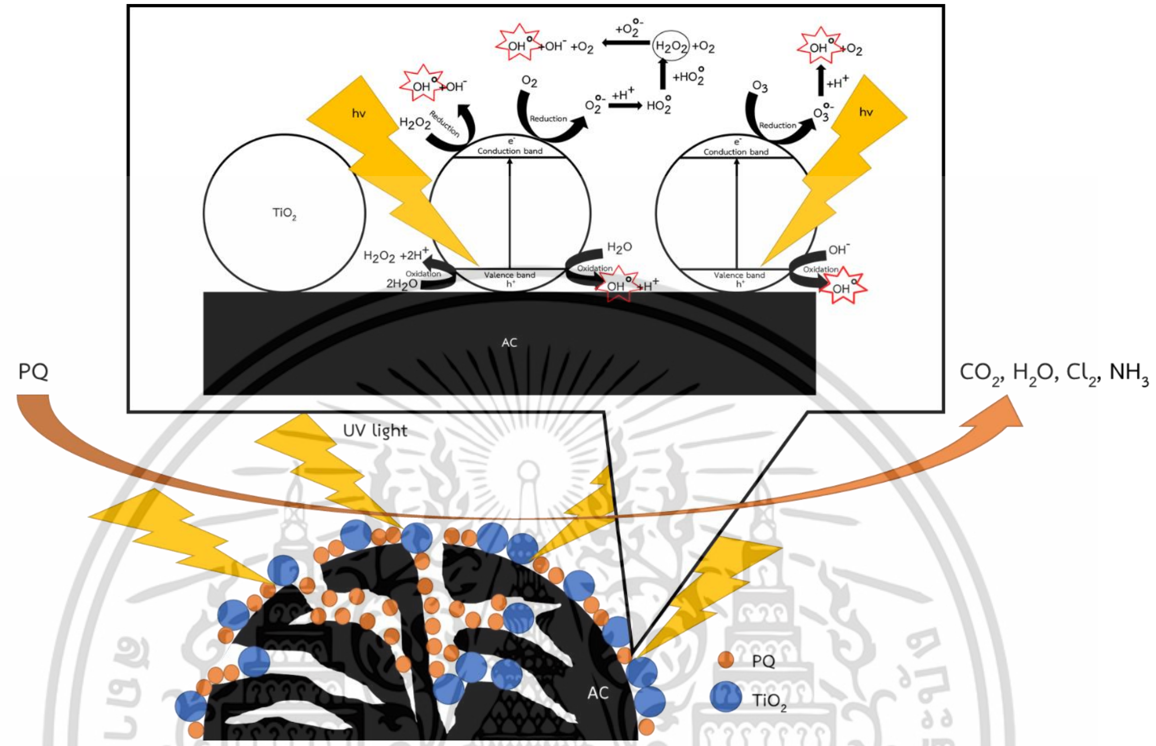


รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ [12]

โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง คือ อะนาเทสและรูไทล์ โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอะนาเทสทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron – hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะโครงสร้างอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนแถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างรูไทล์ เท่ากับ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กลไกสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 2.3 กลไกสำหรับการดูดซับและกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อสลายพาราควอตบนวัสดุผสม TiO_2/GAC ภายใต้การฉายแสงยูวี

กลไกของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แสดงดังรูปที่ 2.3 เริ่มต้นเมื่อแสงกระทบกับไทเทเนียมไดออกไซด์จะการดูดซับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (valence band) และเคลื่อนที่ไปอยู่ในแถบการนำ (Conduction band) ทำให้ในแถบเวเลนซ์เกิดหลุมประจุบวก (Hole, S_{vb^+}) ขึ้น ตามสมการที่ 2.1

$$TiO_2 \xrightarrow{\text{Photon (hv)}} S_{cb^-} + S_{vb^+} \qquad (2.1)$$

เมื่อน้ำ (H_2O) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) สัมผัสกับหลุมประจุบวกและจะก่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (Hydroxyl radical, OH°) ตามสมการที่ 2.2 – 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_2O + S_{vb^+} \longrightarrow OH{\bullet}S + H^+ \longrightarrow OH^{\circ} + H^+ + S \qquad (2.2)$$

$$2H_2O + 2S_{vb^+} \longrightarrow 2OH{\bullet}S + 2H^+ \longrightarrow H_2O_2 + 2H^+ + 2S \qquad (2.3)$$

$$OH^- + S_{vb^+} \longrightarrow OH{\bullet}S \longrightarrow OH^{\circ} + S \qquad (2.4)$$

เมื่อมีการเติมอากาศ ออกซิเจนจะจับกับอิเล็กตรอนที่แถบการนำกลายเป็นซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน (Superoxide radical anion, $O_2^{\circ -}$) ตามสมการที่ 2.5

$$O_2 + S_{cb^-} \longrightarrow O_2^-{\bullet}S \longrightarrow O_2^{\circ -} + S \qquad (2.5)$$

เมื่อซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน ทำฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเกิดเป็นไฮโดรเปอโรซิลเรดิคอล (HO_2°) เมื่อไฮโดรเปอโรซิลเรดิคอล รวมตัวกันจะเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำและซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ตามสมการที่ 2.6 – 2.9

$$O_2^{\circ -} + H^+ \longrightarrow HO_2^{\circ} \qquad (2.6)$$

$$2HO_2^{\circ} \longrightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (2.7)$$

$$H_2O_2 + S_{cb^-} \longrightarrow OH{\bullet}S + OH^- \longrightarrow OH^{\circ} + OH^- + S \qquad (2.8)$$

$$H_2O_2 + O_2^{\circ -} \longrightarrow OH^{\circ} + OH^- + O_2 \qquad (2.9)$$

$$O_2 + 2H^+ + 3S_{cb^-} \longrightarrow O_2{\bullet}S + 2H^+{\bullet}S \longrightarrow OH{\bullet}S + OH^-{\bullet}S + S \longrightarrow OH^{\circ} + OH^- + 3S \qquad (2.10)$$

$$O_2 + 2H^+ + 2S_{cb^-} \longrightarrow H_2O_2 + 2S \qquad (2.11)$$

$$O_2^{\circ -} + HO_2^{\circ} + H^+ \longrightarrow H_2O_2 + O_2 \qquad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไฮดรอกซิลเรดิคอลจะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดการสลายตัวได้ [13] เมื่อมีการเติมโอโซน (O_3) โอโซนถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นออกซิเจนและออกซิเจนเรดิคอล (O°) ตามสมการที่ 2.13 [14]

$$O_3 \xrightarrow{\text{Photon (hv)}} O_2 + O^{\circ} \qquad (2.13)$$

เมื่อออกซิเจนเรดิคอลรวมกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$O^{\circ} + H_2O \longrightarrow 2OH^{\circ} \qquad (2.14)$$

$$O^{\circ} + H_2O \longrightarrow H_2O_2 \qquad (2.15)$$

เมื่อโอโซนไปจับกับอิเล็กตรอนที่แถบการนำกลายเป็นโอโซไนด์เรดิคอลแอนไอออน (Ozonide radical anion, $O_3^{\circ-}$) เมื่อโอโซไนด์เรดิคอลแอนไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนจะเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลและออกซิเจน ตามสมการที่ 2.16 และ 2.17 [15]

$$O_3 + S_{cb^-} \longrightarrow O_3^{-}\cdot S \longrightarrow O_3^{\circ-} + S \qquad (2.16)$$

$$O_3^{\circ-} + H^{+} \longrightarrow OH^{\circ} + O_2 \qquad (2.17)$$

ปฏิกิริยาโดยรวมในการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดย TiO_2/GAC แสดงดังสมการดังต่อไปนี้

$$PQ \xrightarrow{TiO_2/GAC + hv} \text{Intermediates} \longrightarrow H_2O + CO_2 + Cl_2 + NH_3 \qquad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากถึงร้อยละ 87 – 97 และมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบส่วนน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน รวมทั้งสารประกอบต่างๆ ทั้งที่อยู่ในวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์หรือสารที่เติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการผลิต และมีโครงสร้างเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะภายในสูง [16], [17] เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ทำให้สามารถกักเก็บโมเลกุลต่างๆ ในพื้นผิวภายในได้ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์มีค่าประมาณ 0.2 – 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะภายในมากถึง 400 – 2500 ตารางเมตร/กรัม ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งมีสมบัติทางโครงสร้างรูพรุนและสมบัติทางเคมีที่พื้นผิวที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถนำมากลับฟื้นสภาพได้ ซึ่งทำให้ลดต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก จึงมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างหลากหลาย เช่น เป็นสารดูดซับ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา [18] สำหรับอุตสาหกรรมจำนวนมากได้มีการใช้ถ่านกัมมันต์ในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ โดยวิธีที่ง่ายที่สุด คือ การนำไปใช้กรองน้ำ ซึ่งสามารถใช้ในการบำบัดน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมและบ้านเรือน [19] ใช้ในการดูดซับสีหรือกำจัดสีของสารละลาย ใช้เป็นตัวดูดซับกลิ่น และใช้เป็นตัวดูดซับสารกรองในการควบคุมมลพิษหรือกำจัดกลิ่นในอากาศ [20]

2.3.1 การแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามขนาดรูพรุน [21]

ขนาดรูพรุนบนผิวของถ่านกัมมันต์ มี 3 ประเภท ดังนี้

(1) รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore)

รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมใช้ในการดูดซับไอระเหยและแก๊ส

(2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)

รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สีย้อม สารฟอกสี เป็นต้น

(3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore)

รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ เป็นทางผ่านให้สารผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามขนาดอนุภาค

ถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาดของอนุภาคหลักๆได้ 3 ชนิด ดังนี้

(1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon)

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ชนิดผง มีขนาดรูพรุนระหว่าง 5 – 150 อังสตรอม ข้อดีของถ่านกัมมันต์ผง คือ ต้นทุนต่ำและสามารถปรับเปลี่ยนตามการใช้งานได้ ปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ผงสามารถเพิ่มหรือลดได้ตามสะภาวะการเปลี่ยนแปลงของระบบ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงส่วนใหญ่ใช้งานกับของเหลว โดยผสมลงในของเหลวนั้น และเมื่อมีการดูดซับแล้วจึงแยกถ่านกัมมันต์ชนิดผงออกโดยวิธีตกตะกอนและการกรองแยกออกมา โดยทั่วไปจะใช้ถ่านกัมมันต์ผงได้เพียงครั้งเดียวในกระบวนการ และสามารถเพิ่มเติมปริมาณการใช้ได้ง่าย ผงถ่านที่เปียกหรืออิ่มตัวแล้วไม่สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้ แต่กำจัดได้โดยการเผาหรือฝังกลบ ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดผงแสดงดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง

ที่มา: http://pptcorps.blogspot.com/2017/09/activated-carbon.html

(2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด มีขนาดเม็ดหลายขนาดแตกต่างกันเกิดขึ้นจากการบดและการร่อนคัดขนาด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.2 – 5 มิลลิเมตร ถ่านชนิดเกล็ดนั้นมีข้อดีกว่าชนิดผง ทั้งมีความแข็งของเม็ดถ่านและสามารถใช้งานได้ในระยะยาวกว่าชนิดผง ไม่ฟุ้งกระจาย สามารถกรองแก๊สหรือของเหลวปริมาณมากๆ และสามารถนำกลับมาฟื้นฟูสภาพ เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในการบำบัดของเหลวหรือแก๊ส สามารถใช้ได้ทั้งระบบสารกรองอยู่นิ่งกับที่หรือสารกรองที่หมุนเวียนเคลื่อนที่ในระบบ ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดแสดงดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด

ที่มา: http://pptcorps.blogspot.com/2017/09/activated-carbon.html

(3) ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดขึ้นรูป (Extruded activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 – 5 มิลลิเมตร การอัดขึ้นรูปและการใช้วัสดุในการอัดมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีความแข็งเหมาะกับการใช้งานหนัก ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ มีแรงดันต้านทานต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีปริมาณฝุ่นละอองต่ำซึ่งเหมาะสำหรับการกรองดูดซับแก๊ส ลักษณะถ่านกัมมันต์ชนิดอัดขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดขึ้นรูป

ที่มา: https://www.carbokarn.co.th

ถ่านกัมมันต์เปนสารเฉื่อยซึ่งเหมาะสำหรับเป็นตัวรองรับให้ตัวเรงปฏิกิริยาที่เปนโลหะมาเกาะอยูบนพื้นที่ผิวได้ดี เพื่อเปนการเพิ่มพื้นที่ผิวทั้งหมดใหกับตัวเรงปฏิกิริยา สวนใหญตัวรองรับมักเปนสารที่มีรูพรุน (Porous) จำนวนมากและพื้นที่ผิวสวนใหญจะอยูในรูพรุน สวนพื้นที่ขางนอกของตัวรองรับจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และตัวเรงปฏิกิริยาจะอยูในรูพรุนเหลานั้น ซึ่งตัวรองรับสามารถมีรูพรุนได้ตั้งแต 1 – 1,000 ตารางเมตร/กรัม อาจอยูในรูปเม็ดหรือผง ตัวรองรับที่นิยมใชในอุตสาหกรรม คือ Al_2O_3 SiO_2 และถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการโซล – เจล (Sol – gel technology)

กระบวนการโซล – เจล เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถช่วยให้โลหะกระจายตัวได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ หลักการของกระบวนการโซล – เจล คือการเปลี่ยนแปลงจากระบบที่เป็นของเหลว (Sol) ไปเป็นระบบที่เป็นเจลของแข็ง (Gel) ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการโซล – เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่นของน้ำ (water condensation) และการควบแน่นของแอลกอฮอล์ (Alcohol condensation) ตามสมการที่ 2.19 – 2.21 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล คือ ความเป็นกรด – เบส ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา [22]

Hydrolysis: $$\text{M-O-R} + H_2O \longrightarrow \text{M-OH} + \text{R-OH} \qquad (2.19)$$

Water condensation $$\text{M-OH} + \text{HO-M} \longrightarrow \text{M-O-M} + H_2O \qquad (2.20)$$

Alcohol condensation $$\text{M-O-R} + \text{HO-M} \longrightarrow \text{M-O-M} + \text{R-OH} \qquad (2.21)$$

โดยให้ M แทนโลหะ เช่น ซิลิกอน (Si) เซอร์โคเนียม (Zr) ไทเทเนียม (Ti) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น และ OR แทนหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) สารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียม (IV) บิวทอกไซด์ (Titanium (IV) N–butoxide) ซึ่ง R แทนหมู่บิวทิลของ titanium (IV) N–butoxide เขียนแทนได้เป็น $Ti(OR)_4$ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดังต่อไปนี้

$$\text{Ti-(O-R)}_4 + mH_2O \longrightarrow \text{Ti-(O-R)}_{4-n}\text{-OH}_n + n\text{R-OH} \qquad (2.22)$$

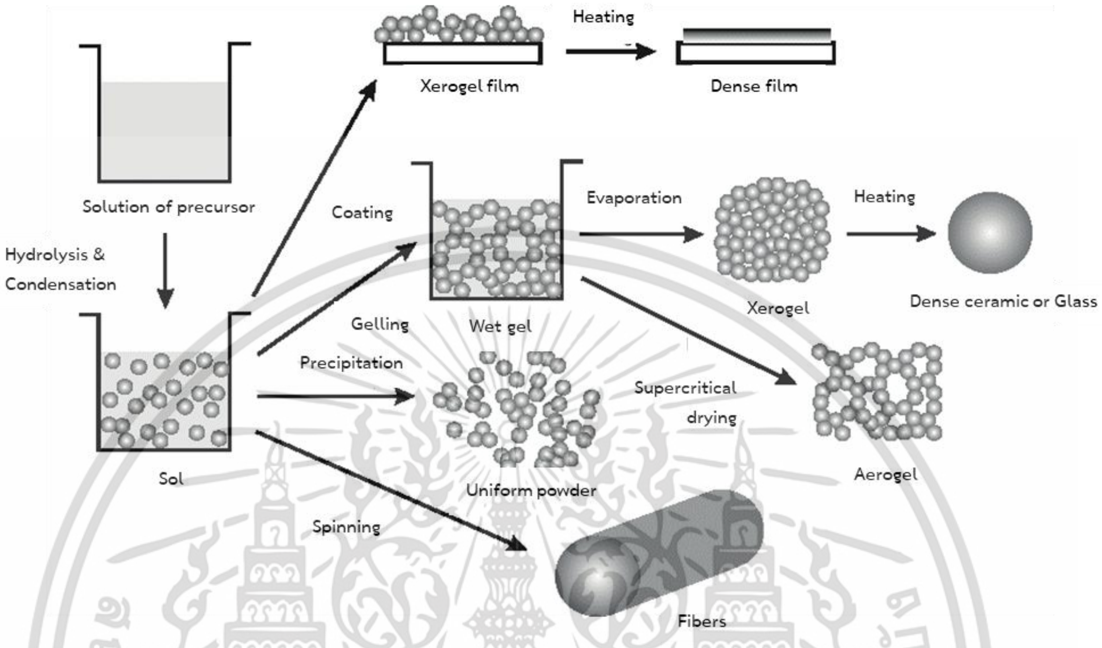
$$\text{Ti-OH} + \text{HO-Ti} \longrightarrow \text{Ti-O-Ti} + H_2O \qquad (2.23)$$

$$\text{Ti-O-R} + \text{HO-Ti} \longrightarrow \text{Ti-O-Ti} + \text{R-OH} \qquad (2.24)$$

กระบวนการโซล – เจล เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยปกติจะดำเนินการผ่านขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดของไทเทเนียม (IV) อัลคอกไซด์ ซึ่งกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซล – เจล ทำให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เส้นใย ฟิล์ม ผง เป็นต้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนกระบวนการโซล – เจล ที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ [22]

2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับและการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดย TiO_2/GAC

2.5.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการศึกษาอัตราเร็วของการเกิดกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นบนตัวดูดซับ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง อาจเกิดขึ้นได้ทั้งช้าและเร็ว สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมใช้กันคือ จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo–first–order) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo–second–order) ซึ่งสามารถอธิบายการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ตัวแปรส่งผลต่ออัตราการดูดซับโดยพื้นฐานคือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (k) ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ณ เวลา t ใดๆ (q_t) ซึ่ง q_t สามารถคำนวณตามสมการที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)\,V}{W} \tag{2.25}$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นของพาราควอตในสารละลาย ณ เวลาเริ่มต้น ($mg{\cdot}L^{-1}$)

C_t คือ ความเข้มข้นของพาราควอตในสารละลาย ณ เวลา t ใดๆ ($mg{\cdot}L^{-1}$)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

(1) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo–first–order, PFO)

สมมุติฐานของการดูดซับเป็นผลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและเป็นการดูดซับทางเคมี การดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren [23] ตามสมการที่ 2.26

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1\,(q_e - q_t) \tag{2.26}$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (h^{-1})

q_t คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ณ เวลา t ใดๆ ($mg{\cdot}g^{-1}$)

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ($mg{\cdot}g^{-1}$)

t คือ เวลา (h)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.26 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตคือ t = 0 ถึง t = t และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ ทำการจัดเรียงสมการใหม่สำหรับการสร้างกราฟข้อมูลเชิงเส้นตามสมการที่ 2.28

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \tag{2.28}$$

และ

$$q_t = q_{1e}(1 - e^{-k_1 t}) \tag{2.29}$$

โดยที่ q_{1e} คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับที่สมดุลซึ่งคำนวณโดย PFO (mg g^{-1})

เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ k_1 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\ln q_e$ ซึ่งสามารถคำนวณหา q_{1e} ได้

(2) จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo–second–order, PSO)

สมมุติฐานของการดูดซับเป็นผลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) การดูดซับขึ้นอยู่กับความจุของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล [24] ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับได้โดยใช้สมการที่ 2.30

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \tag{2.30}$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (g·mg^{-1}·h^{-1})

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.30 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตคือ t = 0 ถึง t = t และ q_t = 0 ถึง q_t = q_t ทำการจัดเรียงสมการใหม่ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} k_2 t \tag{2.31}$$

สมการ 2.31 จัดเรียงใหม่สมการใหม่สำหรับการสร้างกราฟข้อมูลเชิงเส้นตามสมการที่ 2.32

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$q_t = q_{2e} \frac{q_{2e}k_2t}{1 + q_{2e}k_2t} \quad (2.33)$$

โดยที่ q_{2e} คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับที่สมดุล ซึ่งคำนวณโดย PSO ($mg{\cdot}g^{-1}$)

เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง t/q_t กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ ซึ่งสามารถคำนวณหา q_{2e} และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/k_2q_e^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหา k_2 ได้

2.5.2 จลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic degradation kinetics)

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสลายพาราควอตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง สมการที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาคือ สมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์เทียม สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีการศึกษามากมายเกี่ยวกับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมสำหรับความเข้มข้นของสารตั้งต้น [23]–[25]

(1) จลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับศูนย์เทียม (Pseudo–zero–order, PZO)

สมมติฐานของแบบจำลอง PZO คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น แต่ขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณแสง เอนไซม์ เป็นต้น อาจจะพบปฏิกิริยาอันดับศูนย์ต่อเมื่อพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาอิ่มตัวไปด้วยสารตั้งต้น [26] สมการของปฏิกิริยาอันดับศูนย์เทียมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$r_0 = \frac{dC}{dt} = -K_0 \quad (2.34)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.34 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตคือ t = 0 ถึง t = t และ $C = C_{D0}$ ถึง C = C ได้สมการที่ 2.35 และเมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง C กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-K_0$ ซึ่งสามารถคำนวณหา K_0 ได้และจุดตัดแกน Y เท่ากับ C_{D0}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = C_{D0} - K_0 t \tag{2.35}$$

โดยที่ r_0 คือ อัตราการสลายตัวของพาราควอตในอันดับศูนย์เทียม ($mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$)

C_{D0} คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอตสำหรับการสลาย ($mg{\cdot}L^{-1}$)

C คือ ความเข้มข้นของพาราควอต ($mg{\cdot}L^{-1}$)

K_0 คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับศูนย์เทียม (h^{-1})

(2) จลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo–first–order, PFO)

สมมติฐานของแบบจำลอง PFO คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงตัวเดียว สมการของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.36 [27]

$$r_1 = \frac{dC}{dt} = -K_1 C \tag{2.36}$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.36 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตคือ $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $C = C_{D0}$ ถึง $C = C$ ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\ln \frac{C_{D0}}{C} = K_1 t \tag{2.37}$$

และเมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln (C/C_{D0})$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ K_1

$$C = C_{D0}\, e^{-K_1 t} \tag{2.38}$$

โดยที่ r_1 คือ อัตราการสลายตัวของพาราควอตในอันดับหนึ่งเทียม ($mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$)

K_1 คือ ค่าคงที่อัตราการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับหนึ่งเทียม (h^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) จลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับสองเทียม (Pseudo–second–order, PSO)

สมมติฐานของแบบจำลอง PZO คือเป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาทั้งสองเป็นสารชนิดเดียวกัน หรือ ต่างชนิดกันแต่ความเข้มข้นเท่ากัน [28] สมการของปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.39

$$r_2 = \frac{dC}{dt} = -K_2C^2 \qquad (2.39)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.39 ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตคือ t = 0 ถึง t = t และ $C = C_{D0}$ ถึง C = C ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{C} = K_2t + \frac{1}{C_{D0}} \qquad (2.40)$$

และเมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง 1/C กับ t จะได้ความชันเท่ากับ K_2 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/C_{D0}$

$$C = \frac{C_{D0}}{C_{D0}K_2t + 1} \qquad (2.41)$$

โดยที่ r_2 คือ อัตราการสลายตัวของพาราควอตในอันดับสองเทียม ($mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$)

K_2 คือ ค่าคงที่อัตราการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับสองเทียม ($L{\cdot}mg^{-1}{\cdot}h^{-1}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลกระทบที่ตามมาจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร ทำให้สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในแหล่งน้ำซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรงทั่วทั้งโลก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีเหล่านี้ ซึ่งพาราควอตเป็นหนึ่งในสารกำจัดศัตรูพืชที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงมีการศึกษาวิธีที่ใช้ในการสลายพาราควอตหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลายที่มี TiO_2 Degussa P25 ที่ฉายด้วยแสงยูวีที่ค่า pH ตามธรรมชาติ (ประมาณ 5.8) [29] ในการตรวจหาปริมาณพาราควอตในน้ำสามารถใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) โดยการตรวจจับรังสีอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร วิธีนี้นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการควบคุมคุณภาพของน้ำและอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ซึ่งมีการจำกัดปริมาณของพาราควอตสำหรับน้ำดื่มอยู่ที่ 60 – 90 นาโนกรัม/ลิตร ดังนั้นสารกำจัดวัชพืชเหล่านี้สามารถตรวจจับและวัดปริมาณในระดับที่ต่ำกว่าขีดจำกัดที่สหภาพยุโรปกำหนด [30] Florêncio และคณะ (2547) ศึกษาการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสลายสารกำจัดวัชพืชพาราควอตด้วยแสง เทคนิคนี้ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของพาราควอตโดยใช้ Ti_1-xFe_xO_2 (x = 0% และ 4%) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นแหล่งกำเนิดรังสี ปฏิกิริยาการสลายสามารถตรวจได้จากการวัดค่าความเข้มข้นโดยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV–Vis spectroscopy) และผลิตภัณฑ์สามารถวิเคราะห์โดย Electrospray ionization mass spectrometry (ESIMS) Collision-induced dissociation (CID) และ Tandem mass spectrometry (MS / MS) [31]

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โอโซนในการสลายพาราควอต ซึ่งสามารถสลายพาราควอตเป็น N-methyl isonicotinic acid และ amidic intermediates โดยใช้ Mn (II) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของระบบ [32] Fatemeh Zahedi และคณะ (2558) ได้ศึกษาการสลายตัวของสารพาราควอตในตัวอย่างจริงโดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) เคลือบบนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการเคลือบแบบโซล – เจล ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการจะใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการสลายสารอินทรีย์ (COD) ผลการทดลองระบุว่าที่ ค่า pH ที่เหมาะสม คือ 5.8 และมีร้อยละการสลายตัวสูงสุดเท่ากับ 84.39 ในเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้การฉายรังสีที่มองเห็นได้ด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10 ppm จากผลของค่า COD หลังจาก 8 ชั่วโมง พบว่าค่า COD มีค่าลดลงหลังจากทำการสลายพาราควอต ยิ่งไปกว่านั้นผลการทดลองระบุว่าโครงสร้างนาโนของฟิล์มบาง N,S/TiO_2 นั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่และมีความเสถียร ซึ่งแสดงให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพในการสลายพาราควอต และในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะของ N,S/TiO_2 สามารถทำได้โดยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDX) และเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR) [33] Le P.T และคณะ (2564) ศึกษาการสลายไกลโฟเสตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนถ่านชีวภาพแกลบ (RHB) ซึ่งความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และถ่านชีวภาพ TiO_2/RHB อาจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพสำหรับใช้ในการสลายไกลโฟเสตด้วยแสงและสารมลพิษอินทรีย์ [34] M. H. EL-Saeid และคณะ (2564) ศึกษาการสลายยาฆ่าแมลง (ไดลดรินและเดลทาเมทริน) โดยใช้แสงยูวีในน้ำที่แตกต่างกันจาก 3 แห่ง ที่รวบรวมจากแหล่งน้ำในประเทศซาอุดิอาระเบียโดยใช้รังสี ยูวีที่ 254 และ 306 นาโนเมตร เพื่อกระตุ้นการสลายตัวด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับสารกำจัดศัตรูพืชที่ทดสอบทั้งสองนั้น ผลที่ได้ระบุว่ารังสียูวีที่ 306 นาโนเมตร จะเพิ่มการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยขึ้นอยู่กับเวลา [35] M. Raashid และคณะ (2564) ศึกษาการสลายอิมิดาคลอพริด (Imidacloprid) โดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และเหล็ก-ซีโอไลต์ (Fe-zeolite) และใช้โอโซนพร้อมกัน ซึ่งผลที่ได้พบว่าโอโซนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายอิมิดาคลอพริด [36]

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้สำหรับการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [37] เนื่องจาก TiO_2 มีคุณสมบัติเชิงแสงและมีอัตราการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่สูง ซึ่งโครงสร้างอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนแถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างรูไทล์ เท่ากับ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ [11] โครงสร้างอะนาเทสจึงสามารถกระตุ้นด้วยรังสียูวีได้ดีที่สุด เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่น้อยกว่าโครงสร้างรูไทล์ ซึ่งแสงยูวีทั้ง UV–A, UV–B และ UV–C มีค่าพลังงานโฟตอน (Photon energy) เท่ากับ 3.10 – 3.94, 3.94 – 4.43 และ 4.43 – 12.40 eV ตามลำดับ [38] ซึ่ง UV–C ให้พลังงานมากที่สุด จึงสามารถการกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้มากขึ้น Y. Hirahara, H. Ueno และ K. Nakamuro ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสลายสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส ซึ่งพบว่า UV–C สามารถสลายได้มากที่สุด และรองลงมา คือ UV–B ส่วน UV–A ให้ผลลัพธ์ที่ต่ำที่สุด [39] อีกทั้งยังมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำต่างๆ เช่น ZnO, TiO_2, V-TiO_2, Ti_1-xFe_xO_2 และ Cu-TiO_2/SBA-15 ในการสลายสารมลพิษอินทรีย์ด้วยแสงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย ซึ่งวิธีการทั่วไปในการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุรองรับ คือ วิธีโซล – เจล [31], [33], [34], [40] หนึ่งในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโซล – เจลที่สำคัญที่สุดคือ การคิดค้นสารเคลือบผิว เพราะความเป็นไปได้ในการใช้การเคลือบออกไซด์กับองค์ประกอบทางเคมีเกือบทุกชนิดบนพื้นผิวที่มีรูปร่างต่างๆ ด้วยสารละลายของเหลว การใช้วิธีโซล – เจลจึงเป็นทางเลือกในการขึ้นรูปเจลในวัสดุเคลือบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของสารเคลือบ เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน การนำไฟฟ้า ตัวนำยิ่งยวด การเรืองแสง ประสิทธิภาพของเฟอร์โรอิเล็กทริก ความต้านทานการกัดกร่อน คุณสมบัติทางแสง เป็นต้น [25], [41] งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่า วิธีโซล – เจลสามารถใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง โมเลกุลอินทรีย์ เส้นใย เกล็ด และผง [42]–[44]

เนื่องจากในประเทศไทยมีการตรวจพบสารพาราควอตความเข้มข้นสูงในน้ำทิ้งจากโรงผสมสารกำจัดวัชพืช [40] ดังนั้น จึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำเพื่อทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น การศึกษานี้จะศึกษาการสลายพาราควอตโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรึงบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (TiO_2/GAC) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่วิธีการที่ง่ายและราคาต่ำ ซึ่งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC สามารถทำได้โดยวิธีโซล – เจล และเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การไหลของไนโตรเจน การตรึงไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารละลายหลังจากทำปฏิกิริยาการสลายด้วยแสง ซึ่งมีความซับซ้อนในการแยกน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นผง ทำให้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้ง่ายขึ้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ หลอดยูวีสำหรับแช่ตู้ปลา (Aquarium immersion UV lamps) ซึ่งมีราคาไม่สูงและหาซื้อได้ง่าย การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดำเนินการโดยใช้หลอด UV–C 11 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และหลอด UV–C 55 วัตต์ จำนวน 1 หลอด (ที่มีช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศและโอโซน งานวิจัยนี้ศึกษาการสลายพาราควอตโดยใช้ TiO_2/GAC ที่อุณหภูมิเผาต่างๆ จากนั้นเลือก TiO_2/GAC ที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตมาทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการเติมอากาศและโอโซนโดยมีการทดลองแบบไม่เติมแก๊สใดๆ เป็นการทดลองควบคุม ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการฉายรังสี จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตทั้งการเติมอากาศและโอโซน นอกจากนี้ยังศึกษาคุณลักษณะของ TiO_2/GAC โดยเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คือ BET, XRD, FT–IR, SEM–EDX และ WDXRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาตัวแปรสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการโซล – เจล จากนั้นวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC รายละเอียดในการศึกษาทั้งหมดนี้มีการใช้สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้สารเคมีดังนี้

3.1.1 พาราควอตไดคลอไรด์ไฮเดรต (1,1’–dimethyl–4,4’–bipyridinium dichloride, 99.8%, Sigma – Aldrich)

3.1.2 พาราควอตที่ใช้กันทั่วไป (1,1’–dimethyl–4 ,4’–bipyridinium dichloride, 27.6%, ZEBRA FACTORY CO., LTD)

3.1.3 ไทเทเนียม (IV) บิวทอกไซด์ (Titanium (IV) N-butoxide, 99%, Alfa Aesar)

3.1.4 ไดเอทาโนลามีน (Diethanolamine AR, 99%, LOBA CHEMIE PVT.LTD.)

3.1.5 เอทานอล (Ethyl alcohol, 99.9%, RCI Labscan)

3.1.6 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ขนาด 1 – 2 มิลลิเมตร (GAC, CARBOKARN CO., LTD)

3.1.7 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.8 ไนโตรเจน (Nitrogen UHP Grade, 99.99%, Alternative Chemical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องกวนแม่เหล็ก (StableTemp Ceramic Stirring Hot Plate, Cole – Parmer, US)

3.2.2 เครื่องชั่งสาร (BAS 31 plus, BOECO, Germany)

3.2.3 เครื่องปั่นกวน (RW 20 digital overhead stirrer, IKA, USA)

3.2.4 บีกเกอร์ขนาด 50 mL 250 mL และ 500 mL (Duran, Germany)

3.2.5 ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 mL 50 mL 100 mL 250 mL และ 1,000 mL (Duran, Germany)

3.2.6 จานทดลองแก้ว (Plain petri dish, SEKIYA)

3.2.7 เตาอบ (Memmert, Germany)

3.2.8 เตาเผา (Thermo Scientific, THERMOLYNE, Sweden)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD – 6100, Shimadzu, Japan)

3.3.2 ชุดเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิวและสมบัติของรูพรุน (BET, Quantachrome Instruments Autosorb iQ, USA)

3.3.3 เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR, IRPrestige – 21, Shimadzu, Japan)

3.3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (WDXRF, ZSX PrimusIV, Rigaku, Japan)

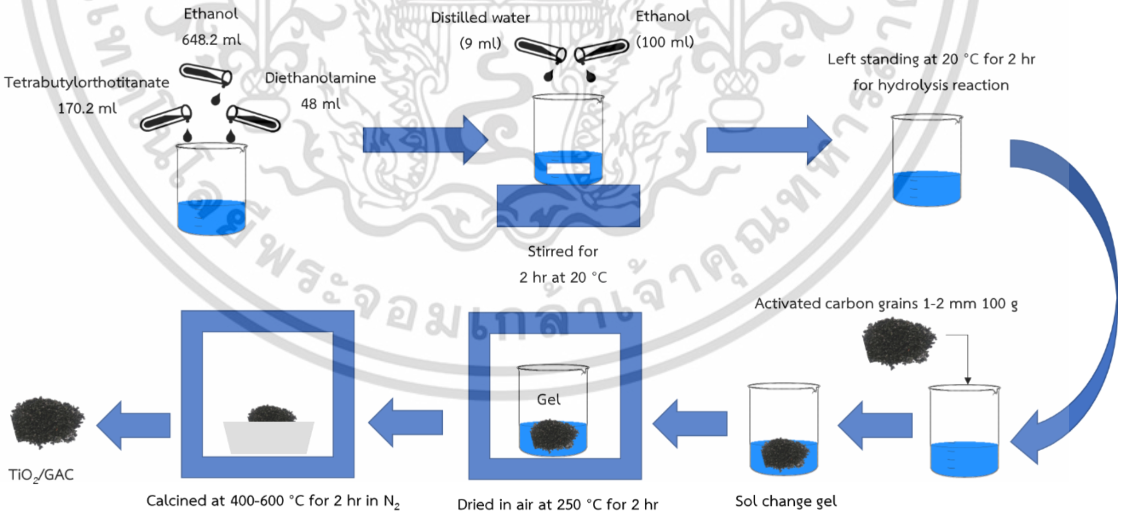
3.3.5 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV–Vis spectrophotometer, V-730, Jasco, Japan)

3.3.6 เครื่องผลิตโอโซน (Ozonizer, OZZON, Thailand)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยกระบวนการโซล – เจล

สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับ TiO_2/GAC สามารถเตรียมขึ้นตามวิธีโซล – เจล โดยผสมไทเทเนียม (IV) บิวทอกไซด์ 170 มิลลิลิตร ไดเอทาโนลามีน 48 มิลลิลิตร และเอทานอล 648 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ จากนั้นทำการปั่นกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงบนเครื่องกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยๆ เติมส่วนผสมของน้ำกลั่น 9 มิลลิลิตร และเอทานอล 100 มิลลิลิตร พร้อมกับคนให้เข้ากัน เมื่อผสมเสร็จแล้วจะได้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วนำมาตั้งพักไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จากนั้นเทสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ลงบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้เป็นตัวรองรับบนจานแก้วแล้วตั้งพักไว้หลังจากที่สารละลายเปลี่ยนเป็นเจลแล้วจึงนำถ่านกัมมันต์ที่เคลือบด้วยเจลไทเทเนียมไดออกไซด์ไปอบที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในอากาศโดยใช้เตาอบเพื่อระเหยเอทานอลออกจากพื้นผิว จากนั้นทำการแยกถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากเจลแห้งที่เหลืออยู่ (มีไทเทเนียมไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนักบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้การไหลของไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงในเตาเผา ซึ่งการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC สามารถแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยกระบวนการโซล – เจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยอุปกรณ์ดังนี้

3.5.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามเทคนิคของ BET

3.5.2 วิเคราะห์ลักษณะและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM–EDX)

3.5.3 วิเคราะห์คุณลักษณะทางอสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยเครื่องเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3.5.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR)

3.5.5 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (WDXRF)

3.6 การศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศและโอโซน

3.6.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานพาราควอต

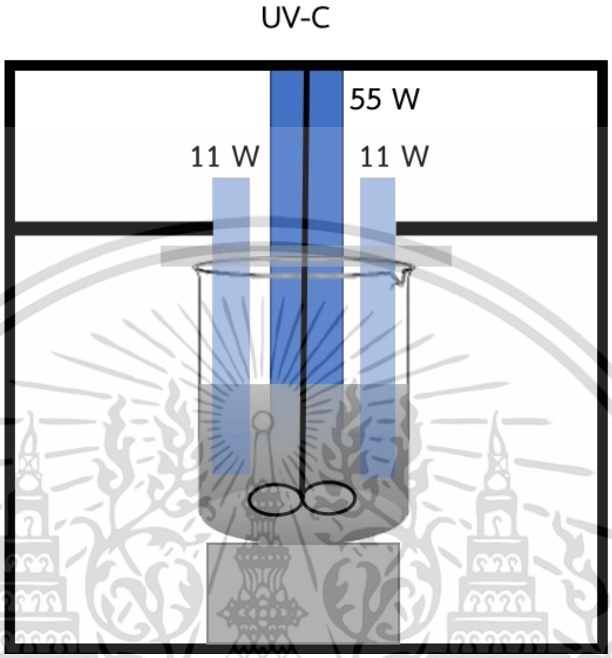
การเตรียมสารละลายพาราควอตเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ผลของความเข้มข้นของพาราควอตโดยเตรียมความเข้มข้นของสารละลายพาราควอตในช่วง 0 ถึง 15 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV–Vis spectrophotometer) ที่ 257 นาโนเมตร แล้วสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายพาราควอตโดยสร้างกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 257 นาโนเมตร (แกน X) กับความเข้มข้นของสารละลายพาราควอต (แกน Y) ซึ่งแสดงในรูปที่ ข.1 (ภาคผนวก ข)

3.6.2 การเตรียมเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การทดลองนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยโหลแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 14 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13.2 ซม. ความสูง 14.5 ซม. และความจุ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิตร แหล่งกำเนิดแสงคือหลอด UV – C 11 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และหลอด UV – C 55 วัตต์ จำนวน 1 หลอด (ที่มีช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ในการทดลองการสลายพาราควอตโดยการฉายรังสียูวีด้วย TiO_2/GAC ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาเท่ากับ 0.5 – 3 (± 0.005) กรัม/ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายพาราควอตในน้ำเสียสังเคราะห์ 300 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเตรียมโดยใช้พาราควอตที่ใช้กันทั่วไป ก่อนที่จะเปิดหลอดยูวี สารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกปั่นกวนในที่มืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ 450 รอบ/นาที เพื่อให้การดูดซับและการคายซับอยู่ในสภาวะสมดุล ในการเก็บตัวอย่างตัวอย่างแรกถูกเก็บตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการดูดซับในที่มืด เพื่อกำหนดความเข้มข้นของพาราควอตที่เหลืออยู่ในสารละลายก่อนทำการสลายพาราควอต จากนั้นทำการเปิดหลอดยูวีเพื่อเริ่มการสลายพาราควอตในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของพาราควอตหลังการกำจัดพาราควอตระหว่างการฉายรังสียูวี โดยไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศ และมีการเติมโอโซน ตามลำดับ การเติมอากาศและโอโซนโดยใช้ปั๊มไฟฟ้าสำหรับตู้ปลา (Electrical aquarium pump) ซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.5 2 และ 2.5 ลิตร/นาที ส่วนการเติมโอโซนผลิตจากเครื่องผลิตโอโซน (Ozonizer) ซึ่งอัตราการไหลของโอโซนเท่ากับ 1,061 1,483 และ 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ตัวอย่างจะถูกเก็บอย่างต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์และกรองทันทีด้วยตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนลอน (0.45 ไมครอน) เพื่อแยกสารแขวนลอย จากนั้นนำตัวอย่างมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น โดยการเจือจางตัวอย่างด้วยน้ำ 30 เท่า (ร้อยละข้อผิดพลาด เท่ากับ ± 0.8) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นได้ตามกราฟสารละลายมาตรฐาน จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายที่กรองได้ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV–Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร โดยใช้กราฟมาตรฐาน (R^2 = 0.9992) โดยร้อยละการสลายและร้อยละการกำจัดพาราควอตสามารถคำนวณได้ตามสมการ 3.1 – 3.4

$$\%\text{Degradation} = \frac{(C_{D0} - C) \times 100\%}{C_{D0}} \tag{3.1}$$

โดยที่ C_{D0} คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอตสำหรับการสลาย ($mg{\cdot}L^{-1}$)

C คือ ความเข้มข้นของพาราควอต ณ เวลานั้นๆ ($mg{\cdot}L^{-1}$)

$$\%\text{Removal} = \%\text{Removal for ADS} + \%\text{Removal for DEG} \tag{3.2}$$

โดยที่ %Removal คือ ร้อยละการกำจัดพาราควอตทั้งหมด

%Removal for ADS คือ ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการดูดซับ

%Removal for DEG คือ ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลาย

$$\%\text{Adsorption} = \%\text{Removal for ADS} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100\%}{C_0} \tag{3.3}$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอต ($mg{\cdot}L^{-1}$)

C_e คือ ความเข้มข้นของพาราควอต ณ สมดุลการดูดซับ ($mg{\cdot}L^{-1}$)

$$\%\text{Removal} = \frac{(C_0 - C) \times 100\%}{C_0} \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการตอบสนองต่อพื้นที่ผิว (Response surface methodology, RSM) ซึ่งสามารถออกแบบการทดลองได้ด้วย Box–Behnken design เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษาและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศและโอโซน

3.7.1 การออกแบบการทดลองสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตในการศึกษานี้ 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการสลาย โดยมีขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษาอยู่ 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.1 จากการออกแบบการทดลองด้วย Box–Behnken design สามารถแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ		
		-1	0	1
อัตราการไหลของอากาศ	ลิตร/นาที	1.5	2.0	2.5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	กรัม/ลิตร	1.0	2.0	3.0
เวลาในการสลาย	ชั่วโมง	12	18	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

ลำดับ	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)	เวลา (ชั่วโมง)	ตัวแปรตาม
1	1.0	1.5	18	ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลาย
2	3.0	1.5	18	
3	1.0	2.5	18	
4	3.0	2.5	18	
5	1.0	2.0	12	
6	3.0	2.0	12	
7	1.0	2.0	24	
8	3.0	2.0	24	
9	2.0	1.5	12	
10	2.0	2.5	12	
11	2.0	1.5	24	
12	2.0	2.5	24	
13	2.0	2.0	18	
14	2.0	2.0	18	
15	2.0	2.0	18	

3.7.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตในการศึกษานี้ 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการสลาย โดยมีขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษาอยู่ 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.3 จากการออกแบบการทดลองด้วย Box–Behnken design สามารถแสดงดังตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน

ปัจจัย	หน่วย	ระดับ		
		-1	0	1
อัตราการไหลของโอโซน	มิลลิกรัม/ชั่วโมง	1061	1483	1905
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	กรัม/ลิตร	0.5	1.0	1.5
เวลาในการสลาย	ชั่วโมง	12	18	24

ตารางที่ 3.4 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน

ลำดับ	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)	อัตราการไหลของโอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)	เวลา (ชั่วโมง)	ตัวแปรตาม
1	0.5	1061	18	ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลาย
2	1.5	1061	18	
3	0.5	1905	18	
4	1.5	1905	18	
5	0.5	1483	12	
6	1.5	1483	12	
7	0.5	1483	24	
8	1.5	1483	24	
9	1.0	1061	12	
10	1.0	1905	12	
11	1.0	1061	24	
12	1.0	1905	24	
13	1.0	1483	18	
14	1.0	1483	18	
15	1.0	1483	18	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ TiO_2/GAC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ทำได้ ดังต่อไปนี้ (1) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามเทคนิคของ BET (2) การวิเคราะห์ลักษณะและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดโดย SEM (3) การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน EDX (4) การวิเคราะห์คุณลักษณะทางอสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย XRD (5) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย FT–IR และ (6) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและสารประกอบภายในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย WDXRF นอกจากนี้ยังศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ (1) อัตราการไหลของอากาศหรือโอโซน (2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลาย และ (3) เวลาที่ใช้ในการสลายพาราควอต อีกทั้งยังศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับและการสลายพาราควอตและหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายพาราควอต

4.1 การศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 วิเคราะห์ลักษณะของพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิค BET (Brunauer–Emmett–Teller Method)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิต่างๆ และถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบด้วยเทคนิค BET แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นในขณะเดียวกันก็ลดพื้นที่ผิวในการดูดซับ เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เปิดกั้นทางเข้าออกของรูพรุนบางส่วนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวของ TiO_2/GAC มีค่าน้อยกว่าของถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบ ปริมาตรรูพรุนระดับไมโครพอร์ของถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบมีค่าเท่ากับ 0.4495 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งปริมาตรรูพรุนระดับไมโครพอร์ของ TiO_2/GAC มีค่าน้อยกว่าปริมาณของถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบ ดังนั้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวจึงเหมือนกับปริมาตรรูพรุนทั้งหมดซึ่งมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้นเทียบกับถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางนี้แสดงค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของ TiO_2/GAC ประมาณ 1.76 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนระดับไมโครพอร์มีค่าน้อยกว่า 2 นาโนเมตร [21] ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการดูดซับพาราควอตที่มีขนาด 1.34 × 0.36 นาโนเมตร [45] พฤติกรรมการดูดซับของพาราควอตด้วยถ่านกัมมันต์ คือ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [46], [47] พื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของ TiO_2/GAC เป็นรูพรุนระดับไมโครพอร์ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1,126.10 – 1,239.29 ตารางเมตร/กรัม สหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (IUPAC) จำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับ N_2 ออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ ประเภท I ถึงประเภท VI ซึ่งจากรูปที่ ก.6 – ก.9 (ภาคผนวก ก) แสดงผลจากการวิเคราะห์ BET ของ TiO_2/GAC ซึ่งจากรูปแสดงว่าเกิดไอโซเทอร์มแบบผสมระหว่างประเภทที่ I และประเภท IV บ่งบอกถึงการมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโสพอร์ [48] ในช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ (P/P_0 = 0 – 0.4) แสดงถึงการดูดซับ N_2 แบบชั้นโมเลกุลเดี่ยว (Mono–molecular layer) ในช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ (P/P_0 = 0.4 – 0.99) แสดงถึงการดูดซับ N_2 แบบหลายชั้นโมเลกุล (Multi–molecular layer) พร้อมกับเกิดลูปฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ประเภทที่ H_4 ซึ่งมีลักษณะแคบในช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ (P/P_0 = 0.4 – 0.99) แสดงว่า รูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดไมโครพอร์และมีรูพรุนขนาดเมโสพอร์บ้างเล็กน้อย และรูพรุนมีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่นยาว (Slit–shaped pore) [49]

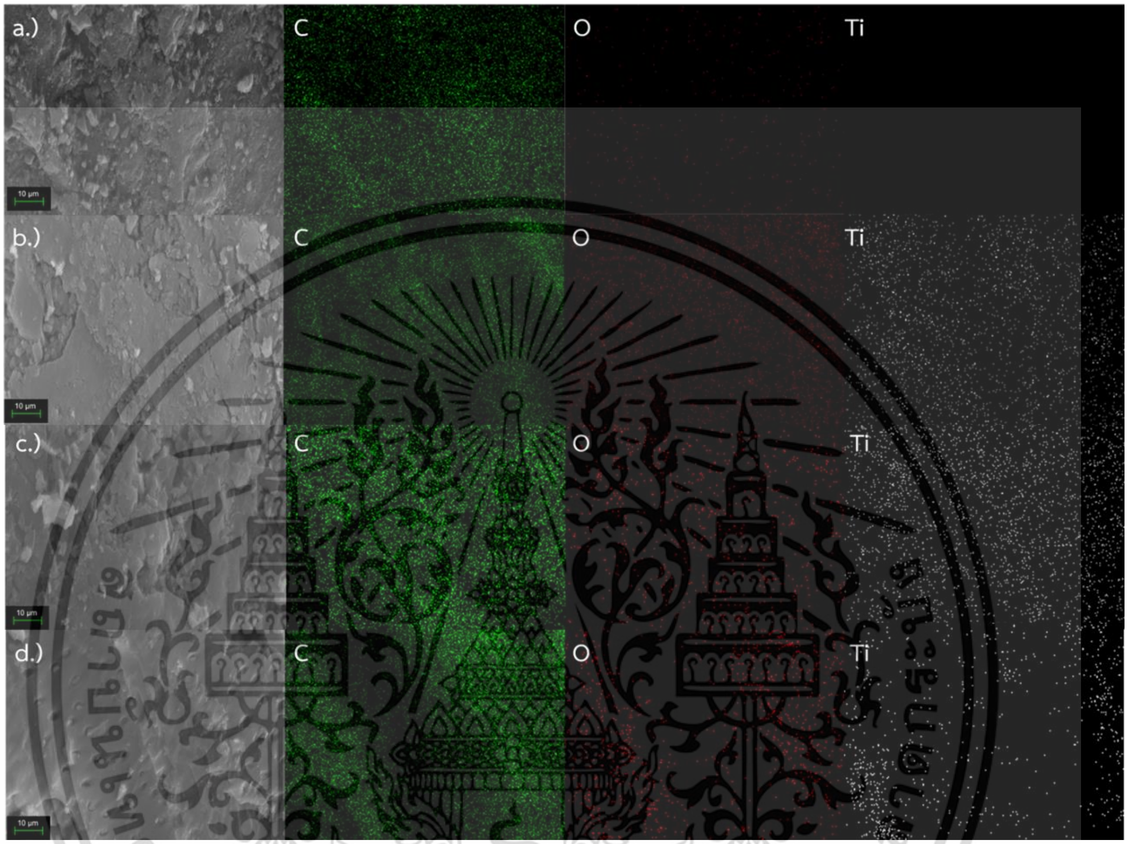
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

Sample	S_{BET} ($m^2 \cdot g^{-1}$)	S_{mic} ($m^2 \cdot g^{-1}$)	S_{ext} ($m^2 \cdot g^{-1}$)	V_t ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	V_{mic} ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	D_p (nm)
GAC	1239.29	1147.15	92.14	0.5372	0.4495	1.734
TiO_2/GAC 400 °C	1224.17	1105.97	118.20	0.5386	0.4379	1.760
TiO_2/GAC 500 °C	1126.10	1028.26	97.84	0.4992	0.4049	1.773
TiO_2/GAC 600 °C	1207.67	1091.41	116.26	0.5305	0.4306	1.757

โดย S_{BET} คือ พื้นผิวจำเพาะ; S_{mic} คือ พื้นที่ผิวของรูพรุนระดับไมโครพอร์; S_{ext} คือ พื้นที่ผิวของรูพรุนระดับเมโซพอร์และแมคโครพอร์; V_t คือ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด; V_{mic} คือ ปริมาตรรูพรุนระดับไมโครพอร์; D_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรวมกับเทคนิคเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (SEM–EDX)



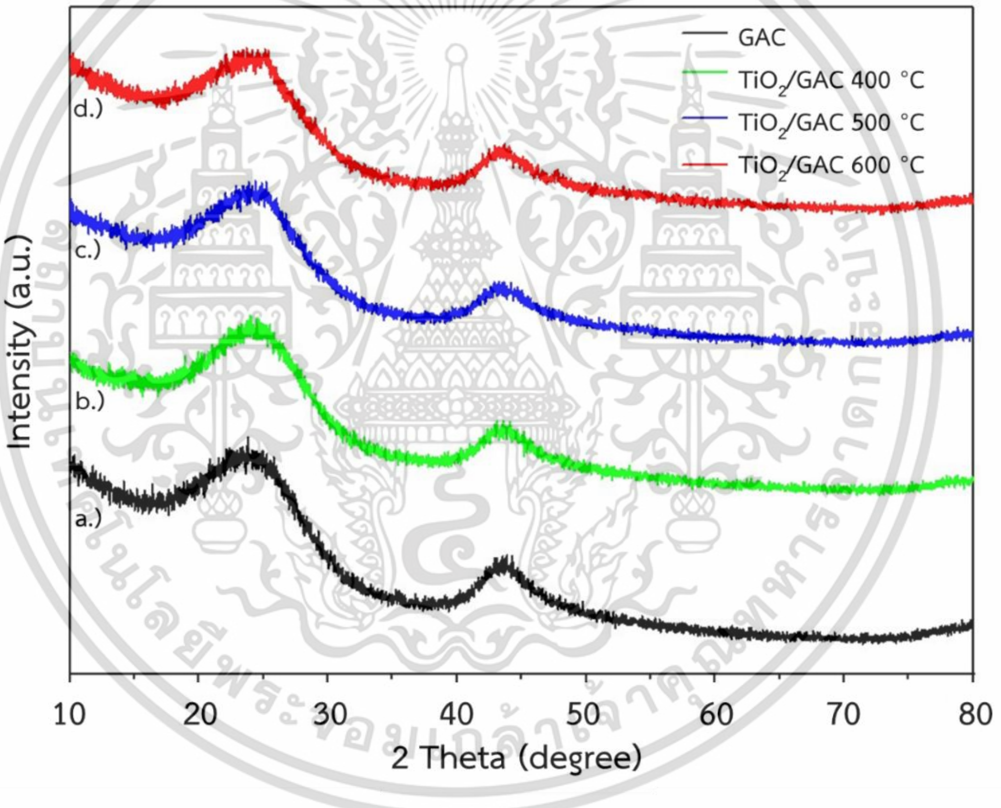
รูปที่ 4.1 ภาพ SEM–EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 ℃ (c) TiO_2/GAC 500 ℃ และ (d) TiO_2/GAC 600 ℃

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัม SEM–EDX ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง GAC, TiO_2/GAC 400 ℃, TiO_2/GAC 500 ℃ และ TiO_2/AC 600 ℃ แสดงไว้ในรูปที่ 4.2(a), 4.2(b), 4.2(c) และ 4.2(d) ตามลำดับ การวิเคราะห์ EDX แสดงถึงส่วนประกอบธาตุคาร์บอน (C) ธาตุออกซิเจน (O) และธาตุไทเทเนียม (Ti) ที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาและกระจายอย่าสม่ำเสมอบนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC รูปที่ 4.2(a) แสดงให้เห็นว่า ในถ่านกัมมันต์ก่อนเคลือบมีปริมาณออกซิเจนบางส่วนและแทบไม่มีธาตุไทเทเนียมบนพื้นผิว ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และการเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.2(b) – (d) ซึ่งปริมาณออกซิเจนและไทเทเนียมบนพื้นผิวในตัวอย่างมีปริมาณธาตุออกซิเจนและธาตุไทเทเนียมเพิ่มมากขึ้น การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกันรวมตัวกันจึงมีอนุภาคใหญ่ขึ้นสังเกตได้จากจุดสีแดง (O) และสีขาว (Ti) ในรูปที่ 4.2(a) – (d) ที่ดูหนาชัดขึ้น ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่า เมื่ออุณหภูมิของการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนจากเฟสอะนาเทสเป็นเฟสรูไทล์ ทำให้ขนาดโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น [50] จากผลการทดสอบ EDX การเคลือบถ่านกัมมันต์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้ พบว่า อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(b) – (d)

4.1.3 วิเคราะห์คุณลักษณะทางอสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)



รูปที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 °C (c) TiO_2/GAC 500 °C และ (d) TiO_2/GAC 600 °C

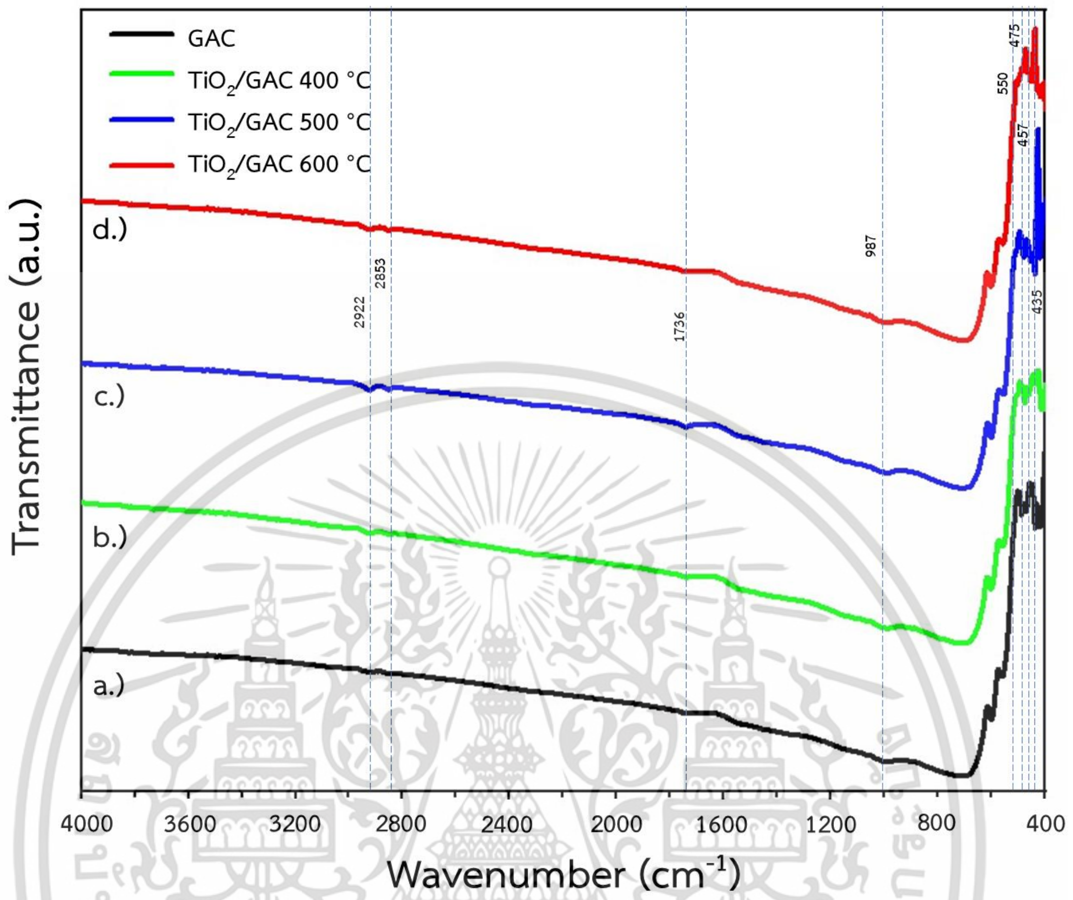
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมที่อุณหภูมิการเผาแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.2 เนื่องจากปริมาณถ่านกัมมันต์ในตัวอย่างวิเคราะห์มีปริมาณมากกว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจุดพีคของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จึงบดบังจุดพีคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จึงไม่สามารถระบุโครงสร้างได้เนื่องจากผลลัพธ์แสดงเป็นโครงสร้างอสัณฐาน ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนถ่านกัมมันต์เมื่อผ่านการไฮโดรไลซิสของอัลคอกไซด์จะกลายเป็นผลึกเฟสอะนาเทสหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 – 400 องศาเซลเซียส และเกิดก่อตัวของเฟสอะนาเทสเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงถึง 400 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเริ่มเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 700 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์ส่วนใหญ่จะแปรสภาพเป็นเฟสรูไทล์ โดยเหลือโครงสร้างเฟสอะนาเทสเพียงบางส่วนเท่านั้น [50]

4.1.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (FT–IR)

สเปกตรัม FT–IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ในช่วงที่ 400 – 4000 cm^{-1} ใช้เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่ามีพีคที่ชัดเจนอยู่ในช่วง 550 – 650 cm^{-1} แสดงถึงพันธะของ Ti–O และในช่วง 436 – 495 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน Ti–O–Ti [51] อีกทั้งยังมีพีคเล็กๆ ที่ตำแหน่งดังต่อไปนี้ ได้แก่ (1) ที่ 987 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะของ C-O (2) ที่ 1736 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะของ C=O ใน $NHCOCH_3$ (3) ที่ 2853 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ CH_2 ในกลุ่ม CH_2OH และ (4) ที่ 2922 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ CH_3 ในกลุ่ม $NHCOCH_3$ [52] ดังนั้น ในช่วง 436 – 650 cm^{-1} บอกถึงการมีอยู่ของไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแบบ FT–IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา: (a) GAC (b) TiO_2/GAC 400 °C (c) TiO_2/GAC 500 °C และ (d) TiO_2/GAC 600 °C

4.1.5 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (WDXRF)

ผลของการตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ด้วยเทคนิค WDXRF แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนโดยมวลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าลดลง ซึ่งในการทดลองนี้ การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการโซล – เจลนั้นสามารถสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากถึงร้อยละ 61.1 โดยมวล (ไม่รวมกับมวลของสารประกอบคาร์บอน) และไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสัดส่วนหลักของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC (ไม่รวมกับมวลของสารประกอบคาร์บอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงปริมาณสารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค WDXRF

ตัวเร่งปฏิกิริยา	องค์ประกอบ (สัดส่วนโดยมวล)										
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	Cl
GAC	11.6	4.78	3.04	9.39	4.04	5.40	46.4	2.72	5.01	4.60	0.19
TiO_2/GAC 400 °C	1.10	0.42	0.02	1.39	0.79	1.32	27.2	1.61	61.1	3.70	0.18
TiO_2/GAC 500 °C	5.63	2.06	0.59	5.21	2.43	3.57	29.8	1.63	45.5	2.41	0.44
TiO_2/GAC 600 °C	6.95	2.13	0.63	5.78	2.59	4.05	29.2	1.49	43.6	2.56	0.49

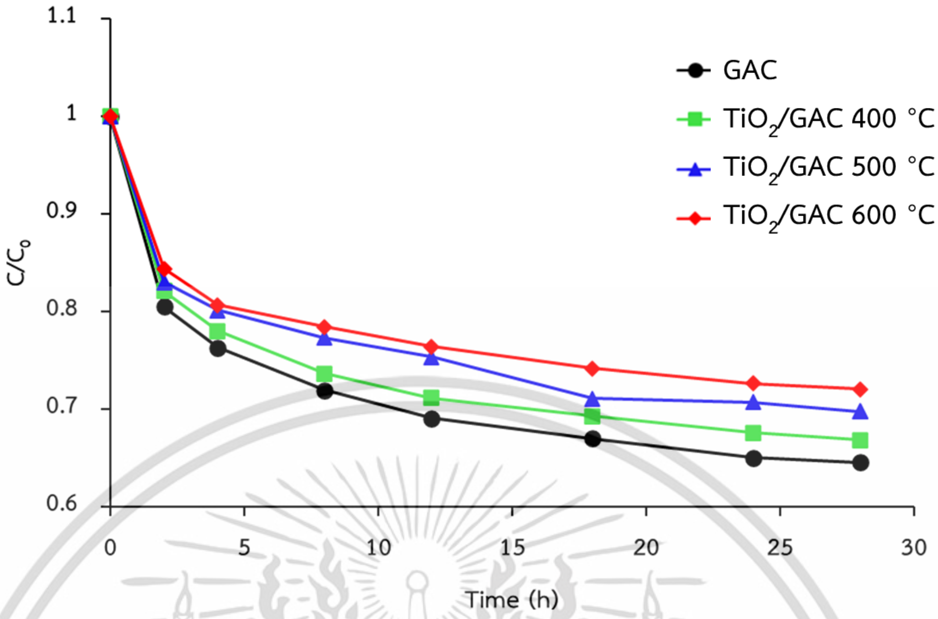
4.2 การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC

4.2.1 การศึกษาการดูดซับและจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

(1) การดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การดูดซับเริ่มต้นโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0 กรัม/ลิตร ลงในละลาย จากนั้นจะต้องทำการปั่นกวนในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ 450 รอบ/นาที ในช่วงก่อนที่จะเปิดหลอดยูวี เพื่อให้การดูดซับและการคายซับอยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 การสร้างกราฟการดูดซับพาราควอตจากสารละลายโดย TiO_2/GAC จะสร้างกราฟระหว่าง C/C_0 กับเวลา โดยเป็นการดูดซับในที่มืด ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายพาราควอตที่ใช้เท่ากับ 300 มิลลิกรัม/ลิตร ความเร็วรอบที่ใช้เท่ากับ 450 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



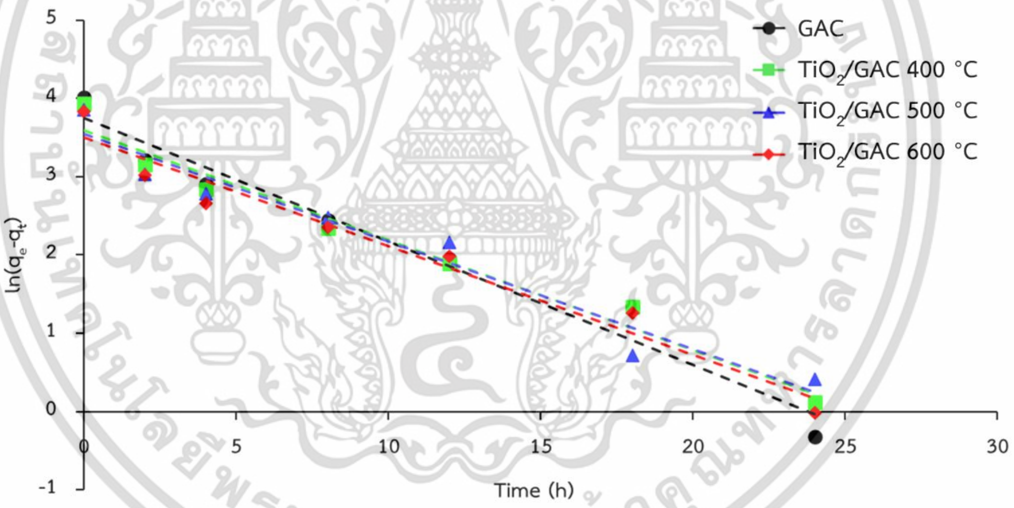
รูปที่ 4.4 ผลการทดลองการดูดซับพาราควอตของ TiO_2/GAC โดยสารละลายพาราควอตที่มีความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร และ TiO_2/GAC 2.0 กรัม

จากผลการทดลอง พบว่า ระยะเวลาในเข้าสู่สมดุลของการดูดซับประมาณ 24 ชั่วโมง ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับพาราควอตของถ่านกัมมันต์ที่ไม่เคลือบมีค่ามากที่สุดเท่ากับร้อยละ 35.49 รองลงมาคือ TiO_2/GAC 400 °C TiO_2/GAC 500 °C และ TiO_2/GAC 600 °C ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 33.21 30.25 และ 28.00 ตามลำดับ การสุ่มเก็บตัวอย่างที่ 28 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล เมื่อสังเกตจากกราฟจะเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับลดลงตามอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรูพรุนของ TiO_2/GAC อาจค่อยๆ ลดลง และการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีความสม่ำเสมอน้อยลง และอาจเป็นเพราะว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์อาจมีการเปลี่ยนแปลงหรืออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ใกล้เคียงอาจรวมกันเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งด้วยเหตุผลนี้อาจทำให้เกิดการอุดตันหรือปิดรูพรุนบางส่วน จากผลที่ได้จะเห็นว่าดูดซับเกิดได้ช้า แม้ว่าการดูดซับพาราควอตของ TiO_2/GAC 500 °C จะมีค่ามากกว่าของ TiO_2/GAC 600 °C แต่จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ TiO_2/GAC 500 °C น้อยกว่า TiO_2/GAC 600 °C ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากรูพรุนขนาดไมโครพอร์ของ TiO_2/GAC 600 °C มีขนาดเล็กกว่าขนาดโมเลกุลของพาราควอต ทำให้สามารถดูดซับพาราควอตได้น้อยกว่า TiO_2/GAC 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) จลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

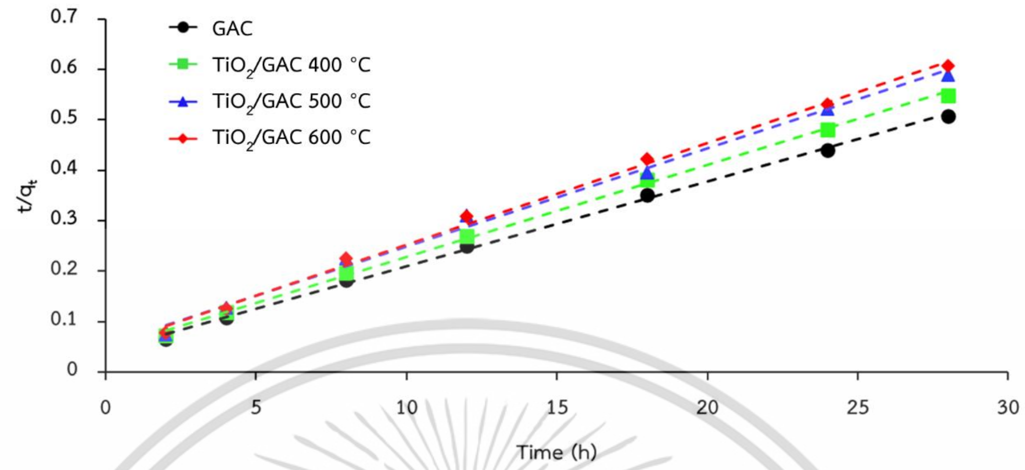
การศึกษานี้จะใช้จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (PFO) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (PSO) มาพิจารณาเพื่ออธิบายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ของการทดลองการดูดซับพาราควอตในที่มืดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งศึกษาตัวแปรส่งผลต่ออัตราการดูดซับตามจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมคือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (k) ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) และปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับบนตัวดูดซับ ณ เวลา t ใดๆ (q_t) เพื่อพิจารณากลไกการดูดซับ จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.25 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.27 จากนั้นสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ เทียบกับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันแสดงในรูปที่ 4.5 จะได้ความชันเท่ากับ k_1 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\ln q_e$ ซึ่งสามารถคำนวณหา q_e ได้



รูปที่ 4.5 กราฟเชิงเส้นระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ เทียบกับเวลา t ของการดูดซับพาราควอตในที่มืด (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO

จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.29 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.31 จากนั้นสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง t/q_t เทียบกับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันแสดงในรูปที่ 4.6 จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ ซึ่งสามารถคำนวณหา q_e และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$ ซึ่งสามารถคำนวณหา k_2 ได้

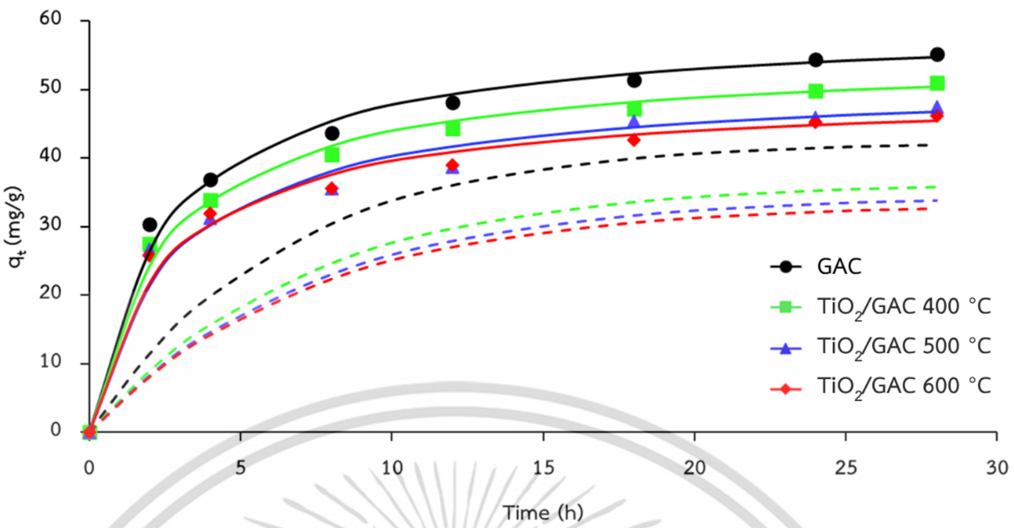
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟเชิงเส้นระหว่าง t/q_t เทียบกับเวลา t ของการดูดซับพาราควอตในที่มืด (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO

จากรูปที่ 4.7 กราฟการดูดซับของพาราควอตในที่มืดโดย TiO_2/GAC บ่งชี้ว่าสมการอัตราจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (PSO) สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับได้เหมาะสมกับข้อมูลการทดลองมากกว่าแบบจำลอง PFO ดังที่เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) (R_2^2 มากกว่า R_1^2) และค่า q_e (โดยที่ q_{e2} ใกล้เคียงกับ q_e จากข้อมูลการทดลองมากกว่า q_{e1}) ในตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเป็นการดูดซับที่ช้า และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในเผาตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลทำให้ค่า q_e ลดลงเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าและถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้เคลือบ อาจเป็นเพราะการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์อาจจะปิดกั้นรูพรุนหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลง ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ตามสมมุติฐานของแบบจำลอง PSO ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) การดูดซับขึ้นอยู่กับความจุของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยการดูดซับเกิดขึ้นที่พื้นที่เชื่อมต่อระหว่างของเหลวกับของแข็ง [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการดูดซับพาราควอตในที่มีดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PSO

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการดูดซับพาราควอตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ก่อนเริ่มกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของแบบจำลอง PFO และ PSO

ตัวอย่าง	k_1	k_2	q_{e1}	q_{e2}	R_1^2	R_2^2
GAC	0.1576	0.0067	42.46	59.58	0.38929	0.99105
TiO_2/GAC 400 °C	0.1405	0.0072	36.45	54.91	0.11161	0.99273
TiO_2/GAC 500 °C	0.1373	0.0069	34.54	51.48	0.15925	0.97330
TiO_2/GAC 600 °C	0.1388	0.0079	33.25	49.61	0.09115	0.98257

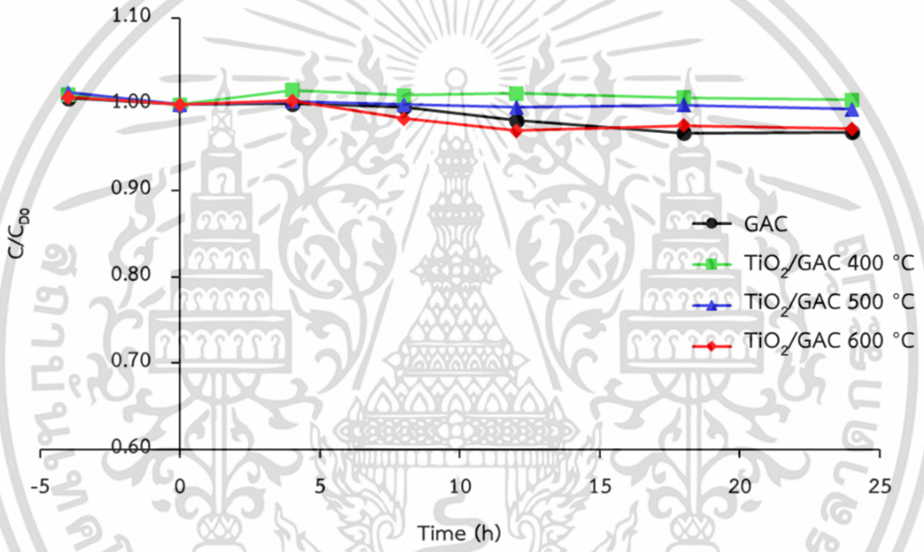
โดย q_{e1} คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับที่สภาวะสมดุลซึ่งคำนวณจาก PFO; q_{e2} คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ดูดซับที่สภาวะสมดุลซึ่งคำนวณจาก PSO; R_1^2 คือ R^2 ของ PFO; R_2^2 คือ R^2 ของ PSO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การศึกษาการสลายและจลนพลศาสตร์สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC

(1) การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งไม่มีการเติมอากาศ

การสลายตัวของพาราควอตภายใต้การฉายรังสียูวีโดยไม่มีการเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งพาราควอตสลายไปเพียงร้อยละ 0.54 – 3.19 โดยประมาณ หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสลายพาราควอตด้วยการเติมอากาศ



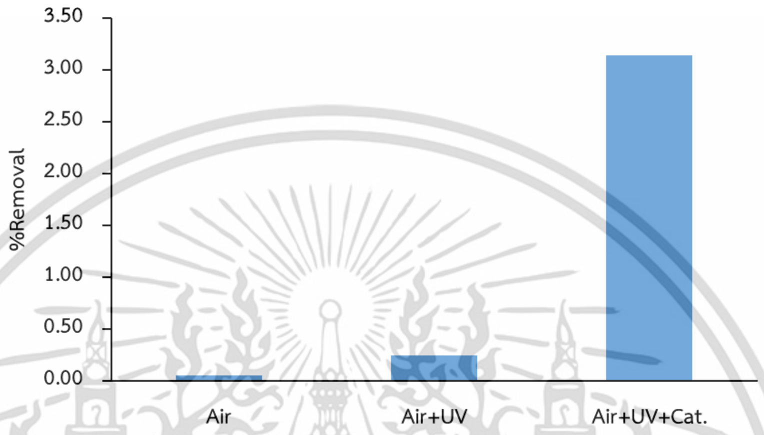
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งไม่มีการเติมอากาศ

(2) การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ

การสลายพาราควอตภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมงเมื่อเทียบระหว่างการเติมอากาศโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมอากาศโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า การเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถสลายพาราควอตได้มากที่สุด ซึ่งการเติมอากาศโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสลายพาราควอตได้น้อยมาก ซึ่งมีค่าร้อยละการกำจัดโดยการสลายเท่ากับ 0.05 และ 0.25 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสลายพาราควอตด้วยการเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าร้อยละการกำจัดโดยการสลายเท่ากับ 3.14

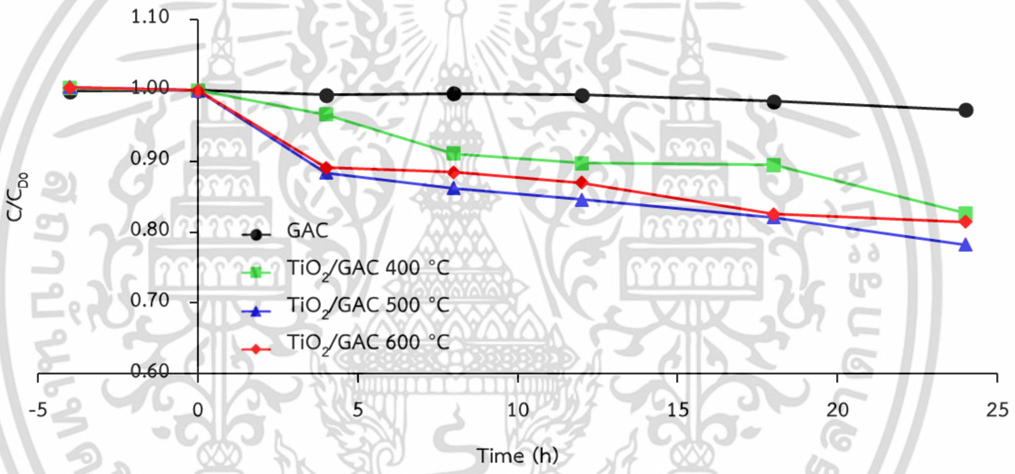


รูปที่ 4.9 การสลายพาราควอตภายใน 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบระหว่างการเติมอากาศโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมอากาศโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.2 พบว่า การเรียงลำดับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสลายพาราควอตกับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 XX %wt) สามารถเขียนได้ดังนี้ TiO_2 45.5 %wt > TiO_2 43.6 %wt > TiO_2 61.1 %wt > TiO_2 5.01 %wt อย่างไรก็ตาม TiO_2/GAC 500 °C ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ 45.5%wt สามารถสลายพาราควอตได้ร้อยละ 21.74 ใน 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงว่าการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการสลายพาราควอตที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 600 °C อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC สำหรับกระบวนการกำจัดพาราควอตในสารละลายสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ กระบวนการดูดซับพาราควอตของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในที่มืดและอีกขั้นตอนหนึ่งคือกระบวนการสลายพาราควอตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้การฉายรังสียูวี ในงานวิจัยนี้ ความเข้มข้นของพาราควอตที่คงเหลืออยู่ในสารละลายเมื่อสิ้นสุดการฉายรังสียูวี โดยไม่มีการเติมอากาศยังสามารถใช้เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของพาราควอตสำหรับการสลายตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยมีการเติมอากาศ ดังแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.8 อัตราการสลายของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC นั้นใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้เคลือบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจึงถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงว่าเข้าสู่สมดุล ดังนั้นจึงมีการเติมอากาศเข้าไปในระบบเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที ซึ่งการเติมอากาศเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนทำให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมากขึ้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้นตามสมการที่ (2.5) – (2.12) เนื่องจากการเติมอากาศส่งผลให้อัตราการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ TiO_2/GAC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประสิทธิภาพการสลายพาราควอตในระยะเวลา 24 ชั่วโมงสำหรับ GAC TiO_2/GAC 400 °C TiO_2/GAC 500 °C และ TiO_2/GAC 600 °C มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.79 17.33 21.74 และ 18.53 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ที่ซึ่งมีการเติมอากาศ

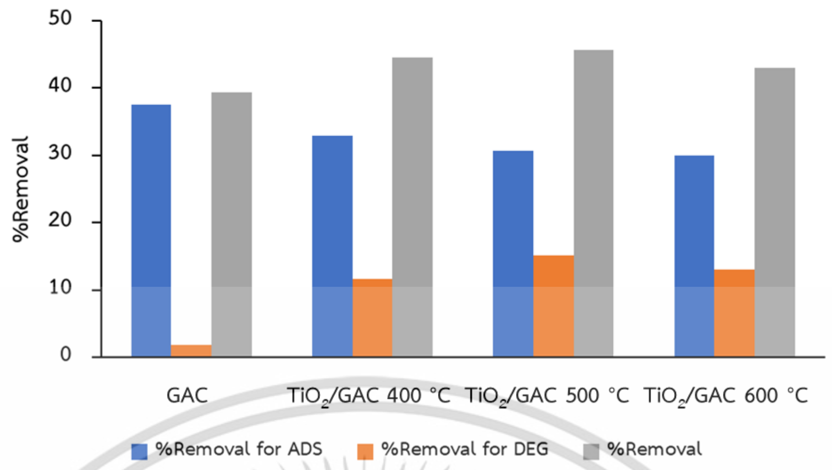
จากผลการทดลองการสลายพาราควอต ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 เห็นได้ชัดว่า ร้อยละการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การเติมอากาศโดย TiO_2/GAC 600 °C มีค่ามากกว่า TiO_2/GAC 400 °C เพียงเล็กน้อย แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ใน TiO_2/GAC 400 °C (ร้อยละ 61.1) นั้นมีค่ามากกว่า TiO_2/GAC 600 °C (ร้อยละ 43.6) อาจเป็นเพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดย TiO_2/GAC 500 °C นั้นสามารถสลายพาราควอตได้มากที่สุด โดยมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ใน TiO_2/GAC 500 °C เท่ากับร้อยละ 45.5 อาจเป็นเพราะว่ามีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะนาเทสมากที่สุด กลไกพื้นฐานสำหรับปฏิกิริยาเหล่านี้โดยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC สามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับและสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลาย [54], [55] คล้ายกับกรณีกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของวัสดุนาโน TiO_2/AC [56] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อัตราการดูดซับพาราควอตจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะที่มืด อย่างไรก็ตามภายใต้การฉายแสงยูวี อัตราการสลายพาราควอตขึ้นอยู่กับสารละลายพาราควอตที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของ TiO_2/GAC ก่อนที่จะเกิดการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [57] ดังนั้นประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอาจได้รับผลกระทบจากประสิทธิภาพการดูดซับของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์และกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนถ่านกัมมันต์ สำหรับการดูดซับพาราควอตด้วย TiO_2/GAC 500 °C การดูดซับ (ร้อยละ 30.25) สามารถกำจัดพาราควอตได้มากกว่าการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (ร้อยละ 21.74) เนื่องจากมีรูพรุนสูง ซึ่งอาจบ่งชี้ว่ามีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จึงมีไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสมากขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสเปลี่ยนไปเป็นเฟสรูไทล์มากขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [50] เหตุผลนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์หลอมรวมกันบนพื้นผิวของ TiO_2/GAC ซึ่งทำให้การดูดกลืนรังสียูวีมีประสิทธิภาพลดลงและพื้นที่ผิวสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลงด้วย ในทางกลับกันการลดลงของรูพรุนส่งผลให้เกิดการจำกัดการดูดซับพาราควอตบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC และเกิดการจำกัดการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การเปรียบเทียบการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ที่อุณหภูมิในการเผาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC รวมถึงรูพรุนและการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อการสลายพาราควอต ดังนั้นอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญในการเตรียม TiO_2/GAC ด้วยวิธีการโซล – เจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

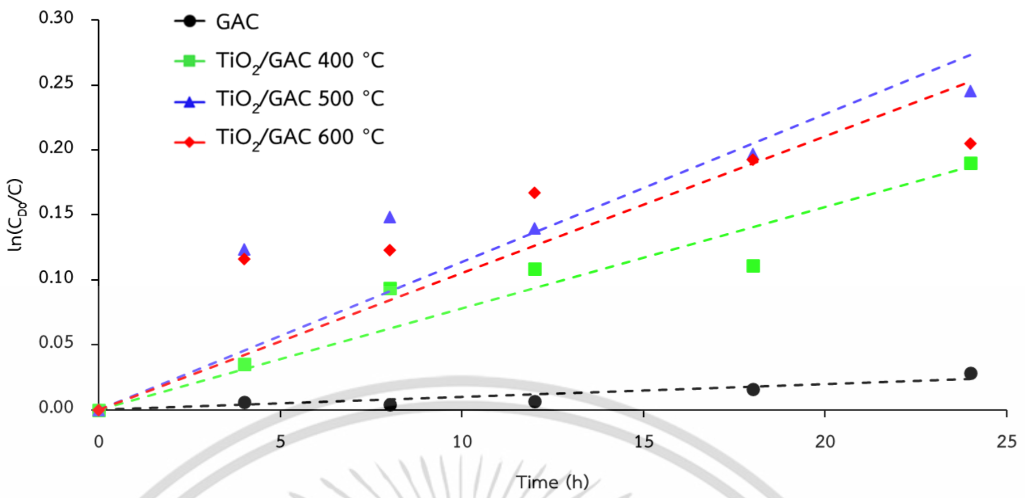


รูปที่ 4.11 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เวลา 24 ชั่วโมงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ

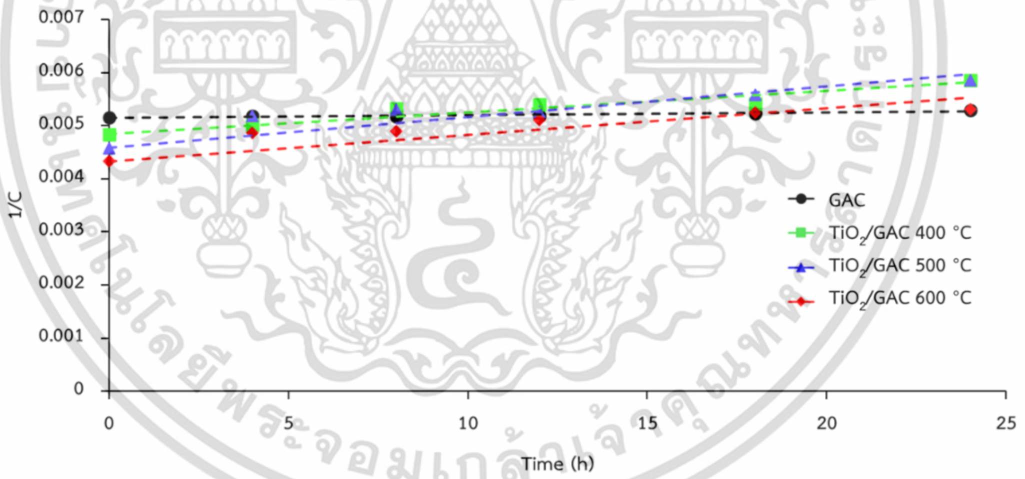
(3) จลนพลศาสตร์สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

การศึกษานี้จะใช้จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม (PZO) จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (PFO) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (PSO) มาพิจารณาเพื่ออธิบายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ของการทดลองการสลายพาราควอตด้วยด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ งานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรส่งผลต่ออัตราการสลายตามจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม คือ ค่าคงที่ของอัตราการสลาย (K) ของแต่ละแบบจำลอง เพื่อพิจารณากลไกการสลายพาราควอต เริ่มจากแบบจำลอง PZO ทำได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ 2.33 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.34 เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง C กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-K_0$ ซึ่งสามารถคำนวณหา K_0 ได้และจุดตัดแกน Y เท่ากับ C_{D0} แบบจำลองต่อมา คือ แบบจำลอง PFO โดยเริ่มจากการอินทิเกรตสมการที่ 2.35 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.36 จากนั้นสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln(C/C_{D0})$ เทียบกับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.12 จะได้ความชันเท่ากับ K_1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟเชิงเส้นระหว่าง ln (C/C_{D0}) เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO



รูปที่ 4.13 กราฟเชิงเส้นระหว่าง 1/C เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองต่อมาคือ PSO โดยเริ่มจากการอินทิเกรตสมการที่ 2.38 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.39 จากนั้นกราฟเส้นตรงระหว่าง 1/C กับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิในการเผาต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.13 จะได้ความชันเท่ากับ K_2 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/C_{D0}$

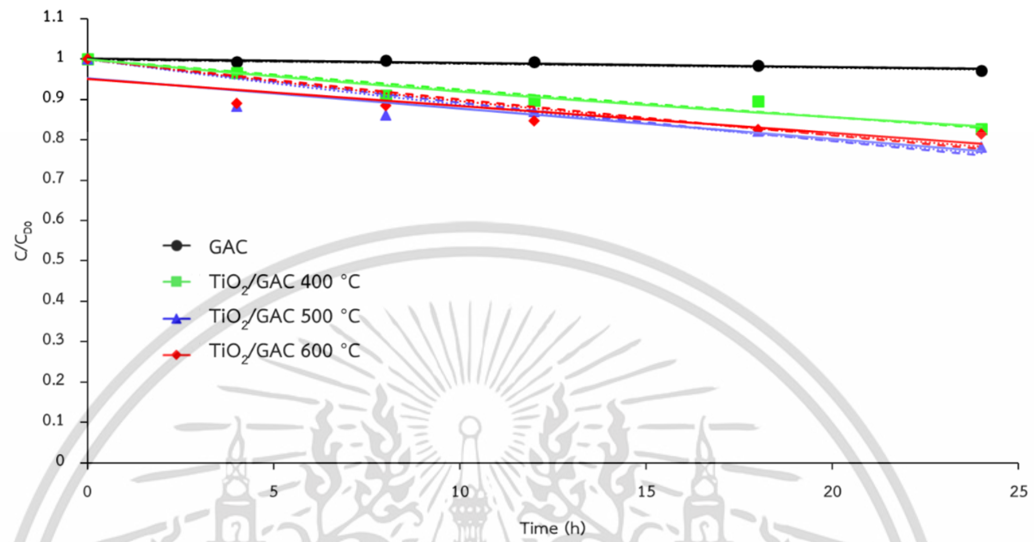
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศของแบบจำลอง PZO PFO และ PSO

ตัวอย่าง	K_0	K_1	K_2	R_0^2	R_1^2	R_2^2
GAC	0.21	9.83E-04	5.64E-06	0.8807	0.8679	0.8425
TiO_2/GAC 400 °C	1.34	7.79E-03	4.07E-05	0.9142	0.9063	0.9151
TiO_2/GAC 500 °C	1.63	1.14E-02	4.47E-05	0.8208	0.6950	0.4636
TiO_2/GAC 600 °C	1.55	1.05E-02	5.01E-05	0.7856	0.6279	0.6839

กราฟการสลายของพาราควอตโดยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 2.0 กรัม/ลิตร ภายใต้การฉายรังสียูวีและมีการเติมอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.14 สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ได้ จากการศึกษาของ Rashed และ El-Amin จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งนั้นเหมาะสมสำหรับช่วงความเข้มข้นต่ำ และผลการทดลองมีความเหมาะสมกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์นี้ [58] จากการศึกษานี้เห็นได้ชัดว่า แบบจำลอง PZO มีความพอดีกับข้อมูลการทดลองได้แม่นยำกว่าแบบจำลอง PFO และ PSO ดังที่เห็นได้จาก R^2 (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R_0^2 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า R_1^2 และ R_2^2) และค่าคงที่ของอัตราอันดับต่างๆที่คำนวณได้ (K ค่าต่างๆ) ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 4.4 จากผลลัพธ์อธิบายได้ว่าเป็นการสลายอย่างช้าๆ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อค่า K โดยค่า K_0 K_1 และ K_2 ของ TiO_2/GAC 500 °C ที่ได้จากแบบจำลอง PZO PFO และ PSO ตามลำดับ จากตารางแสดงให้เห็นว่า TiO_2/GAC 500 °C มีค่า K สูงสุด ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการสลายพาราควอตได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ TiO_2/GAC 400 °C และ TiO_2/GAC 600 °C เพราะว่าที่อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสมากที่สุดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และที่ 600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์มากขึ้นแทน [50] ข้อเสียของการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดคือ แสงยูวีบางส่วนอาจจะดูดซับที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แสงยูวีฉายไปที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เต็มที่ ดังนั้นจึงทำให้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการสร้างตัวออกซิไดซ์ในปริมาณที่น้อยลง



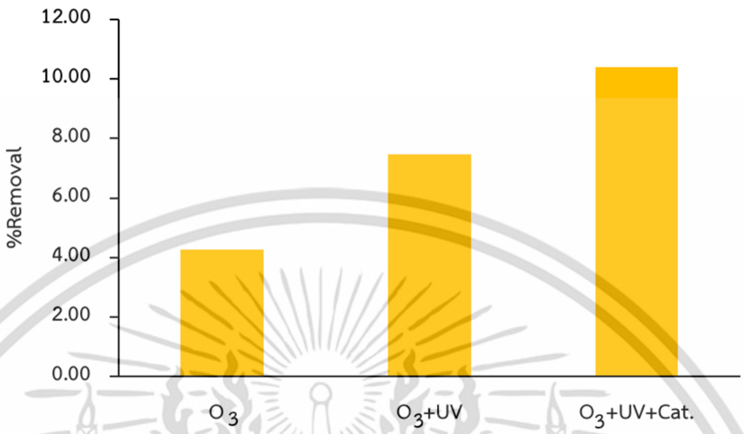
รูปที่ 4.14 กราฟการสลายพาราควอตเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ซึ่งมีการเติมอากาศ โดยใช้เส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PZO เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นจุดแทนผลลัพธ์ของ PSO

(4) การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน

การสลายพาราควอตภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบระหว่างการเติมโอโซนโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมโอโซนโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมโอโซนโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า การเติมโอโซนโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถสลายพาราควอตได้มากที่สุด ซึ่งแก๊สโอโซนสามารถสลายพาราควอตได้ เมื่อเพิ่มทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้สามารถสลายพาราควอตได้มากขึ้น เมื่อโอโซนไปจับกับอิเล็กตรอนที่แถบการนำกลายเป็นโอโซไนด์เรดิคอลแอนไอออน เมื่อโอโซไนด์เรดิคอลแอนไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนจะเกิดเป็น ไฮดรอกซิลเรดิคอลและออกซิเจน ดังสมการที่ 2.16 และ 2.17 ซึ่งการเติมโอโซนโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมอากาศโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสลายพาราควอตได้ ซึ่งมีค่าร้อยละการกำจัดโดยการสลายเท่ากับ 4.28 และ 7.47 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับการสลายพาราควอตด้วยการเติมอากาศโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าร้อยละการกำจัดโดยการสลายเท่ากับ 10.41

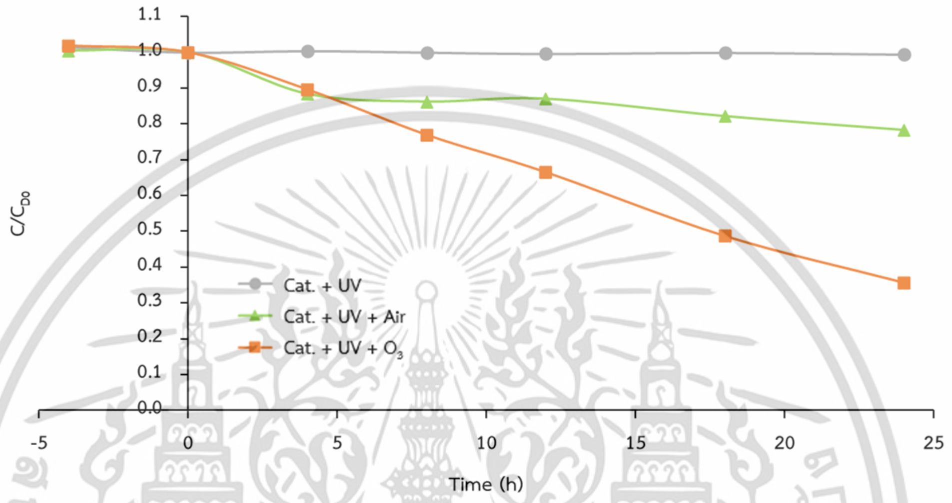


รูปที่ 4.15 การสลายพาราควอตภายในเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบระหว่างการเติมโอโซนโดยไม่มีแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมโอโซนโดยมีแสงยูวีแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมโอโซนโดยมีทั้งแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา

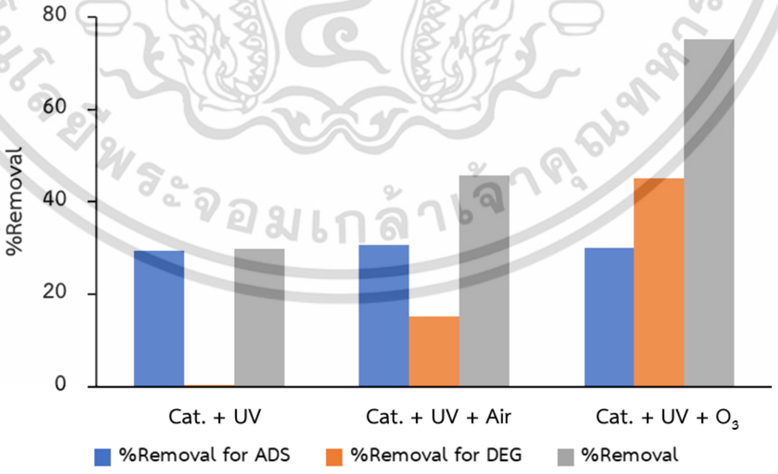
จากรูปที่ 4.16 สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการสลายพาราควอตโดยเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C 2.0 กรัม/ลิตร ได้ดังนี้: การเติมโอโซน > การเติมอากาศ > ไม่มีการเติมอากาศ ซึ่งการสลายพาราควอตแบบมีการเติมโอโซนสามารถสลายพาราควอตได้ร้อยละ 64.40 ใน 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าการเติมโอโซนทำให้ประสิทธิภาพการสลายพาราควอตดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมอากาศและไม่มีการเติมอากาศ อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C สำหรับกระบวนการกำจัดพาราควอตซึ่งมีการเติมโอโซนสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ กระบวนการดูดซับพาราควอตของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในที่มืดและอีกขั้นตอนหนึ่งคือกระบวนการสลายพาราควอตเป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายใต้การฉายรังสียูวีและมีการเติมโอโซน ประสิทธิภาพการสลายของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C แบบเติมโอโซนนั้นมีค่าการสลายที่มากกว่าแบบเติมอากาศถึงประมาณ 3 เท่า (อัตราการไหลของโอโซนกับอากาศมีค่าเท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที) ดังนั้นจึงมีการเติมโอโซนเข้าไปในระบบเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น การเติมโอโซนเป็นการทำให้เกิดออกซิเจนเรดิคอล (O°) ขึ้นซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH°) อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนด้วย ทำให้ปริมาณออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบมากขึ้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้นตามสมการที่ 2.5 – 2.17 เนื่องจากการเติมโอโซนส่งผลให้อัตราการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประสิทธิภาพการสลายพาราควอตในระยะเวลา 24 ชั่วโมงสำหรับแบบไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.54 21.74 และ 64.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน



รูปที่ 4.17 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

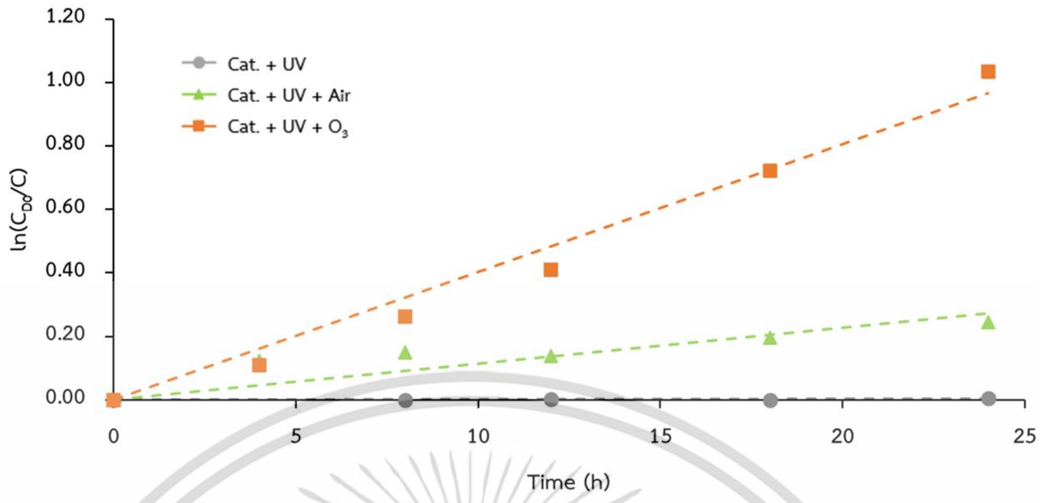
จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงการเปรียบเทียบการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน ซึ่งพบว่า การเติมโอโซนสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการสลายได้มากกว่าการกำจัดพาราควอตด้วยการดูดซับ ซึ่งต่างจากการเติมอากาศที่การกำจัดพาราควอตด้วยการสลายมีค่าน้อยกว่าการกำจัดพาราควอตด้วยการดูดซับ

(5) จลนพลศาสตร์สำหรับการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน

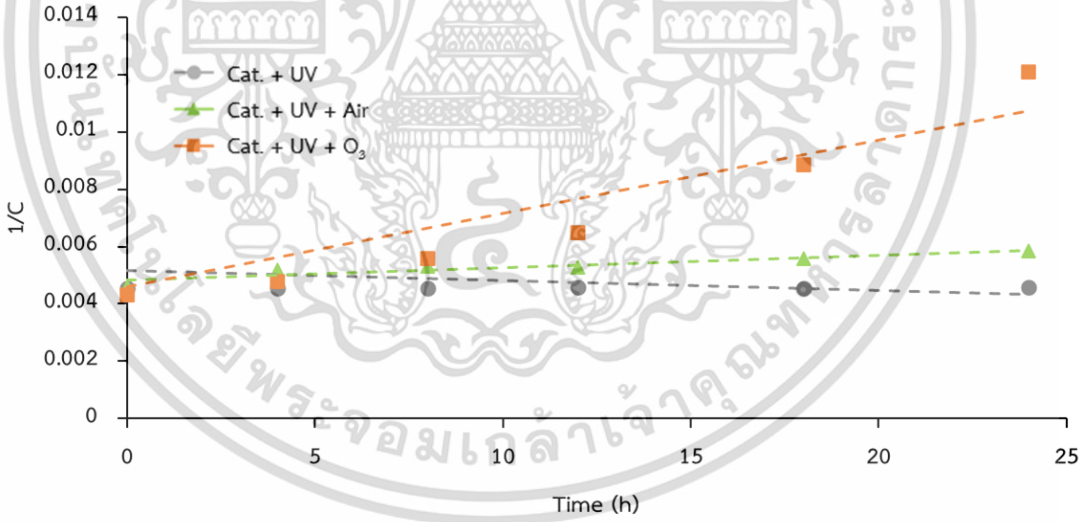
การศึกษานี้จะใช้จลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม (PZO) จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (PFO) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (PSO) มาพิจารณาเพื่ออธิบายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ของการทดลองการสลายพาราควอตด้วยด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน ซึ่งตัวแปรส่งผลต่ออัตราการสลายตามจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม คือ ค่าคงที่ของอัตราการสลาย (K) ของแต่ละแบบจำลอง เพื่อพิจารณากลไกการสลายพาราควอต เริ่มจากแบบจำลอง PZO ทำได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ 2.33 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.34 เมื่อสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง C กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-K_0$ ซึ่งสามารถคำนวณหา K_0 ได้และจุดตัดแกน Y เท่ากับ C_{D0} ในส่วนของแบบจำลอง PFO จะเริ่มจากการอินทิเกรตสมการที่ 2.35 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.36 จากนั้นสร้างกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln (C/C_{D0})$ เทียบกับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.18 จะได้ความชันเท่ากับ K_1

ต่อมาคือแบบจำลอง PSO โดยเริ่มจากการอินทิเกรตสมการที่ 2.38 และจัดเรียงสมการใหม่กลายเป็นสมการที่ 2.39 จากนั้นกราฟเส้นตรงระหว่าง 1/C กับ t สำหรับการทดลองทั้งหมดที่มีอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.19 จะได้ความชันเท่ากับ K_2 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/C_{D0}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟเชิงเส้นระหว่าง ln (C/C_{D0}) เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PFO

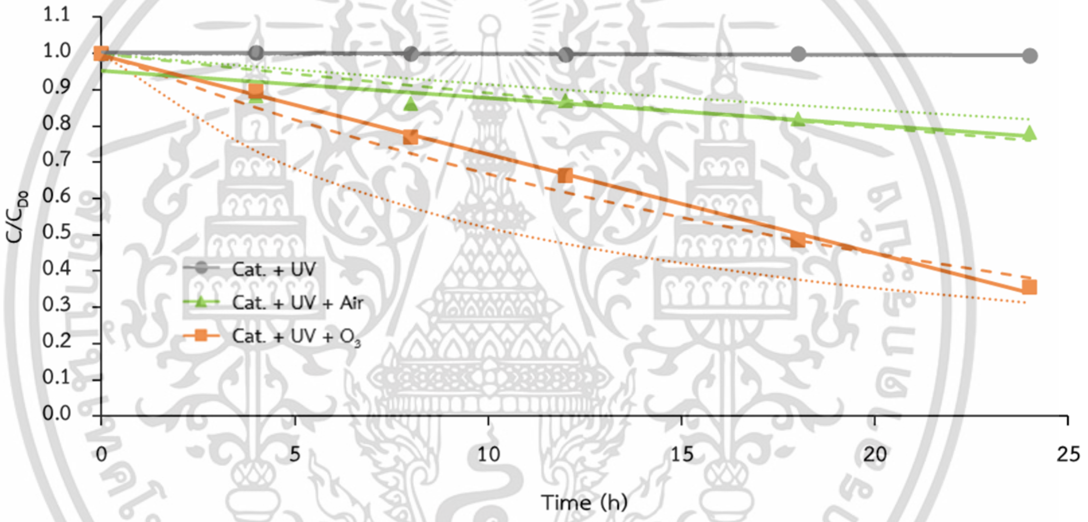


รูปที่ 4.19 กราฟเชิงเส้นระหว่าง 1/C เทียบกับเวลา t ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน (โดยใช้เส้นประแทนผลลัพธ์ของการแปลงเชิงเส้นของ PSO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าผลลัพธ์ของการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนของแบบจำลอง PZO PFO และ PSO

ตัวอย่าง	K_0	K_1	K_2	R_0^2	R_1^2	R_2^2
Cat. + UV	0.06	1.50E-04	1.21E-06	0.56463	0.40539	0.11488
Cat. + UV + Air	1.63	1.14E-02	4.47E-05	0.82077	0.69499	0.46362
Cat. + UV + O_3	6.36	4.02E-02	3.21E-04	0.99750	0.97720	0.61551



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสามารถในการสลายเทียบกับเวลาสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนโดยใช้เส้นทึบแทนผลลัพธ์ของ PZO เส้นประแทนผลลัพธ์ของ PFO และเส้นจุดแทนผลลัพธ์ของ PSO

จากรูปที่ 4.20 กราฟการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซนสามารถอธิบายได้ว่าสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมจลนพลศาสตร์ได้ จากการศึกษานี้เห็นได้ชัดว่า แบบจำลอง PZO มีความพอดีกับข้อมูลการทดลองได้แม่นยำกว่าแบบจำลอง PFO และ PSO ดังที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้จาก R^2 (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R_0^2 มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า R_1^2 และ R_2^2) และค่าคงที่ของอัตราอันดับต่างๆที่คำนวณได้ (K ค่าต่างๆ) ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 4.5 จากผลลัพธ์อธิบายได้ว่าเป็นการสลายอย่างช้าๆ การเติมอากาศและการเติมโอโซนส่งผลต่อค่า K โดยค่า K_0 K_1 และ K_2 ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ที่ได้จากแบบจำลอง PZO PFO และ PSO ตามลำดับ จากตารางแสดงให้เห็นว่า การสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ซึ่งมีการเติมโอโซนมีค่า K สูงสุด ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการสลายพาราควอตได้ดีที่สุด (อัตราการสลาย เท่ากับ 6.36 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$) เมื่อเทียบกับแบบไม่มีการเติมอากาศ (อัตราการสลาย เท่ากับ 0.06 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$) กับแบบมีการเติมอากาศ (อัตราการสลายเท่ากับ 1.63 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$) เพราะว่าการเติมโอโซนเป็นการทำให้เกิดออกซิเจนเรดิคอล (O°) ขึ้น ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีและทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH°) ตามสมการที่ 2.13 – 2.17 อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มออกซิเจนด้วย ทำให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมากขึ้นปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้นตามสมการที่ 2.5 – 2.12 เนื่องจากการเติมโอโซนให้ผลลัพธ์ในการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับไม่มีการเติมอากาศและมีการเติมอากาศ ข้อเสียของการเติมโอโซนคือ โอโซนมีความเป็นพิษต่อระบบหายใจ ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อ ตา จมูกและสามารถทำลายเนื้อเยื่อปอด ถ้าได้รับในปริมาณมากอาจถึงขั้นเสียชีวิตได้ [59]

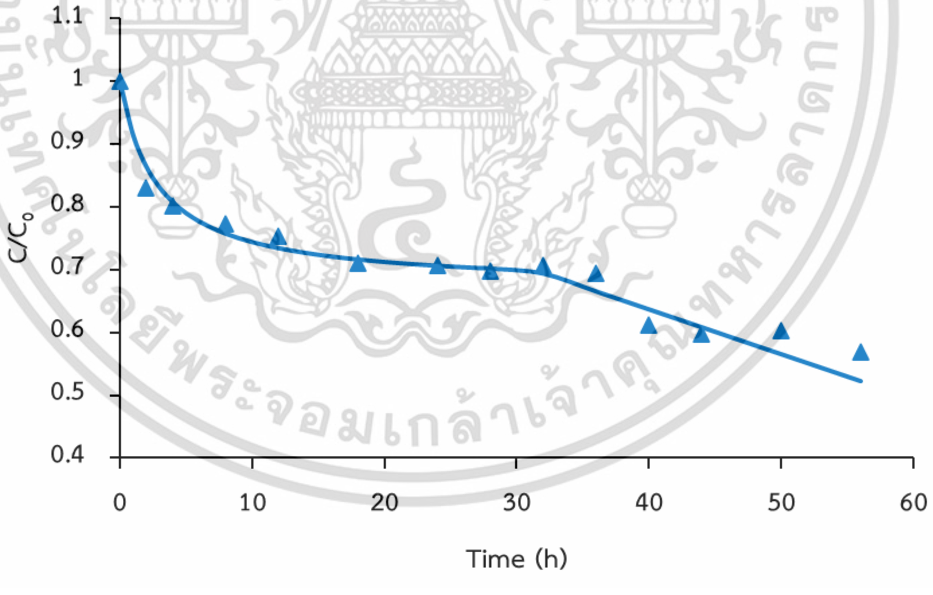
จากการวิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากผลการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ อัตราการกำจัดรวมทั้งหมดจึงเท่ากับอัตราการดูดซับรวมกับอัตราการสลาย [60] ในส่วนของการดูดซับพาราควอตในที่มืดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC อัตราการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับสองเทียม (PSO) ซึ่งอัตราการดูดซับอาจเป็นการดูดซับสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับแรงวาเลนซ์ผ่านการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เมื่อทำการแทนค่าสมการที่ 2.25 ลงในสมการของอัตราการดูดซับพาราควอตของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC (สมการที่ 2.30) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 4.1 ในส่วนของการสลายพาราควอตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC รวมทั้งการเติมอากาศและโอโซน อัตราการสลายมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับศูนย์เทียม (PZO) แสดงว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น แต่อาจจะขึ้นกับปริมาณความเข้มของแสงยูวี จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการสลายพาราควอตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC โดยมีการเติมอากาศหรือโอโซนมีอัตราการสลายคงที่ จากสมการที่ 4.1 แสดงอัตราการกำจัดพาราควอต ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{PQ\ removal} = \begin{cases} k_2\left(\dfrac{(C_t - C_e)V}{W}\right)^2 & \text{เมื่อ } t=0 \text{ ถึง } t=t_e \text{ (Adsorption)} \\ -K_0 & \text{เมื่อ } t=t_e \text{ ถึง } t=t \text{ (Degradation)} \end{cases} \qquad (4.1)$$

โดยที่ t_e คือ เวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลในสภาวะที่ไร้แสง (h)

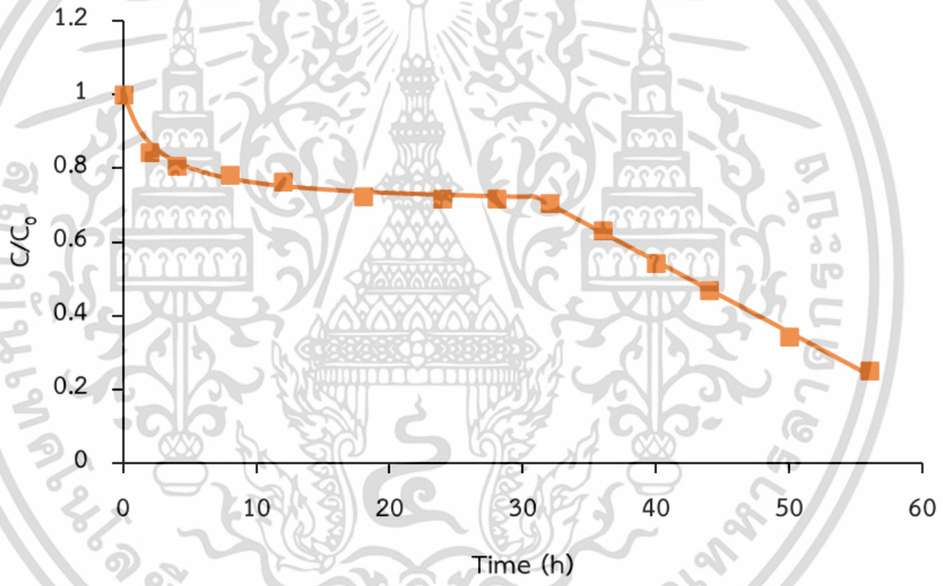
กราฟแสดงอัตราการกำจัดพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมอากาศแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งในช่วงเวลา 0 ถึง 32 ชั่วโมง (เข้าสู่สมดุล) อัตราการกำจัดพาราควอต คือ อัตราการดูดซับในสภาวะไร้แสง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย PSO ตามสมการที่ 4.1 (Adsorption) ส่วนในช่วงเวลา 32 (เข้าสู่สมดุล) ถึง 56 ชั่วโมง อัตราการกำจัดพาราควอต คือ อัตราการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย PZO ตามสมการที่ 4.1 (Degradation) ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราการสลายคงที่



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการกำจัดพาราควอตเทียบกับเวลาด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมอากาศ โดยจุดแทนผลจากการทดลอง และเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของอัตราการสลาย ตามสมการที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงอัตราการกำจัดพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมโอโซนแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งในช่วงเวลา 0 ถึง 32 ชั่วโมง (เข้าสู่สมดุล) อัตราการกำจัดพาราควอต คือ อัตราการดูดซับในสภาวะไร้แสง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย PSO ตามสมการที่ 4.1 (Adsorption) ส่วนในช่วงเวลา 32 (เข้าสู่สมดุล) ถึง 56 ชั่วโมง อัตราการกำจัดพาราควอต คือ อัตราการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย PZO ตามสมการที่ 4.1 (Degradation) ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราการสลายคงที่ จึงสรุปได้ว่า อัตราการกำจัดพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ทั้งมีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน มีแนวโน้มเดียวกัน



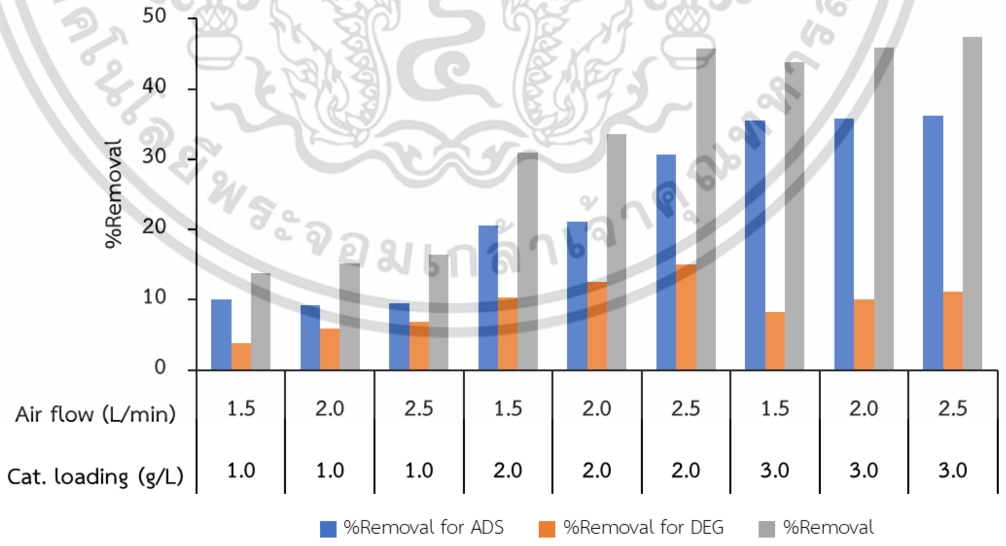
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการกำจัดพาราควอตเทียบกับเวลาด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C โดยมีการเติมโอโซน โดยจุดแทนผลจากการทดลอง และเส้นทึบแทนผลลัพธ์ของอัตราการสลาย ตามสมการที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตและสภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอต

4.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลการกำจัดพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1.0 – 3.0 กรัม/ลิตร และมีอัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 1.5 – 2.5 ลิตร/นาที สามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการดูดซับได้มากกว่าการสลาย สภาวะที่ทำให้การสลายพาราควอตสูงสุด คือ สภาวะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0 กรัม/ลิตร และอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที ซึ่งสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการสลายได้เท่ากับร้อยละ 15.08 และการกำจัดพาราควอตทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 45.71 แต่สภาวะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.0 กรัม/ลิตร และอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที ให้ค่าการกำจัดพาราควอตทั้งหมดสูงที่สุดเท่ากับ 47.36 แต่การกำจัดพาราควอตด้วยการสลายเท่ากับร้อยละ 11.10 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การสลายพาราควอตภายใต้การเติมอากาศในเวลา 24 ชั่วโมง การดูดซับมีอิทธิพลมากกว่าการสลาย แต่สามารถเพิ่มการสลายพาราควอตได้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลาย



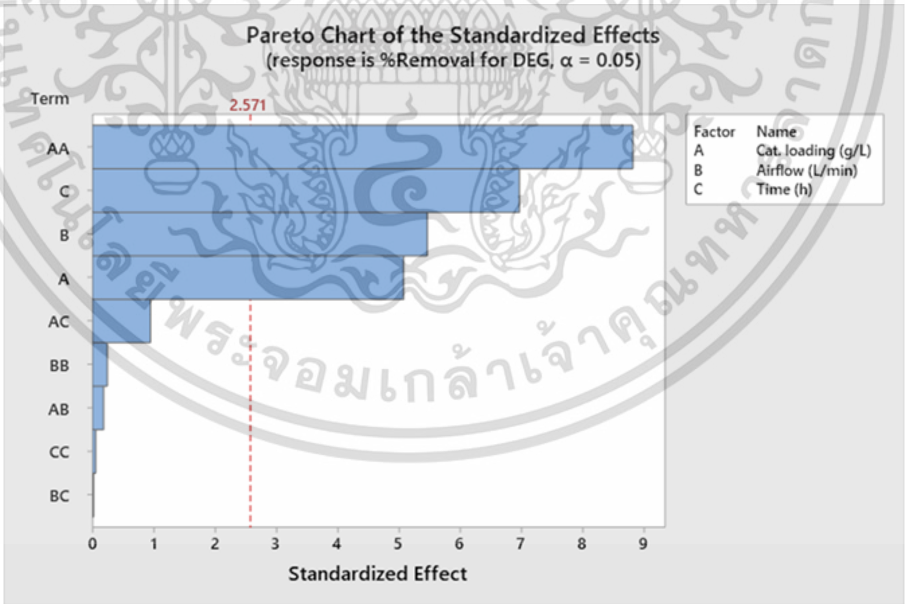
รูปที่ 4.23 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ ในสภาวะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการสลาย โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design ในการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยและปัจจัยละ 3 ระดับ พบว่า สามารถสร้างสมการการถดถอย (Regression equation) เพื่อใช้ในการทำนายการสลายพาราควอต ตามสมการที่ 4.2

$$\%\text{Removal for DEG} = -23.4 + 17.45A + 5.79B + 0.21C - 4.193A*A - 0.46B*B + 0.0008C*C - 0.17A*B + 0.0722A*C - 0.003B*C \quad (4.2)$$

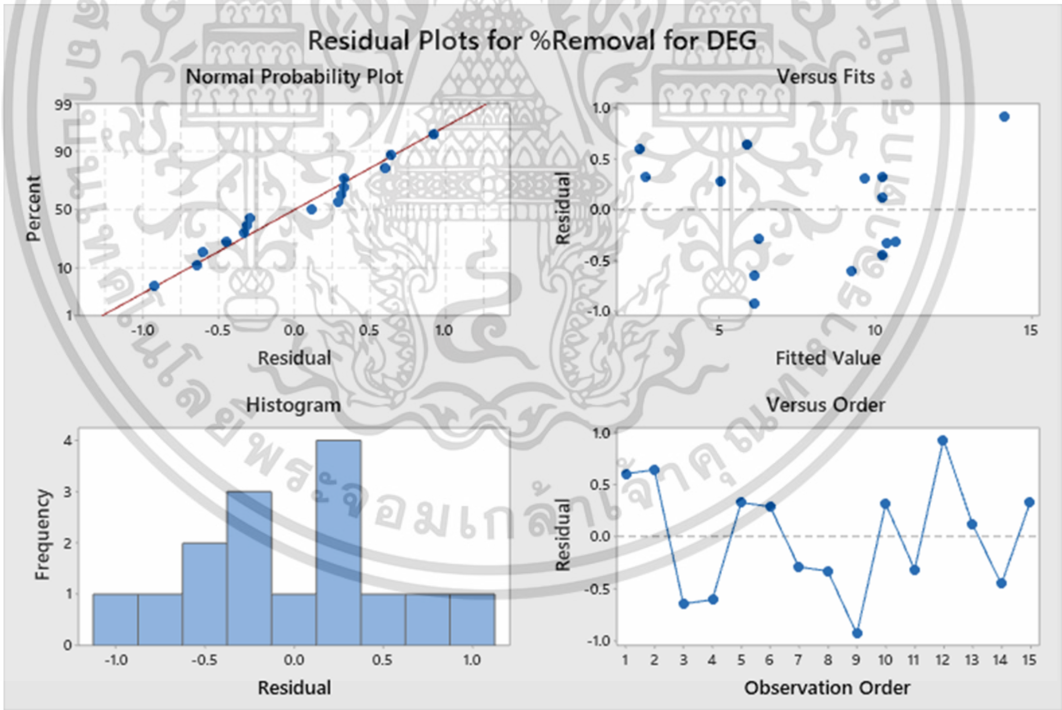
โดยที่ A คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)
B คือ อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)
C คือ เวลาในการสลาย (ชั่วโมง)



รูปที่ 4.24 Pareto Chart ของปัจจัยต่างๆ ต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลาย ซึ่งออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design จากรูปที่ 4.24 เมื่อพิจารณาที่ค่า p–value ที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 (α = 0.05) พบว่า ปัจจัยที่มีค่า p–value มากกว่า 0.05 เป็นปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ*อัตราการไหลของอากาศ (B*B) เวลาในการสลาย*เวลาในการสลาย (C*C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*อัตราการไหลของอากาศ (A*B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*เวลาในการสลาย (A*C) และอัตราการไหลของอากาศ*เวลาในการสลาย (B*C) ซึ่งสอดคล้องกับ Pareto Chart ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แต่ละปัจจัยไม่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน (Interaction) ดังนั้นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A) อัตราการไหลของอากาศ (B) เวลาในการสลาย (C) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A*A) ซึ่งสอดคล้องกับ Pareto Chart ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของอากาศ และเวลาในการสลายเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญเป็นอย่างมากต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ



รูปที่ 4.25 Residual Plots ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Residual Plots แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

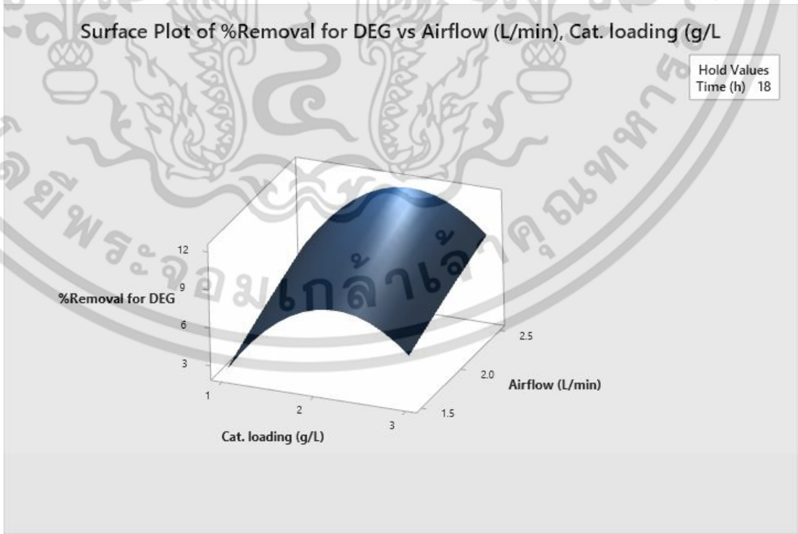
(1) แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) แสดงการแจกแจงความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ซึ่งพบว่า จุดต่างๆเรียงตัวในเชิงเส้นตรงที่ความชั้น 45 องศา บงบอกถึงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ โดยมี R^2 อยู่ที่ 0.9734

(2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ย พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบแกนศูนย์อย่างสมดุลและแบบไม่มีรูปแบบ ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนมีค่าไม่คงที่

(3) การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล (Histogram) พบว่า กราฟมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำบงบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ

(4) การตรวจสอบความเป็นอิสระของ Residual (Versus Order) พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ กราฟมีการกระจายตัวแบบสุ่มอยู่ระหว่าง -1 และ 1

จากการวิเคราะห์ Residual Plots แสดงให้เห็นว่าข้อมูลผลการทดลองสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติได้

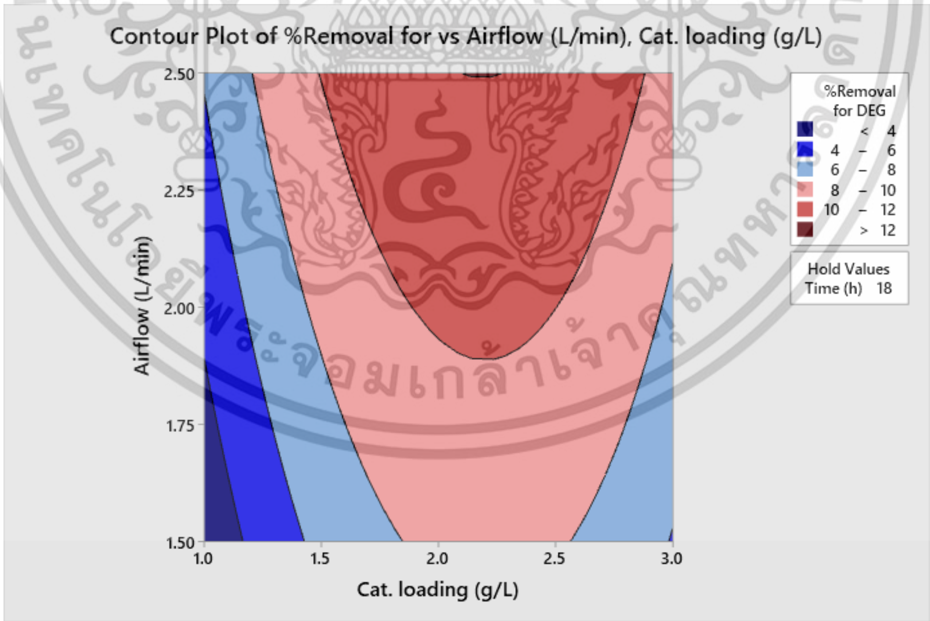


รูปที่ 4.26 Surface Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.0 กรัม/ลิตร สามารถสลายได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศ 2.5 ลิตร/นาที ซึ่งการกำจัดพาราควอตโดยการสลายมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15.08 และมีอัตราการสลายเท่ากับ 1.89 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$ เมื่อลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.0 กรัม/ลิตร ทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลในการสลายพาราควอตลดลงด้วย อัตราการสลายพาราควอตจึงมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3.0 กรัม/ลิตร ทำให้อัตราการกำจัดพาราควอตโดยการสลายลดลงด้วย เนื่องจากพาราควอตส่วนใหญ่ถูกดูดซับลงบนตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าการสลาย ทำให้อัตราการกำจัดพาราควอตโดยการสลายลดลงด้วย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่า ช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1.9 – 2.5 กรัม/ลิตร สามารถสลายได้ค่อนข้างดีที่ช่วงอัตราการไหลของอากาศอยู่ระหว่าง 2.0 – 2.5 ลิตร/นาที และสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้มากกว่าร้อยละ 12 ในช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.10 – 2.25 กรัม/ลิตร ที่อัตราการไหลของอากาศอยู่ 2.5 ลิตร/นาที

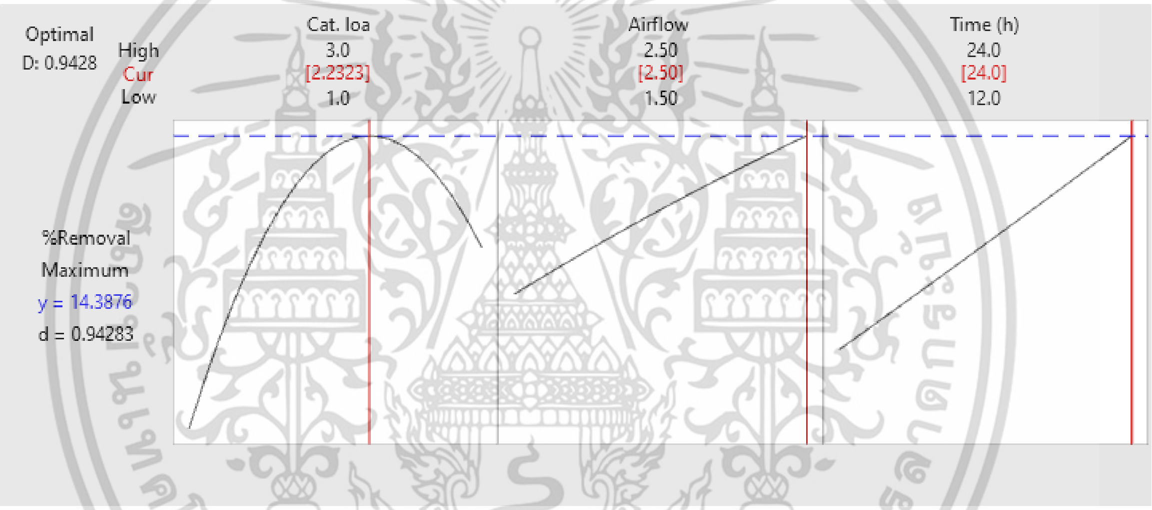


รูปที่ 4.27 Contour Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของอากาศต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมอากาศ

สำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Box–Behnken design สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายพาราควอตภายใต้การเติมอากาศ โดยกำหนดร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลายเท่ากับ 15.0816 พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 2.2323 กรัม/ลิตร อัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง จึงจะสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้ร้อยละ 14.3876 ดังรูปที่ 4.28

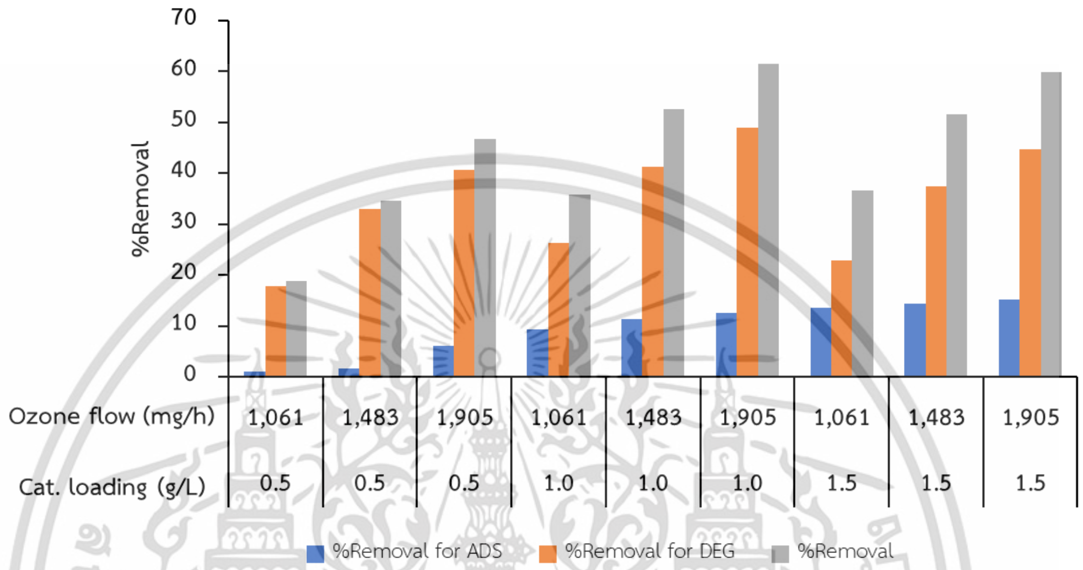


รูปที่ 4.28 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมอากาศ

เมื่อทำการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 2.2323 กรัม/ลิตร อัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 2.5 ลิตร/นาที และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง โดยการทำซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้เฉลี่ยร้อยละ 14.30 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดร้อยละ 1.77 เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณแบบจำลองจลนพลศาสตร์ พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับศูนย์เทียม ซึ่งแสดงถึงอัตราการสลายเฉลี่ยมีค่าคงที่ เท่ากับ 2.01 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน



รูปที่ 4.29 ผลการกำจัดพาราควอตทั้งการดูดซับและการสลายด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน ในสภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.29 แสดงผลการกำจัดพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 กรัม/ลิตร และมีอัตราการไหลของโอโซนอยู่ในช่วง 1,061 – 1,905 ลิตร/นาที สามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการสลายได้มากกว่าการดูดซับ สภาวะที่ทำให้สามารถสลายพาราควอตสูงสุด คือ สภาวะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 กรัม/ลิตร และอัตราการไหลโอโซนเท่ากับ 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ซึ่งสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการสลายได้เท่ากับร้อยละ 48.91 และการกำจัดพาราควอตทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 61.47 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของการกำจัดพาราควอตทั้งหมด ด้วยเหตุนี้สามารถสรุปได้ว่า การสลายพาราควอตภายใต้การเติมโอโซนในเวลา 24 ชั่วโมง การสลายมีอิทธิพลมากกว่าการดูดซับ และยังสามารถเพิ่มการสลายพาราควอตได้ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายพาราควอตในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการสลาย โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design ในการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยและปัจจัยละ 3 ระดับ พบว่า สามารถสร้างสมการการถดถอย (Regression equation) เพื่อใช้ในการทำนายการสลายพาราควอต ตามสมการที่ 4.3

$$\%\text{Removal for DEG} = -67.25 + 37.85A + 0.06283B + 0.31C - 18.28A*A - 0.000019B*B - 0.0068C*C + 0.00042A*B + 0.092A*C + 0.000863B*C \quad (4.3)$$

โดยที่ A คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)

B คือ อัตราการไหลของโอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)

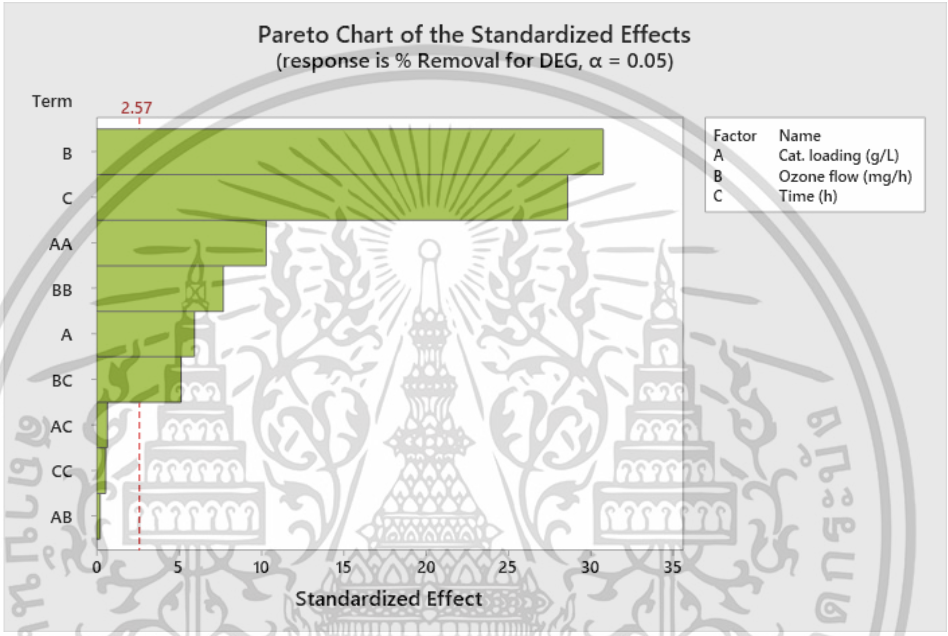
C คือ เวลาในการสลาย (ชั่วโมง)

ผลการวิเคราะห์ร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลาย ซึ่งออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box–Behnken design จากรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาที่ค่า p–value ที่ระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ ร้อยละ 95 (α = 0.05) พบว่า ปัจจัยที่มีค่า p–value มากกว่า 0.05 เป็นปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*เวลาในการสลาย (A*C) เวลาในการสลาย*เวลาในการสลาย (C*C) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*อัตราการไหลของโอโซน (A*B) ซึ่งสอดคล้องกับ Pareto Chart ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แต่ละปัจจัยไม่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน (Interaction) ดังนั้นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A) อัตราการไหลของโอโซน (B) เวลาในการสลาย (C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A*A) อัตราการไหลของโอโซน*เวลาในการสลาย (B*C) อัตราการไหลของโอโซน*อัตราการไหลของโอโซน (B*B) ซึ่งสอดคล้องกับ Pareto Chart ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของโอโซน และเวลาในการสลายเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญเป็นอย่างมากต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน ผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม (Interaction effects) พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันต่อการสลายพาราควอต ได้แก่ อัตราการไหลของโอโซน*เวลาในการสลาย (B*C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความไม่เสถียรของโอโซน เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิดการสลายพาราควอตมากขึ้น อาจเกิดการรวมตัวของโอโซนทำให้กลายเป็นแก๊สออกซิเจน ตามสมการที่ 4.4 [61]

$$2O_3 \rightarrow 3O_2 \qquad (4.4)$$



รูปที่ 4.30 Pareto Chart ของปัจจัยต่างๆ ต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน

กราฟแสดง Residual Plots แสดงดังรูปที่ 4.31 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

(1) แผนภาพการทดสอบความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) แสดงการแจกแจงความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ซึ่งพบว่า จุดต่างๆเรียงตัวในเชิงเส้นตรงที่ความชั้น 45 องศา บงบอกถึงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ โดยมี R^2 อยู่ที่ 0.9975

(2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าเฉลี่ย พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบแกนศูนย์

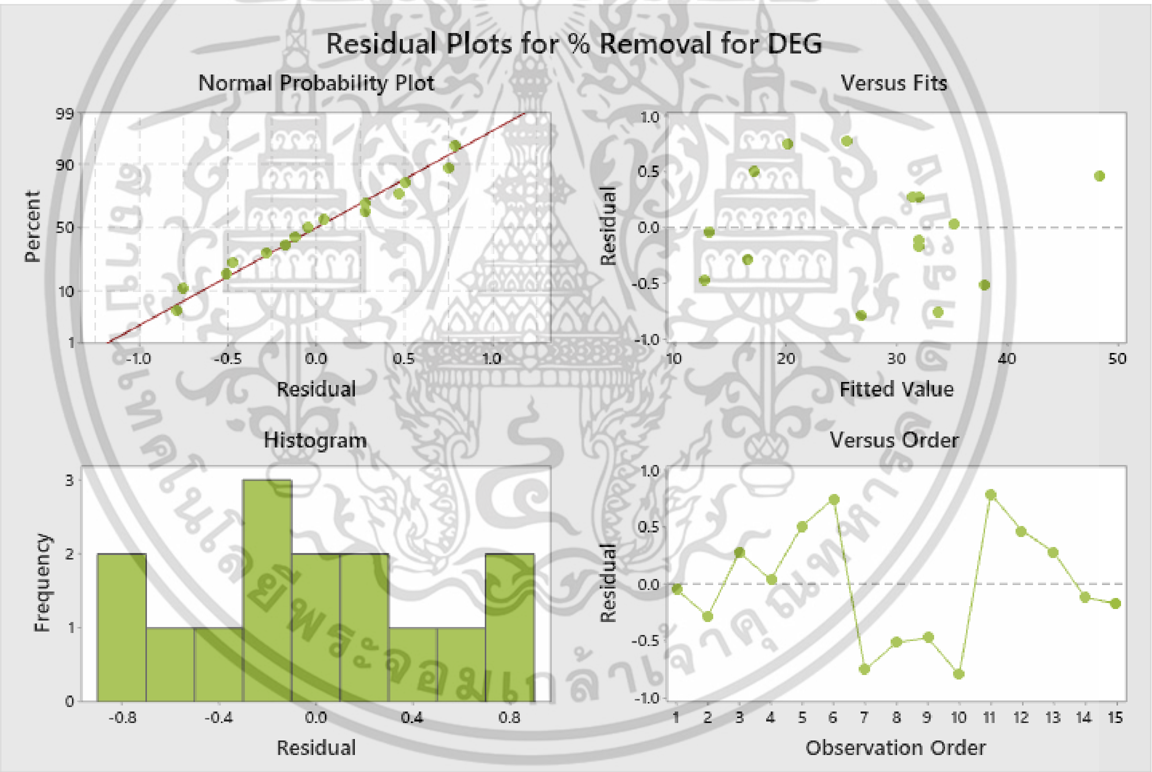
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างสมดุลและแบบไม่มีรูปแบบ ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนมีค่าไม่คงที่

(3) การตรวจสอบการแจกแจงข้อมูล (Histogram) พบว่า กราฟมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำบงบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ

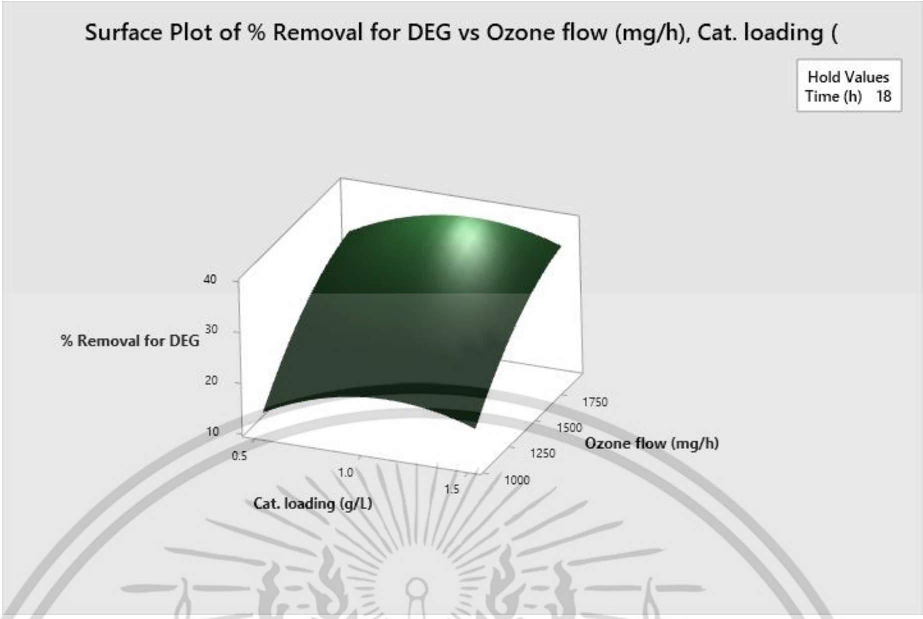
(4) การตรวจสอบความเป็นอิสระของ Residual (Versus Order) พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ กราฟมีการกระจายตัวแบบสุ่มอยู่ระหว่าง -1 และ 1

จากการวิเคราะห์ Residual Plots แสดงให้เห็นว่าข้อมูลผลการทดลองสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติได้



รูปที่ 4.31 Residual Plots ของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน

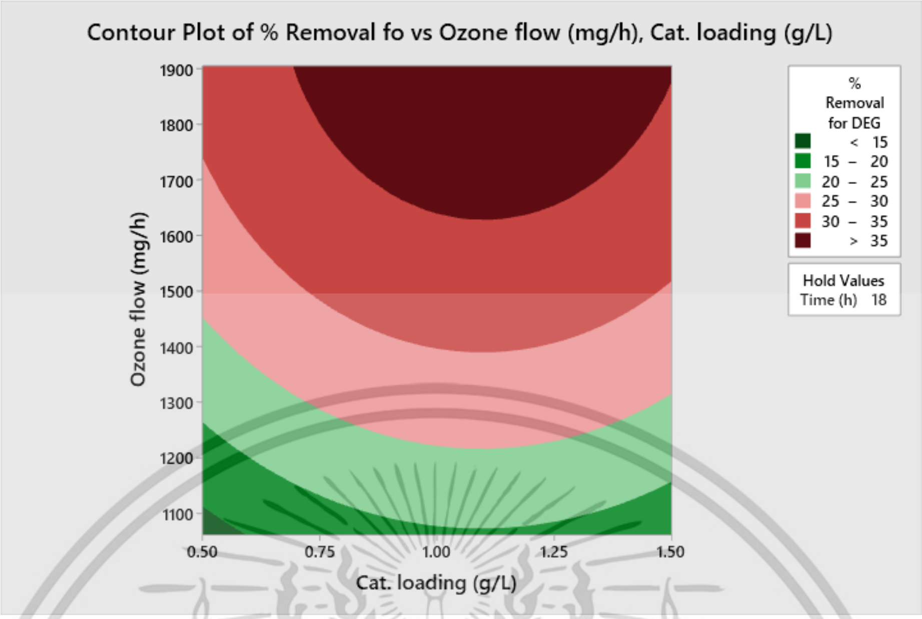
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 Surface Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซนต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซน แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0 กรัม/ลิตร สามารถสลายได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลของโอโซน 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ซึ่งการกำจัดพาราควอตโดยการสลายมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 48.91 และมีอัตราการสลายเท่ากับ 6.63 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$ เมื่อลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.5 กรัม/ลิตร ทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุมูลในการสลายพาราควอตลดลงด้วย อัตราการสลายพาราควอตจึงมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1.5 กรัม/ลิตร ทำให้อัตราการกำจัดพาราควอตโดยการสลายลดลงด้วย เนื่องจากพาราควอตส่วนใหญ่ถูกดูดซับลงบนตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าการสลาย ทำให้อัตราการกำจัดพาราควอตโดยการสลายลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



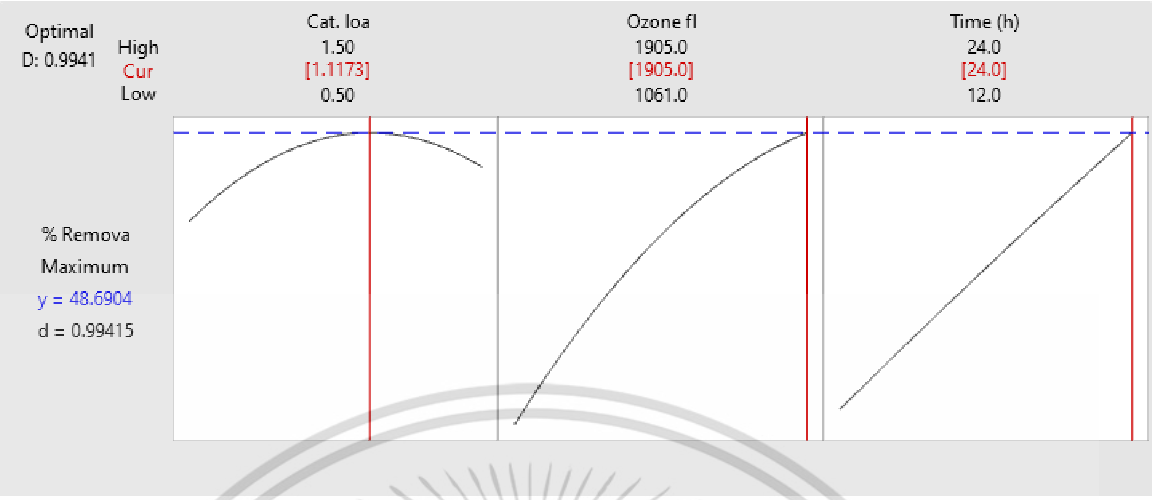
รูปที่ 4.33 Contour Plot ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซนต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของโอโซน แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่า ช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 0.7 – 1.5 กรัม/ลิตร สามารถสลายได้ดีในช่วงอัตราการไหลของโอโซนอยู่ระหว่าง 1,650 – 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง และสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้มากกว่าร้อยละ 35

4.3.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ภายใต้การเติมโอโซน

สำหรับการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการ Box–Behnken design สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายพาราควอตภายใต้การเติมโอโซน โดยกำหนดร้อยละการกำจัดพาราควอตโดยการสลายเท่ากับ 48.9050 พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 1.11732 กรัม/ลิตร อัตราการไหลของโอโซน เท่ากับ 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมง และเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง จึงจะสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้ร้อยละ 48.6904 ดังรูปที่ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้มีการเติมโอโซน

เมื่อทำการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 1.1173 กรัม/ลิตร อัตราการไหลของโอโซน เท่ากับ 1,905 มิลลิกรัม/ชั่วโมงและเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง โดยการทำซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าสามารถกำจัดพาราควอตโดยการสลายได้เฉลี่ยร้อยละ 48.70 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดร้อยละ 1.50 เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณแบบจำลองจลนพลศาสตร์ พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอันดับศูนย์เทียม ซึ่งแสดงถึงอัตราการสลายเฉลี่ยมีค่าคงที่ เท่ากับ 6.76 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$

การเปรียบเทียบผลจากการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการสลายพาราควอตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งตารางนี้แสดงให้เห็นว่า TiO_2/GAC 500 °C (การศึกษานี้) มีศักยภาพที่ดีในการสลายพาราควอตมากกว่าการศึกษาอื่นๆ โดยพิจารณาจากปริมาณการสลายพาราควอตต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณพาราควอตที่สลายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ภายใต้การเติมอากาศและการเติมโอโซนคือ 13.04 และ 88.06 $mg\ g^{-1}\ h^{-1}$ ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC เมื่อเทียบกับการศึกษาอื่นๆ ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการสลายพาราควอต โดยใช้ TiO_2/UV

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ PQ ($mg \cdot L^{-1}$)	ปริมาณ TiO_2 ในตัวเร่งปฏิกิริยา ($g \cdot L^{-1}$)	ร้อยละการสลาย PQ	ร้อยละการกำจัด PQ ทั้งหมด	ปริมาณ PQ ที่สลายต่อน้ำหนัก TiO_2 ($mg \cdot g_{TiO2}^{-1} \cdot h^{-1}$)	อ้างอิง
TiO_2/UV	10	0.35	84.00	84.00	4.80	[33]
$1C_{60}/1V\text{-}TiO_2$ /Xenon lamp	50	0.98	70.00	70.00	8.93	[40]
TiO_2(P25)/UV	5	1.00	100.00	100.00	3.33	[62]
TiO_2/UV	10	1.00	76.21	78.62	2.28	[63]
TiO_2/UV	1×10^{-3}	0.10	70.00	70.00	1.75×10^{-3}	[64]
TiO_2-Fe/UV	30	0.50	40.40	40.40	19.39	[65]
TiO_2/fibers/UV	10	0.50	49.50	49.50	1.24	[66]
TiO_2(P25)/ β-SiC/UV	10	0.23	43.00	43.00	16.38	[67]
TiO_2/GAC 500°C/UV/Air	300	0.16	18.89	38.53	13.04	การศึกษานี้
TiO_2/GAC 500°C/UV/O_3	300	0.08	54.15	58.77	88.06	

จากตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลจากการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงด้วยวิธีการดูดซับ จะเห็นได้ว่าปริมาณการกำจัดพาราควอตต่อตัวตัวกำจัดด้วยการเติมโอโซนในการศึกษานี้สามารถกำจัดค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ และเมื่อทำการฉายยูวีภายใต้การเติมโอโซนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C ให้ค่าการกำจัดที่ดีที่สุด เท่ากับ 178.01 มิลลิกรัม/กรัมตัวกำจัด และสามารถกำจัดพาราควอตได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาฉายรังสียูวี ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC นี้คือ TiO_2/GAC 500 °C สามารถกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงได้ ง่ายต่อการแยกออกจากสารละลาย ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน และมีต้นทุนที่ไม่สูงมาก โดยทั่วไปการกำจัดพาราควอตด้วยการดูดซับ เมื่อการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับอิ่มตัวจะต้องเปลี่ยนตัวดูดซับหรือนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วไปกำจัด ซึ่งก่อให้เกิดของเสียหรือมลพิษเพิ่มขึ้น วิธีที่ศึกษานี้อาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดพาราควอตที่สามารถลดปริมาณตัวดูดซับที่ใช้แล้วที่เกิดจากการดูดซับที่อิ่มตัวแล้ว ซึ่งค่าดำเนินการทั้งหมดในการเตรียม TiO_2/GAC 100 กรัม สำหรับการทดลองนี้ มีค่าเท่ากับ 14.88 บาท/กรัม แสดงดังตารางที่ ข.1 และ ข.2 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่นๆ เกี่ยวกับการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูง

ตัวกำจัด	ลักษณะของตัวกำจัด	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ PQ ($mg\cdot L^{-1}$)	ปริมาณตัวกำจัด ($g\cdot L^{-1}$)	ร้อยละการกำจัด PQ	ปริมาณ PQ ที่กำจัดต่อน้ำหนักตัวกำจัด ($mg\cdot g^{-1}$)	อ้างอิง
Tire-derived activated carbon	เกล็ด (0.65 mm)	40	5.00	87.7	33.7	[46]
Commercial activated carbon		40	5.00	92.9	75.8	
RHS MCM-41 NaBEA	ผง (63–75 μm)	500 500 400	2.50 2.50 2.50	9.45 10.65 76.25	18.9 21.3 122	[68]
MAA-modified rice husk	เกล็ด (0.625–2.54 mm)	120	0.20	38.53	231.2	[69]
Sepiolite Bentonite	ผง	250 250	5.00 5.00	24.60 84.80	12.3 42.4	[70]
NAC water ferns	ผง	45	1.00	44.4	20.0	[71]
AC from starch	ผง	150	2.00	88.27	66.2	[72]
TiO_2/GAC 500°C/UV/Air	เกล็ด (1–2 mm)	300	2.23	38.53	58.95	การศึกษานี้
TiO_2/GAC 500°C/UV/O_3		300	1.12	58.77	178.01	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (TiO_2/GAC) ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถช่วยให้การสลายพาราควอตที่ความเข้มข้นสูงมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับพาราควอตไว้ ทำให้บริเวณโดยรอบของไทเทเนียมไดออกไซด์เต็มไปด้วยพาราควอต ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC สามารถเตรียมโดยวิธีโซล – เจล ซึ่งวิธีนี้สะดวกต่อการเตรียมและมีต้นทุนต่ำ โดยปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การสลายพาราควอตด้วย TiO_2/GAC ที่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C มีประสิทธิภาพในสลายพาราควอตมากที่สุด สำหรับการศึกษากระบวนการสลายพาราควอตจะเริ่มจากการดูดซับพาราควอตบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่า การดูดซับพาราควอตสามารถอธิบายได้โดยใช้จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo–second–order) หลังจากนั้นจะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ TiO_2/GAC ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศหรือโอโซน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการสลาย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมอากาศและโอโซนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายพาราควอตภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2/GAC 500 °C โดยที่การเติมโอโซนสามารถสลายพาราควอตได้ดีกว่าการเติมอากาศถึงประมาณ 3 เท่า และการเติมโอโซนสามารถกำจัดพาราควอตด้วยการสลายเท่ากับร้อยละ 48.91 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์เทียม (Pseudo–zero–order) ซึ่งพบว่า มีค่าการสลายคงที่สูงที่สุดเท่ากับ 6.76 $mg{\cdot}L^{-1}{\cdot}h^{-1}$ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ขั้นตอนการคายซับออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีประโยชน์มากในแง่ของปฏิบัติงาน เนื่องจากโดยปกติอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เมื่อนำไปใช้งานทำให้ขั้นตอนในการแยกมีความซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยหวังว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเกล็ดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำให้กระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารละลายหลังสิ้นสุดปฏิกิริยามีความซับซ้อนน้อยลง และเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการสลายพาราควอตนั้น มีดังนี้: (1) อาจจะต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ให้มีความเหมาะสมต่อการดูดซับพาราควอตให้ดีขึ้น เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้เวลาในการดูดซับพาราควอตมากถึง 24 ชั่วโมง เพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (2) อาจจะลองทำการหาปริมาณความเข้มของแสงที่เหมาะสมต่อการสลายพาราควอตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC เพื่อให้ปฏิกิริยาการสลายเกิดได้เร็วขึ้น และ (3) อาจจะลองทำการทดลองกับตัวอย่างน้ำที่ปนเปื้อนด้วยพาราควอตตามแหล่งน้ำจริง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดพาราควอตในตัวอย่างน้ำที่ปนเปื้อน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Bureau of Occupational and Environmental Diseases (BOED), "Information on agricultural occupations in Thailand," *Department of Disease Control; Ministry of Public Health Thailand*. [Online]. Available: http://envocc.ddc.moph.go.th /contents/view/210. [Accessed: 18-Feb-2022].

[2] DOA TOGETHER, "Summary report on the import of pesticides in agriculture," *Department of Agriculture*. [Online]. Available: https://www.doa.go.th /ard/?page_id=386. [Accessed: 18-Feb-2022].

[3] DOA Open Data, "ข้อมูลปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุอันตรายที่มีการนำเข้ารายประเทศ," *Department Of Agriculture*. [Online]. Available: https://info.doa.go.th/opendata /showthread.php?tid=11. [Accessed: 18-Feb-2022].

[4] W. Amondham, P. Parkpian, C. Polprasert, R. DeLaune, and A. Jugsujinda, "Paraquat adsorption, degradation, and remobilization in tropical soils of Thailand," *J. Environ. Sci. Heal. - Part B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes*, vol. 41, no. 5, pp. 485–507, 2006.

[5] K. Suppaudom, "PARAQUAT CONTAMINATION IN THE CHANTHABURI RIVER A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF MASTER OF Copyright by Mahidol University Copyright by Mahidol University," 2013.

[6] P. Konthonbut, P. Kongtip, N. Nankongnab, M. Tipayamongkholgul, W. Yoosook, and S. Woskie, "Paraquat exposure of pregnant women and neonates in agricultural areas in Thailand," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 6, 2018.

[7] Food and Agriculture Organization of The United Nation (FAO), "FAO SPECIFICATIONS AND EVALUATIONS FOR AGRICULTURAL PESTICIDES," Rome, Italy, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[8] “WHO Recommended Classification of Pesticides by Hazard: Guidelines to classification 1990-1991,” *Bull. World Health Organ.*, vol. 68, no. 4, p. 517, 1990.

[9] Y. Huang, H. Zhan, P. Bhatt, and S. Chen, “Paraquat Degradation From Contaminated Environments: Current Achievements and Perspectives,” *Front. Microbiol.*, vol. 10, no. August, pp. 1–9, 2019.

[10] M. Watts, “PARAQUAT,” 2011. [Online]. Available: http://wssroc.agron.ntu.edu.tw /note/Paraquat.pdf. [Accessed: 18-Feb-2022].

[11] U. Diebold, “The surface science of titanium dioxide,” *Surf. Sci. Rep.*, vol. 48, no. 1, pp. 53–229, 2002.

[12] J. E. S. Haggerty *et al.*, “High-fraction brookite films from amorphous precursors,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2017.

[13] K. Hashimoto, H. Irie, and A. Fujishima, “TiO_2 photocatalysis: A historical overview and future prospects,” *Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.*, vol. 44, no. 12, pp. 8269–8285, 2005.

[14] Yu-chih Lin and Chia-hsin Lin, “Catalytic and Photocatalytic Degradation of Ozone via Utilization of Controllable Nano-Ag Modified on TiO_2,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 676–680, 2014.

[15] P. Zhang and J. Liu, “Photocatalytic degradation of trace hexane in the gas phase with and without ozone addition: Kinetic study,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 167, no. 2–3, pp. 87–94, 2004.

[16] R. DiPanfilo and N. O. Egiebor, “Activated carbon production from synthetic crude coke,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 46, no. 3, pp. 157–169, 1996.

[17] D. Prahas, Y. Kartika, N. Indraswati, and S. Ismadji, “Activated carbon from jackfruit peel waste by H_3PO_4 chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization,” *Chem. Eng. J.*, vol. 140, no. 1–3, pp. 32–42, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[18] E. Okoniewska, J. Lach, M. Kacprzak, and E. Neczaj, “The trial of regeneration of used impregnated activated carbons after manganese sorption,” *Desalination*, vol. 223, no. 1–3, pp. 256–263, 2008.

[19] F. Harrelkas, A. Azizi, A. Yaacoubi, A. Benhammou, and M. N. Pons, “Treatment of textile dye effluents using coagulation-flocculation coupled with membrane processes or adsorption on powdered activated carbon,” *Desalination*, vol. 235, no. 1–3, pp. 330–339, 2009.

[20] A. Bhatnagar, W. Hogland, M. Marques, and M. Sillanpää, “An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications,” *Chem. Eng. J.*, vol. 219, pp. 499–511, 2013.

[21] K. D. Hammond and W. C. Conner, *Analysis of catalyst surface structure by physical sorption*, vol. 56. 2013.

[22] P. Nyamukamba, O. Okoh, H. Mungondori, R. Taziwa, and S. Zinya, “Synthetic Methods for Titanium Dioxide Nanoparticles: A Review,” *Titan. Dioxide - Mater. a Sustain. Environ.*, no. June 2018, 2018.

[23] S. H. Yuh, “Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions,” *Scientometrics*, vol. 59, no. 1, pp. 171–177, 2004.

[24] Y. S. Ho and G. McKay, “Pseudo-second order model for sorption processes,” *Process Biochem.*, vol. 34, no. 5, pp. 451–465, 1999.

[25] J. D. Mackenzie and E. P. Bescher, “Physical Properties of Sol-Gel Coatings,” *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 23–29, 2000.

[26] G. Rytwo and A. L. Zelkind, “Evaluation of kinetic pseudo-order in the photocatalytic degradation of ofloxacin,” *Catalysts*, vol. 12, no. 1, 2022.

[27] F. A. Aisien, N. A. Amenaghawon, and E. F. Ekpenisi, “Photocatalytic decolourisation of industrial wastewater from a soft drink company,” *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 9, no. April, pp. 11–16, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] M. Irani, T. Mohammadi, and S. Mohebbi, “Photocatalytic degradation of methylene blue with ZnO nanoparticles; a joint experimental and theoretical study,” *J. Mex. Chem. Soc.*, vol. 60, no. 4, pp. 218–225, 2016.

[29] M. J. Cantavenera, I. Catanzaro, V. Loddo, L. Palmisano, and G. Sciandrello, “Photocatalytic degradation of paraquat and genotoxicity of its intermediate products,” *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 185, no. 2–3, pp. 277–282, 2007.

[30] R. Rial-Otero, B. Cancho-Grande, C. Perez-Lamela, J. Simal-Gándara, and M. Arias-Estévez, “Simultaneous determination of the herbicides diquat and paraquat in water,” *J. Chromatogr. Sci.*, vol. 44, no. 9, pp. 539–542, 2006.

[31] M. H. Florêncio, E. Pires, A. L. Castro, M. R. Nunes, C. Borges, and F. M. Costa, “Photodegradation of Diquat and Paraquat in aqueous solutions by titanium dioxide: Evolution of degradation reactions and characterisation of intermediates,” *Chemosphere*, vol. 55, no. 3, pp. 345–355, 2004.

[32] R. Andreozzi, A. Insola, V. Caprio, and M. G. D’amore, “Ozonation of 1, 1’ dimethyl, 4,4’ bipyridinium dichloride (Paraquat) in aqueous solution,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 14, no. 7, pp. 695–700, 1993.

[33] F. Zahedi, M. Behpour, S. M. Ghoreishi, and H. Khalilian, “Photocatalytic degradation of paraquat herbicide in the presence TiO_2 nanostructure thin films under visible and sun light irradiation using continuous flow photoreactor,” *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 287–295, 2015.

[34] L. Phuong Thu *et al.*, “On the Degradation of Glyphosate by Photocatalysis Using TiO_2 / Biochar Composite Obtained from the Pyrolysis of Rice Husk,” *Water*, vol. 13, no. 23, pp. 1–19, 2021.

[35] M. H. El-Saeid, M. O. Alotaibi, M. Alshabanat, K. Alharbi, A. S. Altowyan, and M. Al-Anazy, “Photo-catalytic remediation of pesticides in wastewater using UV/TiO_2,” *Water*, vol. 13, no. 21, pp. 1–11, 2021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[36] M. Raashid, M. Kazmi, A. Ikhlaq, T. Iqbal, M. Sulaiman, and A. Shakeel, “Degradation of aqueous confidor® pesticide by simultaneous TiO_2 photocatalysis and fe-zeolite catalytic ozonation,” *Water*, vol. 13, no. 23, pp. 1–11, 2021.

[37] F. M. El-Hossary, A. Ghitas, A. M. Abd El-Rahman, A. A. Ebnalwaled, M. Abdelhamid Shahat, and M. H. Fawey, “Effect of UV-activated TiO_2 Nanoparticles on the Properties and Performance of PAni-TiO_2 Nanocomposite Films for Solar Cell Applications,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 956, no. 1, 2020.

[38] A. T. Slominski, M. A. Zmijewski, P. M. Plonka, J. P. Szaflarski, and R. Paus, “How UV Light Touches the Brain and Endocrine System Through Skin, and Why,” *Endocrinology*, vol. 159, no. 5, pp. 1992–2007, 2018.

[39] Y. Hirahara, H. Ueno, and K. Nakamuro, “Comparative photodegradation study of fenthion and disulfoton under irradiation of different light sources in liquid- and solid-phases,” *J. Heal. Sci.*, vol. 47, no. 2, pp. 129–135, 2001.

[40] E. Kanchanatip, N. Grisdanurak, R. Thongruang, and A. Neramittagapong, “Degradation of paraquat under visible light over fullerene modified V-TiO_2,” *React. Kinet. Mech. Catal.*, vol. 103, no. 1, pp. 227–237, 2011.

[41] A. W. Zhou, G. Li, L. Wang, Z. Chen, and Y. Lin, “A Facile Method for the Fabrication of a Superhydrophobic,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 1–11, 2017.

[42] A. Dehghanghadikolaei, J. Ansary, and R. Ghoreishi, “Sol-gel process applications: A mini-review,” *Proc. Nat. Res. Soc.*, vol. 2, no. 02008, pp. 1–11, 2018.

[43] D. Bokov *et al.*, “Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. vol.2021, pp. 1–21, 2021.

[44] S. Alginate *et al.*, “Photocatalytic Removal of Cr (VI) by Thiourea Modified Sodium Alginate/Biochar Composite Gel,” *gels*, vol. 8, no. 5, pp. 1–19, 2022.

[45] J. Junthip, N. Jumrernsuk, P. Klongklaw, W. Promma, and S. Sonsupap, “Removal of paraquat herbicide from water by textile coated with anionic cyclodextrin polymer,” *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–12, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[46] N. K. Hamadi, S. Swaminathan, and X. D. Chen, “Adsorption of Paraquat dichloride from aqueous solution by activated carbon derived from used tires,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 133–141, 2004.

[47] W. T. Tsai and H. R. Chen, “Adsorption kinetics of herbicide paraquat in aqueous solution onto a low-cost adsorbent, swine-manure-derived biochar,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 1349–1356, 2013.

[48] M. Králik, “Adsorption, chemisorption, and catalysis,” *Chem. Pap.*, vol. 68, no. 12, pp. 1625–1638, 2014.

[49] L. Xu *et al.*, “Pore structure and fractal characteristics of different shale lithofacies in the dalong formation in the western area of the lower yangtze platform,” *Minerals*, vol. 10, no. 1, 2020.

[50] Y. Li, X. Li, J. Li, and J. Yin, “Photocatalytic degradation of methyl orange by TiO_2-coated activated carbon and kinetic study,” *Water Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 1119–1126, 2006.

[51] M. Sasani Ghamsari and A. R. Bahramian, “High transparent sol-gel derived nanostructured TiO2 thin film,” *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 3, pp. 361–364, 2008.

[52] A. A. Moosa, A. M. Ridha, and N. A. Kadhim, “Use of Biocomposite Adsorbents for the Removal of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution,” *Am. J. Mater. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 135–146, 2016.

[53] J. P. Simonin, “On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics,” *Chem. Eng. J.*, vol. 300, pp. 254–263, 2016.

[54] G. Xue, H. Liu, Q. Chen, C. Hills, M. Tyrer, and F. Innocent, “Synergy between surface adsorption and photocatalysis during degradation of humic acid on TiO_2/activated carbon composites,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, no. 1, pp. 765–772, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[55] B. Xing *et al.*, “Preparation of TiO_2/Activated Carbon Composites for Photocatalytic Degradation of RhB under UV Light Irradiation,” *J. Nanomater.*, vol. vol.2016, pp. 1–10, 2016.

[56] X. Wang, K. Zhang, X. Guo, G. Shen, and J. Xiang, “Synthesis and characterization of N-doped TiO_2 loaded onto activated carbon fiber with enhanced visible-light photocatalytic activity,” *New J. Chem.*, vol. 38, no. 12, pp. 6139–6146, 2014.

[57] T. T. Lim, P. S. Yap, M. Srinivasan, and A. G. Fane, “TiO_2/AC composites for synergistic adsorption-photocatalysis processes: Present challenges and further developments for water treatment and reclamation,” *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 13, pp. 1173–1230, 2011.

[58] M. N. Rashed and A. A.El-Amin, “Photocatalytic degradation of methyl orange in aqueous TiO_2 under different solar irradiation sources,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 073–081, 2007.

[59] B. Dhandapani and S. T. Oyama, “Gas phase ozone decomposition catalysts ”, *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 11, pp. 129–166, 1997.

[60] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*. 2019.

[61] S. Solomon, “Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history,” *Rev. Geophys.*, vol. 37, no. 3, pp. 275–316, 1999.

[62] M. H. Florêncio, E. Pires, A. L. Castro, M. R. Nunes, C. Borges, and F. M. Costa, “Photodegradation of Diquat and Paraquat in aqueous solutions by titanium dioxide: Evolution of degradation reactions and characterisation of intermediates,” *Chemosphere*, vol. 55, no. 3, pp. 345–355, 2004.

[63] Shivaranjani S K and Karthikeyan S, “Solar and UV based Photo Degradation Studies on Paraquat using Homogeneous and Heterogeneous Photocatalyst,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 05, pp. 411–414, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[64] M. H. Razali, C. A. Ruslimie, and W. W. Khairul, “Modification and performances of TiO2 photocatalyst towards degradation of paraquat dichloride,” *J. Sustain. Sci. Manag.*, vol. 8, no. 2, pp. 244–253, 2013.

[65] L. J. Kusumawardani, Y. Syahputri, and A. Iryani, “Photocatalytic Degradation of Paraquat Dichloride using TiO_2-Fe Nano Powder under Visible and Sunlight Irradiation,” *J. Kim. Val.*, vol. 6, no. 1, pp. 55–61, 2020.

[66] S. Wongchareon and G. Panomsuwan, “Easy synthesis of TiO_2 hollow fibers using kapok as a biotemplate for photocatalytic degradation of the herbicide paraquat,” *Mater. Lett.*, vol. 228, pp. 482–485, 2018.

[67] I. C. M’Bra, G. P. Atheba, D. Robert, P. Drogui, and A. Trokourey, “Photocatalytic Degradation of Paraquat Herbicide Using a Fixed Bed Reactor Containing TiO_2 Nanoparticles Coated onto β-SiC Alveolar Foams,” *Am. J. Anal. Chem.*, vol. 10, no. 05, pp. 171–184, 2019.

[68] W. Rongchapo, O. Sophiphun, K. Rintramee, S. Prayoonpokarach, and J. Wittayakun, “Paraquat adsorption on porous materials synthesized from rice husk silica,” *Water Sci. Technol.*, vol. 68, no. 4, pp. 863–869, 2013.

[69] S. T. Hsu and T. C. Pan, “Adsorption of paraquat using methacrylic acid-modified rice husk,” *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 18, pp. 3617–3621, 2007.

[70] Y. Seki and K. Yurdakoç, “Paraquat adsorption onto clays and organoclays from aqueous solution,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 287, no. 1, pp. 1–5, 2005.

[71] N. Mueanpun, N. Srisuk, N. Chaiammart, and G. Panomsuwan, “Nanoporous activated carbons derived from water ferns as an adsorbent for removal of paraquat from contaminated water,” *Materialia*, vol. 15, no. December 2020, 2021.

[72] F. Suo *et al.*, “Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 121, pp. 806–813, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลจากการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC โดยไม่มีการเติมอากาศ มีการเติมอากาศและมีการเติมโอโซน

ตารางที่ ก.1 ผลการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC

ตัวอย่าง	การเติมแก๊ส	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ PQ (mg L^{-1})	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g L^{-1})	เวลาในการดูดซับ (h)	ร้อยละของการดูดซับ	เวลาในการสลาย (h)	ร้อยละของการสลาย PQ	ร้อยละการกำจัด PQ รวม
GAC	-	300	2.0	24	35.49	24	3.19	37.55
TiO_2/GAC 400°C	-	300	2.0	24	33.21	24	0.00	32.88
TiO_2/GAC 500°C	-	300	2.0	24	30.25	24	0.54	30.63
TiO_2/GAC 600°C	-	300	2.0	24	28.00	24	2.83	30.04
GAC	อากาศ	300	2.0	24	35.49	24	2.79	39.29
TiO_2/GAC 400°C	อากาศ	300	2.0	24	33.21	24	17.33	44.51
TiO_2/GAC 500°C	อากาศ	300	2.0	24	30.25	24	21.74	45.71
TiO_2/GAC 600°C	อากาศ	300	2.0	24	28.00	24	18.53	43.00
TiO_2/GAC 500°C	โอโซน	300	2.0	24	30.05	24	64.40	75.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

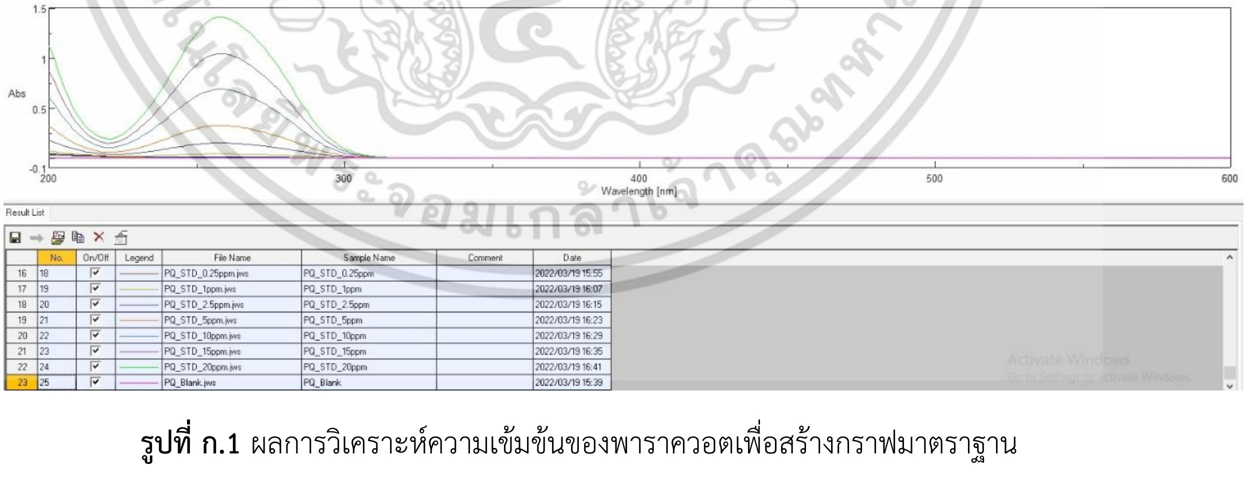
ตารางที่ ก.2 ผลการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500°C ภายใต้การเติมอากาศ

ลำดับ	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตร/นาที)	เวลาในการสลาย (ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดด้วยการดูดซับ	ร้อยละการกำจัดด้วยการสลาย	ร้อยละการกำจัดทั้งหมด	อัตราการสลาย ($mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$)
1	1.0	1.5	24	9.99	3.79	13.77	0.54
2	1.0	2.0	24	9.20	5.96	15.16	0.85
3	1.0	2.5	24	9.55	6.87	16.41	0.98
4	2.0	1.5	24	20.60	10.33	30.92	1.45
5	2.0	2.0	24	21.11	12.50	33.61	1.84
6	2.0	2.5	24	30.63	15.08	45.71	1.89
7	3.0	1.5	24	35.52	8.28	43.80	1.14
8	3.0	2.0	24	35.85	10.06	45.91	1.43
9	3.0	2.5	24	36.26	11.10	47.36	1.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

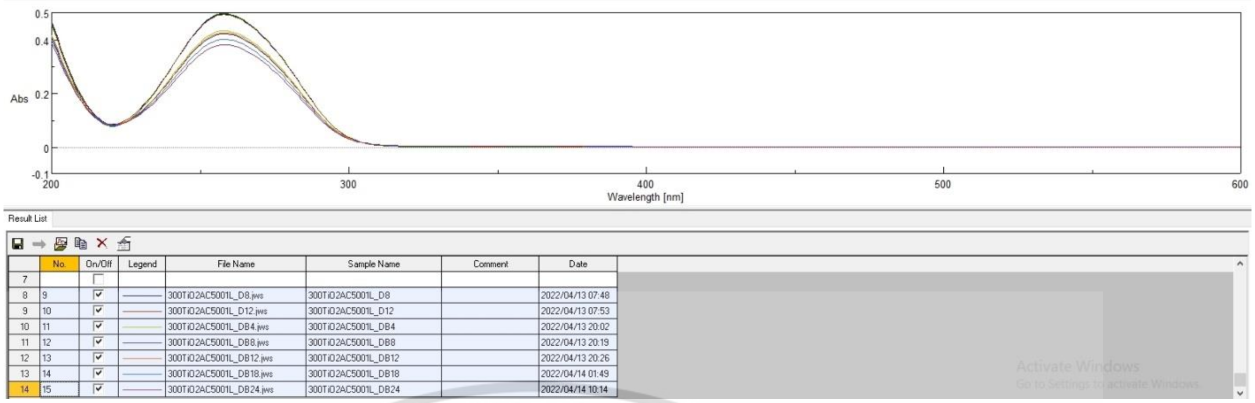
ตารางที่ ก.3 ผลการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500°C ภายใต้การเติมโอโซน

ลำดับ	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม/ลิตร)	อัตราการไหลของอากาศ (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)	เวลาในการสลาย (ชั่วโมง)	ร้อยละการกำจัดด้วยการดูดซับ	ร้อยละการกำจัดด้วยการสลาย	ร้อยละการกำจัดทั้งหมด	อัตราการสลาย ($mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$)
1	0.5	1061	24	1.03	17.77	18.80	2.64
2	0.5	1483	24	1.66	33.01	34.67	4.83
3	0.5	1905	24	6.15	40.55	46.70	6.35
4	1.0	1061	24	9.38	26.33	35.71	3.57
5	1.0	1483	24	11.36	41.28	52.64	5.74
6	1.0	1905	24	12.56	48.91	61.47	6.63
7	1.5	1061	24	13.57	22.94	36.51	3.41
8	1.5	1483	24	14.27	37.39	51.66	5.46
9	1.5	1905	24	15.22	44.63	59.85	6.36

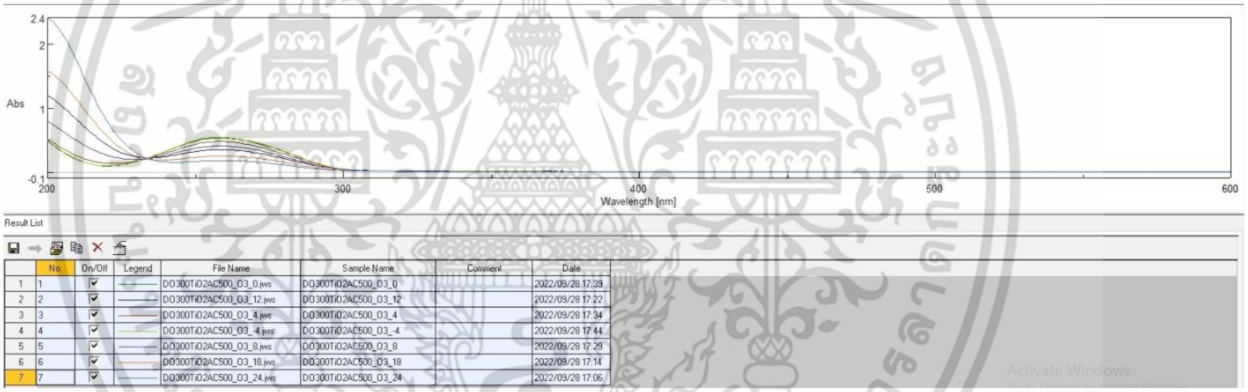


รูปที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของพาราควอตเพื่อสร้างกราฟมาตราฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

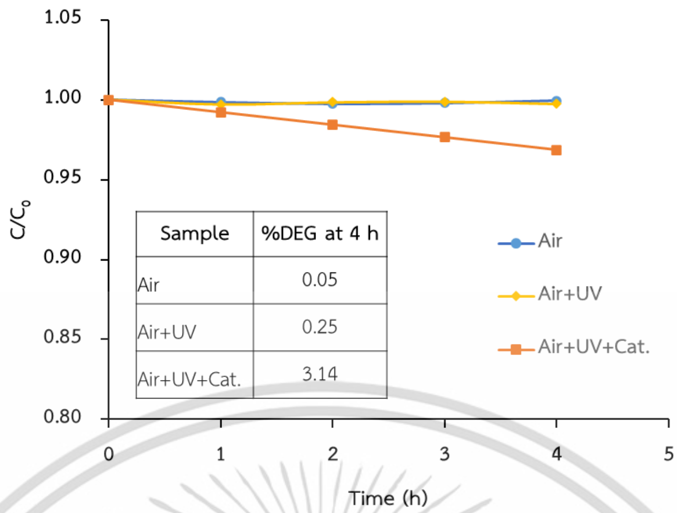


รูปที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของพาราควอตจากการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500°C และมีการเติมอากาศ ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร

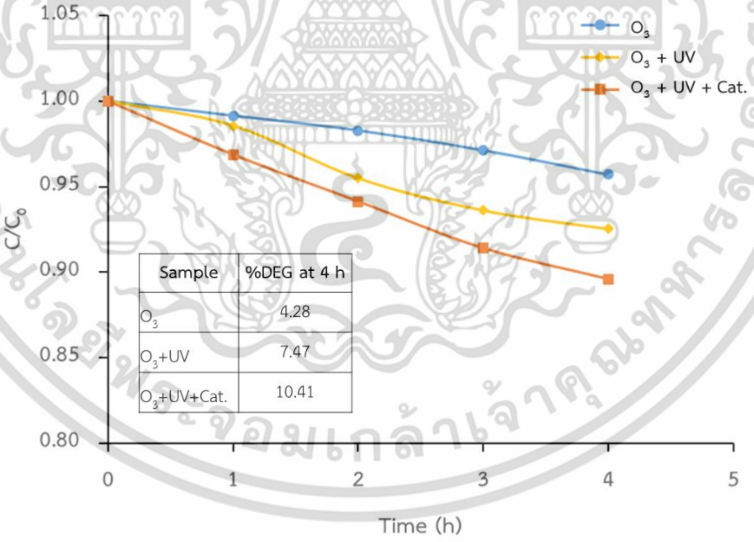


รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของพาราควอตจากการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500°C และมีการเติมโอโซน ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



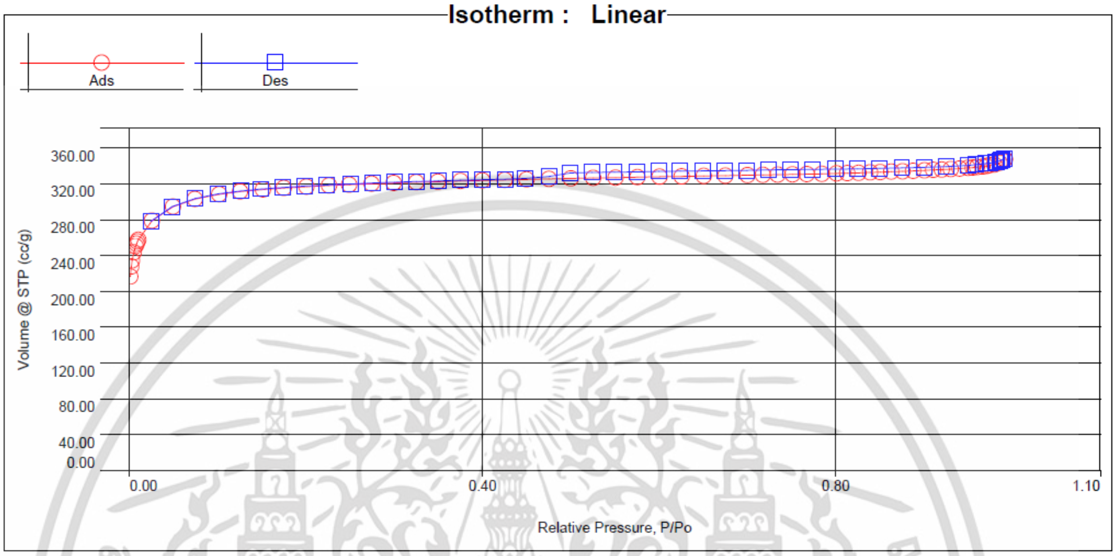
รูปที่ ก.4 กราฟแสดงความสามารถในการสลายพาราควอตในเวลา 4 ชั่วโมงสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยมีการเติมอากาศ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่เปิดหลอดยูวี เปิดหลอดยูวี และเปิดหลอดยูวีพร้อมกับมีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C



รูปที่ ก.5 กราฟแสดงความสามารถในการสลายพาราควอตในเวลา 4 ชั่วโมงสำหรับการทดลองการสลายพาราควอตด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยมีการเติมโอโซน ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างไม่เปิดหลอดยูวี เปิดหลอดยูวี และเปิดหลอดยูวีพร้อมกับมีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/GAC 500 °C

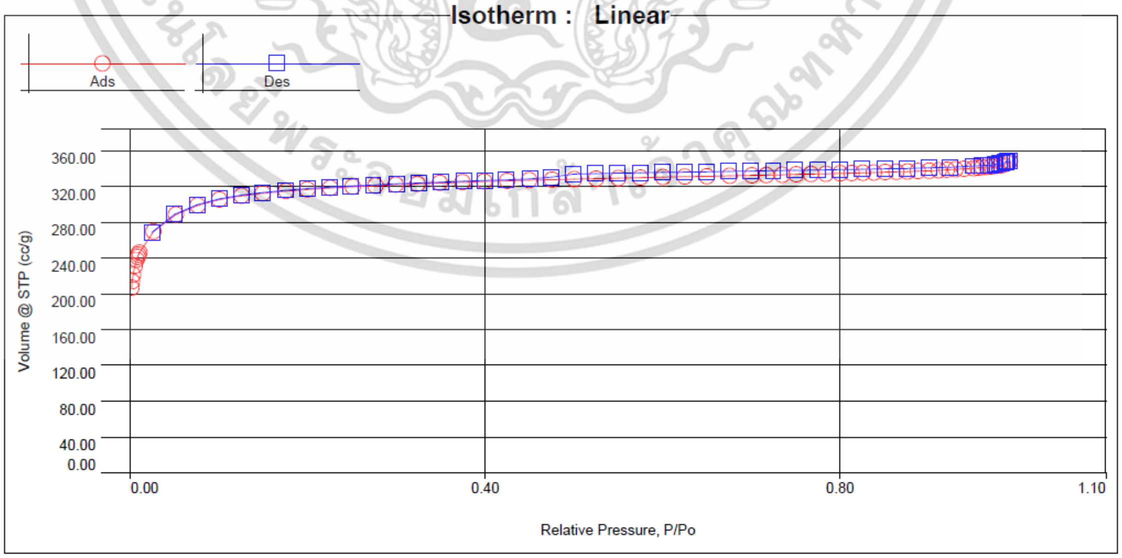
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis			**Report**		
Operator:	Nattaburut	**Date:**2022/04/22	**Operator:** Nattaburut		**Date:**2022/04/26
Sample ID:	2200047_AC	**Filename:**	2200047_AC.qps		
Sample Desc:		**Comment:**			
Sample Weight:	0.0797 g	**Instrument:**	Autosorb iQ Station 1		
Approx. Outgas Time:	7.4 hrs	**Final Outgas Temp.:**	300 °C	**Extended info:**	Available
Analysis gas:	Nitrogen	**Non-ideality:**	6.58e-05 1/Torr	**CellType:**	9mm
Analysis Time:	12:03 hr:min	**Bath temp.:**	77.35 K		
Analysis Mode:	Standard			**VoidVol Remeasure:**	off
VoidVol. Mode:	He Measure	**Cold Zone V:**	1.35229 cc	**Warm Zone V:**	7.26979 cc



รูปที่ ก.6 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของ GAC ด้วยเทคนิค BET

Analysis			**Report**		
Operator:	Nattaburut	**Date:**2022/04/22	**Operator:** Nattaburut		**Date:**2022/04/26
Sample ID:	2200048_TiO2_AC 400C	**Filename:**	2200048_TiO2_AC 400C.qps		
Sample Desc:		**Comment:**			
Sample Weight:	0.0823 g	**Instrument:**	Autosorb iQ Station 2		
Approx. Outgas Time:	7.4 hrs	**Final Outgas Temp.:**	300 °C	**Extended info:**	Available
Analysis gas:	Nitrogen	**Non-ideality:**	6.58e-05 1/Torr	**CellType:**	9mm
Analysis Time:	12:10 hr:min	**Bath temp.:**	77.35 K		
Analysis Mode:	Standard			**VoidVol Remeasure:**	off
VoidVol. Mode:	He Measure	**Cold Zone V:**	1.36243 cc	**Warm Zone V:**	8.67013 cc

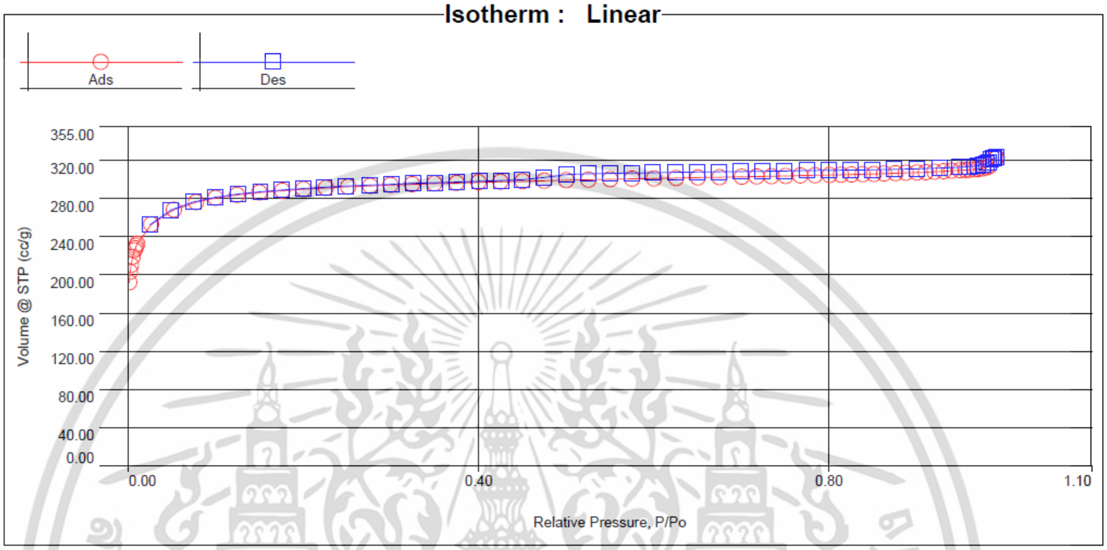


รูปที่ ก.7 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของ TiO_2/GAC 400 °C ด้วยเทคนิค BET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis
Operator: Nattaburut **Date:**2022/04/22
Sample ID: 2200049_TiO2_AC 500C
Sample Desc:
Sample Weight: 0.0917 g
Approx. Outgas Time:7.4 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 13:22 hr:min
Analysis Mode: Standard
VoidVol. Mode: He Measure

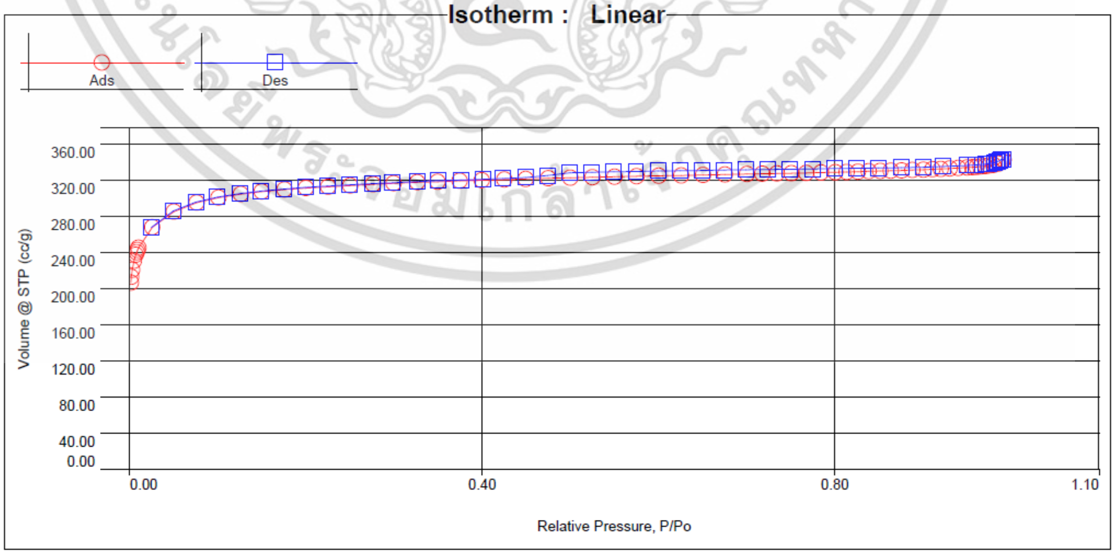
Report
Operator: Nattaburut **Date:**2022/04/26
Filename: 2200049_TiO2_AC 500C.qps
Comment:
Instrument: Autosorb iQ Station 3
Final Outgas Temp.: 300 °C
Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr
Bath temp.: 77.35 K
Cold Zone V: 1.27706 cc
Extended info: Available
CellType: 9mm
VoidVol Remeasure: off
Warm Zone V: 11.6069 cc



รูปที่ ก.8 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของ TiO_2/GAC 500 °C ด้วยเทคนิค BET

Analysis
Operator: Nattaburut **Date:**2022/04/26
Sample ID: 2200050_TiO2_AC 600C
Sample Desc:
Sample Weight: 0.0824 g
Approx. Outgas Time:7.4 hrs
Analysis gas: Nitrogen
Analysis Time: 11:43 hr:min
Analysis Mode: Standard
VoidVol. Mode: He Measure

Report
Operator: Nattaburut **Date:**2022/04/27
Filename: 2200045_TiO2_AC 600 .qps
Comment:
Instrument: Autosorb iQ Station 1
Final Outgas Temp.: 300 °C
Non-ideality: 6.58e-05 1/Torr
Bath temp.: 77.35 K
Cold Zone V: 1.28714 cc
Extended info: Available
CellType: 9mm
VoidVol Remeasure: off
Warm Zone V: 7.43457 cc

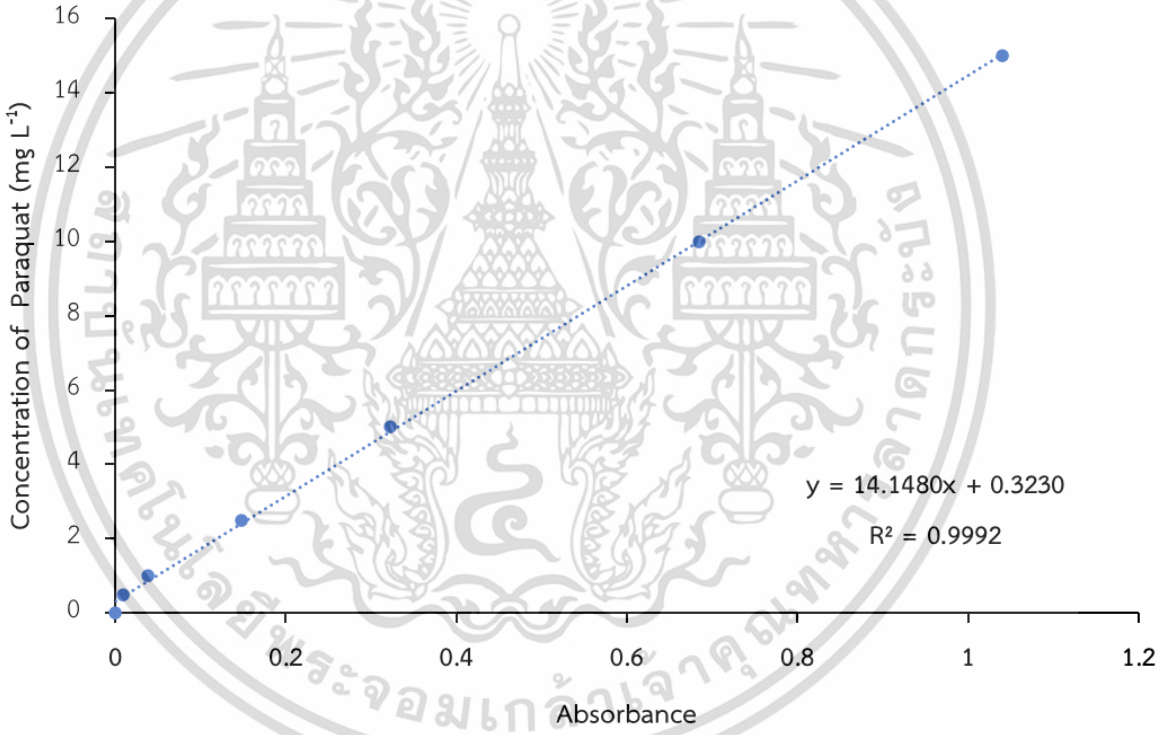


รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนของ TiO_2/GAC 600 °C ด้วยเทคนิค BET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายพาราควอต โดยการเตรียมสารละลายพาราควอตที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 2.5 5 10 และ 15 ppm แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร ซึ่งแสดงในรูปที่ ก.1 จากนั้นนำค่าการดูดกลื่นแสงที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายพาราควอต ซึ่งแสดงดังรูปที่ ข.1 โดยค่า X คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร และค่า Y คือ ความเข้มข้นของสารละลายพาราควอต



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของสารละลายพาราควอต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 การคำนวณค่าสารที่ใช้ในการการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ค่าดำเนินการในการเตรียม TiO_2/GAC 100 กรัม				
รายการ	**ราคาต่อหน่วย (บาท)**	**จำนวนที่ใช้**		**ราคา (บาท)**
Tetrabutylorthotitanate	6.72	170	g	1142.4
Ethanol	0.336	750	ml	252
Diethanoiamine	0.532	50	ml	26.6
น้ำกลั่น	0.01	10	mL	0.1
Granular Activated Carbon	0.165	100	g	16.5
รวมค่าสารทั้งหมด (บาท)				1437.6

ตารางที่ ข.2 การคำนวณค่าไฟที่ใช้ในการการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

รายการ	**กำลังไฟ (kw)**	**เวลา (hr)**	**หน่วยไฟตามเวลา**	**ค่าไฟตามเวลา (3 บาทต่อหน่วย)**
Hot plate	1.127	2	2.254	6.762
Oven	2.8	2	5.6	16.8
Furnace	4.4	2	8.8	26.4
รวมค่าไฟทั้งหมด (บาท)				49.962

ค่าดำเนินการในการเตรียม TiO_2/GAC 100 กรัม ด้วยกระบวนการโซล – เจล รวมทั้งสิ้นมีค่าเท่ากับ 1487.56 บาท ซึ่งคิดเป็นราคา 14.88 บาทต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล กรวิชญ์ มณียศ

วัน เดือน ปีเกิด 5 มกราคม 2539

ที่อยู่ 135 ซอย บางไผ่ 9/2 ตำบล บางไผ่ อำเภอ เมืองนนทบุรี จังหวัด นนทบุรี 11000

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา: 2557 แผนการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ โรงเรียนทิวไผ่งาม

ระดับปริญญาตรี: 2561 วิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ 2560 ฝึกงานที่บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) ตำแหน่ง Process Engineer ณ จังหวัดระยอง เป็นเวลา 2 เดือน

2565 นำเสนอผลงานทางวิชาการ ในหัวข้อ Adsorption of Paraquat at High Concentration in Synthetic Wastewater by Using TiO_2-Coated on Grain Activated Carbon from Coconut Shell ในงาน 19th ASIAN PACIFIC CONFEDERATION OF CHEMICAL ENGINEERING CONGRESS (APCChE) CONFERENCE 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้