

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารโดยกระบวนการ
โฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
WASTE WATER TREATMENT FOR FOOD INDUSTRY BY
PHOTOCATALYSIS OXIDATION USING TITANIUM DIOXIDE
AS CATALYST

นางสาว ปาจารีย์ โชนะมี
นางสาว ศิริพร คุณธนา
นางสาว สุกานันท์ รบว่อง

โครงการพิเศษที่สนับสนุนการศึกษาด้านเทคโนโลยีชีวภาพ
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๕๐

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารโดยกระบวนการ
โฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
WASTE WATER TREATMENT FOR FOOD INDUSTRY BY
PHOTOCATALYSIS OXIDATION USING TITANIUM DIOXIDE
AS CATALYST

นางสาว ปาจารย์ โสมะมี
นางสาว ศิริอร กุยะนา
นางสาว สุชานันท์ รบว่อง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**WASTE WATER TREATMENT FOR FOOD INDUSTRY BY
PHOTOCATALYSIS OXIDATION USING TITANIUM DIOXIDE
AS CATALYST**

MISS PAJAREE SOMAMEE





MISS SIRION KOOYANA

MISS SUCHANAN ROBWONG

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Waste Water Treatment for Food Industry by Photocatalysis Oxidation using Titanium Dioxide as Catalyst
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ปาจารย์ โสมะมี นางสาว ศิริอร คุยะนา นางสาว สุชานันท์ รว่อง
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ปัทมา ลีพหาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ. กตินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ดร. ชวาลย์ ศรีวงษ์	
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ	
อ. ปัทมา ลีพหาวงศ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชันที่มีไทเทเนียม ไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ปาจารย์ โสมะมี นางสาว ศิริอร คุยะนา นางสาว สุชานันท์ รวบ่วง
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ปัทมา ติพหาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัด โดยใช้ค่าซีโอดี (COD) และทีโอซี (TOC) เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการบำบัด และศึกษาหาช่วงพีเอชที่เหมาะสม ตลอดจนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และระยะเวลาสัมผัสที่จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ซึ่งจากการศึกษาพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ช่วงพีเอชที่ต่างกัน คือ ช่วง 1 ถึง 2 ซึ่งอยู่ในสภาวะกรด ช่วง 6.5 ถึง 7.5 ซึ่งอยู่ในสภาวะกลางและช่วง 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะเบสโดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกันคือ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร รวมกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยแต่ละชุดใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเก็บน้ำเสียทุก ๆ 1 ชั่วโมง ซึ่งจะเริ่มเก็บที่ ชั่วโมงที่ 7 เพื่อนำไปวิเคราะห์ พบว่า การบำบัดน้ำเสียในสภาวะเบส (ช่วงพีเอชที่ 13 ถึง 14) นั้นเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ระยะเวลา 9 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยมีร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีและทีโอซีสูงสุด คือ ร้อยละ 79.69 และ 94.23 ตามลำดับ และเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสภาวะเบส พบว่า ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยมีร้อยละการลดลงของค่าซีโอดีและทีโอซีสูงสุด คือ ร้อยละ 96.52 และ 99.66 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชัน , ไทเทเนียมไดออกไซด์ , ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Title	Waste Water Treatment for Food Industry by Photocatalytic Oxidation using Titanium Dioxide as Catalyst
Students	Miss Pajaree Somamee Miss Sirion Kooyana Miss Suchanan Robwong
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Patama Leerahawong
Co-Advisor	Dr.Samart Kongtaweled

ABSTRACT

This study aims to study the possibility of waste water treatment from food industry by photocatalytic process using Titanium Dioxide (TiO_2) and Titanium Dioxide combine with Hydrogen Peroxide (H_2O_2) as catalyst. COD and TOC were measured to indicate efficiency of the treatment process. Moreover, the suitable pH along with TiO_2 and H_2O_2 concentration and process period were analyzed. The results indicated that at pH 13-14 with TiO_2 4 g/L, 9 hrs of treatment period was the highest efficiency which COD and TOC reduction percentages were 79.69% and 94.23%, respectively. In addition, at the same pH with TiO_2 4 g/L combined with H_2O_2 5 mm.mole/L 7 hrs of treatment period show higher efficiency which COD and TOC reduction percentages were 96.52% and 99.66%, respectively.

Key words: Photocatalytic Oxidation, Titanium Dioxide, Hydrogen Peroxide

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ปัทมา ลีพิทวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาและติดตาม
โครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ที่คอยให้คำปรึกษาคำแนะนำ และข้อเสนอแนะ รวมทั้ง
ให้ความอนุเคราะห์ในการนำสารเคมีมาใช้ในการทดลองจนทำให้โครงการพิเศษ สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ คณะกรรมการคุมสอบ
โครงการพิเศษ ที่ได้ช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้โครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการที่คอยให้คำแนะนำและความรู้
เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลที่โอชีรวมทั้งขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาคเคมีทุกท่าน
ที่ให้ความรู้และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้สารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ บริษัท เครือเจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) หรือ ซีพีเอฟ ที่ให้ความ
อนุเคราะห์น้ำเสีย ไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกด้านจนทำให้โครงการ
พิเศษเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

และขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่สำคัญในการทำโครงการ
พิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ปจารีย์ โสมะมี

ศิริอร กุยะนา

สุชานันท์ รบว่อง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	X
คำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส	4
2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)	4
2.1.2 พลังงานแสง	5
2.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส	8
2.3 ชนิดของตัวแคตาไลสต์	9
2.4 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO ₂)	12
2.5 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/TiO ₂ /H ₂ O ₂)	14
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส	15
2.6.1 ชนิดของสารมลพิษ (Type of Pollutants)	15
2.6.2 พีเอช (pH)	15
2.6.3 ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2.6.4 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.5 ความเข้มแสง (Light intensity)	17
2.6.6 อุณหภูมิ (Temperature)	18
2.6.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved, DO)	18
2.6.8 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	18
2.7 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์	19
2.7.1 รูปผลึกของสารไทเทเนียมไดออกไซด์	21
2.7.2 สมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของไทเทเนียมไดออกไซด์	22
2.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	22
2.9 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดมลพิษ	23
2.10 สารอินทรีย์ในน้ำเสีย	25
2.10.1 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ	26
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30
3.3 วิธีการทดลอง	33
3.3.1 การหาช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์	33
3.3.2 การหาความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	33
3.3.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์	34
3.3.4 การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมทำงานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.5 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	36
4.2 การศึกษาความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	42
4.3 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	44
4.4 การศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่ทำปฏิกิริยา ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์	45
4.5 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	48
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	58
ภาคผนวก ค	68
ภาคผนวก ง	72
ภาคผนวก จ	81
ภาคผนวก ฉ	83
ภาคผนวก ช	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	6
2.2 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ	10
2.3 ส่วนสมบัติกายภาพและเชิงกลของ TiO_2	20
2.4 คุณสมบัติของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	23
2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดมลพิษ	24
2.6 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส	25
ก-1 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	56
ก-2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารที่ยังไม่ผ่านการบำบัด	57
ข-1 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	59
ข-2 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	59
ข-3 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 - 14	60
ข-4 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	60
ข-5 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	61
ข-6 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 - 14	61
ข-7 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	62
ข-8 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	62
ข-9 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 - 14	63
ข-10 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-11 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	64
ข-12 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 - 14	64
ข-13 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	65
ข-14 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	65
ข-15 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 – 14	66
ข-16 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 – 2	66
ข-17 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 – 7.5	67
ข-18 ค่าพีเอชของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 - 14	67
ค-1 ปริมาณของตัวอย่างน้ำและ Reagent ต่างๆในหลอดย่อยสลาย	71
ง-1 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 1-2	73
ง-2 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 6.5-7.5	74
ง-3 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13-14	75
ง-4 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 1-2	76
ง-5 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 6.5-7.5	77
ง-6 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13-14	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-7 ค่าซีไอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13-14	79
ง-8 ค่าซีไอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13-14	80
ฉ-1 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 1-2	85
ฉ-2 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 6.5-7.5	86
ฉ-3 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13-14	87
ฉ-4 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 1-2	88
ฉ-5 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 6.5-7.5	89
ฉ-6 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13-14	90
ฉ-7 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13-14	91
ฉ-8 ค่าทีไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13-14	92

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์	4
2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็ก	7
2.3 องค์ประกอบหลักของยูวี	7
2.4 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	11
2.5 ผังแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พร้อมความสามารถการรีดออกซ์	12
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	14
2.7 แสดงลักษณะของรูปผลึกของ รูไทล์ และ อนาเทส	21
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	37
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 5 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	37
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 6 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	39
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	39
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 5 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	40
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 6 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด	41
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่างๆ กับระยะเวลาการบำบัด	42
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่างๆ กับระยะเวลาการบำบัด	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	44
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	45
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	46
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	47
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร กับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	48
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร กับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14	49
ก-1 ลักษณะสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารที่ยังไม่ผ่านการบำบัด	57
ก-2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์	57
ฉ-1 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมพทาเลตที่ใช้ในการทำกราฟมาตรฐานทีไอซี	84
ฉ-2 กราฟมาตรฐานสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร่วมกับโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการทำกราฟมาตรฐานทีไอซี	84

คำย่อและสัญลักษณ์

E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
h	คือ	ค่าคงที่พลังค์ (Planck 's Constant)
ν	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที ⁻¹
	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง
h^+	คือ	โฮลที่วาเลนส์แบนด์ (Positive Hole)
e^-	คือ	อิเล็กตรอน (Negative Electron)
OH^-	คือ	ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion)
OH°	คือ	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)
H_2O	คือ	โมเลกุลของน้ำ
H^+	คือ	ไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen Ion)
O_2	คือ	โมเลกุลของออกซิเจนในอากาศ
$O_2^{\circ-}$	คือ	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)
OH_2°	คือ	เปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)
H_2O_2	คือ	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide)
H°	คือ	ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)
$^\circ C$	คือ	องศาเซลเซียส
pK_a	คือ	ค่าคงที่การแตกตัว (Dissociation Constant)
eV	คือ	หน่วยวัดพลังงาน โดยที่ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} จูล (J)
r_1, r_2, r_3	คือ	การทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
ml	คือ	หน่วยวัดปริมาตร มิลลิลิตร
mm	คือ	หน่วยวัดความยาว มิลลิเมตร
Conc.	คือ	ความเข้มข้น
mg/L	คือ	หน่วยวัดความเข้มข้น มิลลิกรัมต่อลิตร
SD	คือ	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (The Sample Standard Deviation)
SD/\sqrt{n}	คือ	ระดับความเชื่อมั่น (Level of Confidence)
n	คือ	จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง
ม.ป.ป	คือ	ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตอาหารมีการเติบโตขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร (สถาบันการวิจัยประชากรและสังคม 2555) ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตอาหารมีการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เพียงพอต่อการอุปโภคบริโภคของประชากร จึงมีการนำน้ำในปริมาณมากมาใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมการผลิตอาหารและส่งผลให้น้ำทิ้งของอุตสาหกรรมอาหารนั้นมีปริมาณสารปนเปื้อนและสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ในน้ำเสียมาก ส่วนใหญ่จะเป็นประเภทสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งหากไม่มีการบำบัดน้ำเสีย ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะแล้วจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศวิทยาและเกิดเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจะบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic) และใช้อากาศ (Aerobic) (มันสิน, 2542) ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายภายในระบบการบำบัดที่สูง

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ จึงได้ทดลองนำกระบวนการทางเคมี คือ กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชัน (Photocatalysis Oxidation Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet Light, UV) ในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นกลุ่มของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อุษาพร, 2545) เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เสถียรภาพ ราคาไม่แพง และไม่เป็นพิษ ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Karunakaran, *et al.*, 2005; Muruganandham, *et al.*, 2005)

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีพลังงานแบนด์แก๊ป (Band Gap Energy) อยู่ที่ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ (Electron Volt; eV) ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกมีช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณน้อยมาก คือ ร้อยละ 3 ถึง 5 (ฉลาด และชูสิทธิ์, 2548) ทำให้มีการศึกษาวิจัยจำนวนมากเพื่อพัฒนาและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตดังกล่าวซึ่งได้สอดคล้องกับ

การศึกษาในครั้งนี้ โดยการศึกษาจะศึกษาถึงค่าพีเอช (pH value) ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ และระยะเวลาที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารที่มีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ นอกจากนี้ในการทดลองยังได้มีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้น ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรง (strong oxidant) เมื่อเกิดปฏิกิริยา H_2O_2 จะแตกตัวให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH) ซึ่ง OH นี้สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ (Free Radical, RH) โดยมีหรือไม่มีโฟตอนกลายเป็นอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (R) ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาสูงและสามารถออกซิไดส์ต่อไปได้ (ศิริวิทย์, 2544) เช่นเดียวกับ Muruganandham and Swaminathan (2004) ที่กล่าวว่า การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้เกิด OH และ O_2 ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้นอีกทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถลดการเกิดรีคอมบินันซ์ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($UV/TiO_2/H_2O_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารระหว่างการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO_2) และการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($UV/TiO_2/H_2O_2$) ที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยา

1.2.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($UV/TiO_2/H_2O_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตอาหารสำเร็จรูป ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท ซีพีเอฟ ผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด โดยเก็บแบบบัง่วง (grabsampling)

1.3.2 งานวิจัยครั้งนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการฉายแสงยูวีด้วยหลอดยูวีที่มีกำลังไฟ 8 วัตต์ จำนวน 7 หลอด

1.3.3 ศึกษาค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยทำการศึกษา 3 ช่วงพีเอช คือ 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด กลาง และเบสตามลำดับ

1.3.4 ศึกษาความปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยศึกษาที่ 4 ความเข้มข้น คือ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

1.3.5 ศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยศึกษาที่ 4 ความเข้มข้น คือ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร ตามลำดับ

1.3.6 ศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยการวัดค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ว่าคงที่หรือหมดไปด้วยพารามิเตอร์ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียหรือ ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดหรือทีโอซี (Total Organic Carbon, TOC)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่

1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO₂) และไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/TiO₂/H₂O₂) เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกลงทุนให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4.3 เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานในอนาคตให้ดียิ่งขึ้น

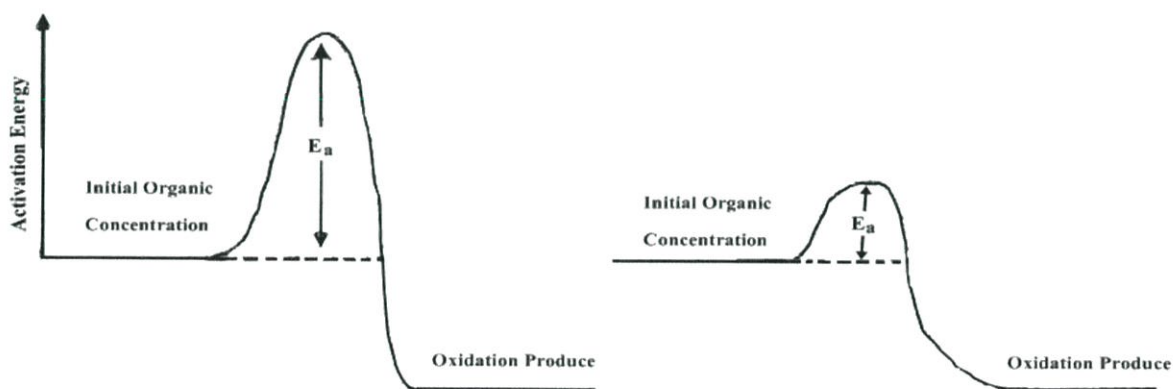
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

2.1.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันในสารละลาย คือ เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e^-) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) แล้วได้รับพลังงานแสง ซึ่งจะต้องมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในขณะเดียวกันที่วาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (hole, h^+) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลสามารถที่จะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้อีกเรียกว่าการเกิดรีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันและที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลวอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่งคือวาเลนซ์แบนด์ซึ่งมีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสถานะปกติซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี



ก.สารอินทรีย์ที่ไม่มีแคตาลิสต์

ข.สารอินทรีย์ที่มีแคตาลิสต์

รูปที่ 2.1 พลังงานของการเกิดออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (ฉลาดและชูสิทธิ์, 2548)

หลักในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสมีองค์ประกอบคือ

- แคตาลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
- พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงาน โฟตอนของตัวแคตาลิสต์ที่ใช้
- น้ำ
- ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนซ์ (Oxidants) อื่นๆ

2.1.2 พลังงานแสง

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นเป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) มากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ซึ่งพลังงานดังกล่าวนี้ เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	E	คือ พลังงานควอนตัม (Quantum Energy) , จูล
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} ,จูล-วินาที
	v	คือ ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ วินาที ⁻¹
	γ	คือ ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
	c	คือ ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 เมตร/วินาที

ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ คือรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 ถึง 400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว รังสีอัลตราไวโอเล็ตแบ่งได้เป็น UV-A UV-B และ UV-C ความยาวช่วงต่างๆของรังสีอัลตราไวโอเล็ต แสดงดังตารางที่ 2.1

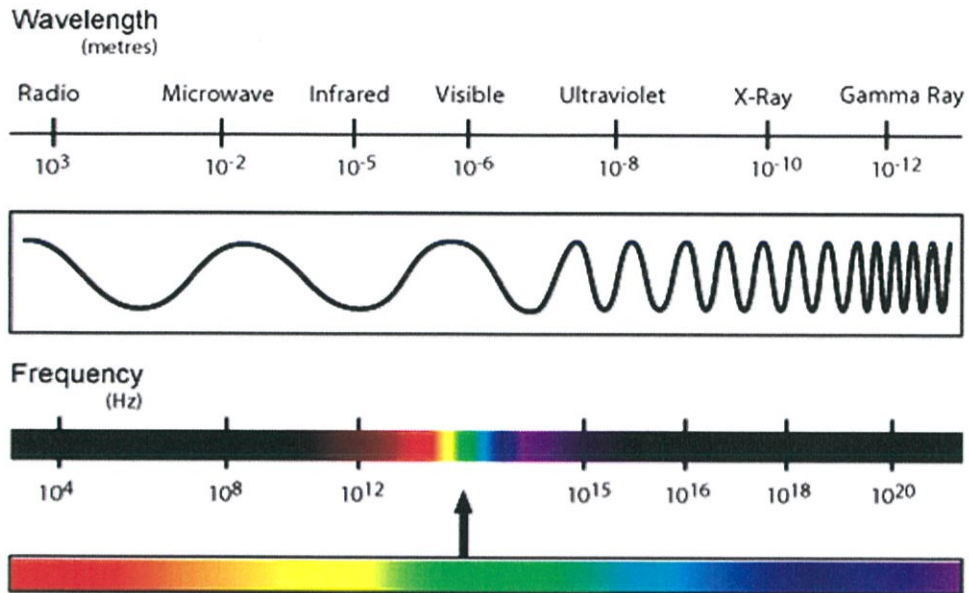
ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ประเภทรังสี	ความยาวคลื่น (nm)
UV A, long wave	400-315
UV B, medium wave	315-280
UV C, short wave	280-100
Far or vacuum UV	200-10
Extreme or deep UV	120-10

ที่มา : Tobiska and Nusinov , 2004.

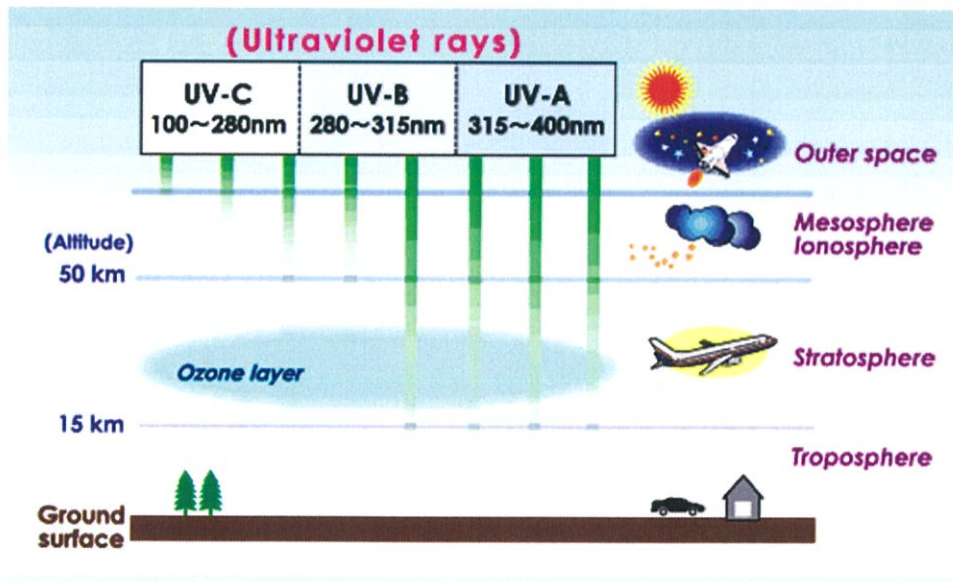
รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและพลังงาน โดยพลังงานแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง ภาพที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

THE ELECTRO MAGNETIC SPECTRUM



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีคลื่นแม่เหล็ก

ที่มา : <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-060.html>. 29 พฤศจิกายน 2556



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ที่มา : <http://www.myfirstbrain.com>. 29 พฤศจิกายน 2556

แสงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่ส่องลงมายังพื้นผิวโลกจะถูกทำให้ลดลงอย่างมากในชั้นบรรยากาศจากการดูดกลืนและการกระเจิงของแสง ที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ความเร็วของแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการดูดกลืนโดยโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 นาโนเมตร มีรังสีที่แผ่มาถึงพื้นโลกน้อย ส่งผลให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ส่องมายังพื้นโลกจึงมีขีดจำกัด

ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแคตาไลสต์นั้นเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีพลังงานแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังนั้นการให้พลังงานกับระบบจึงต้องให้พลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ป ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสจึงจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร จะให้ค่าพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานแบนด์แก๊ปของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เนื่องจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลกมีช่วงแสงที่เป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีปริมาณร้อยละ 3 ถึง 5 เท่านั้น ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้หลอดไฟยูวีในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

2.2 ชนิดของโฟโตแคตาไลซิส

โฟโตแคตาไลซิส สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวแคตาไลสต์ดังนี้

2.2.1 โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้แคตาไลสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2, 4- Dinitrotoluene โดยใช้ UV/H₂O₂

2.2.2 โฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวแคตาไลสต์ ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องกำจัด เช่น การย่อยสลาย 2 - Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO₂

สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิดหนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นิยมใช้ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง (ทนทานต่อการกัดกร่อน) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำหลายๆชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส พบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ

แขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเลต ($\lambda \leq 400$ นาโนเมตร) ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีรังสีอัลตราไวโอเลตน้อยกว่าร้อยละ 1 ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดยูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง

2.3 ชนิดของตัวแคตาลิสต์

สารที่ใช้เป็นตัวแคตาลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้แก่

2.3.1 โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โคบอลต์ นิกเกิล เป็นต้น

2.3.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

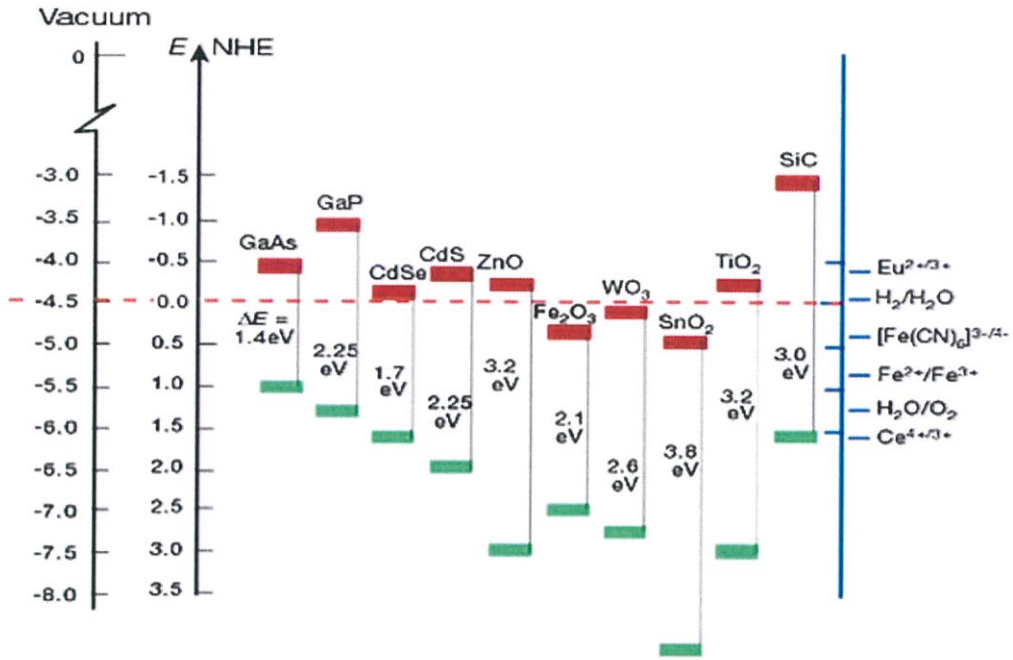
องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกันแต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกัน โดยเกิดเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า แบนด์แก๊ป (Band Gap)

ตารางที่ 2.2 การเลือกสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

วัสดุ	แถบพลังงาน (eV)	จำนวนช่วงความยาวคลื่นที่มีผลต่ำแถบพลังงาน (nm)
BaTiO ₃	3.3	375
CdO	2.1	590
CdS	2.5	497
CdSe	1.7	730
Fe ₂ O ₃	2.2	565
GaAs	1.4	887
GaP	2.3	540
SnO ₂	3.9	318
SrTiO ₃	3.4	365
TiO ₂	3.2	390
WO ₃	2.8	443
ZnO	3.2	390
ZnS	3.7	336

ที่มา : Galvez and Malato, 2001.

ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโดยสารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะมีช่วงของพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 2.4

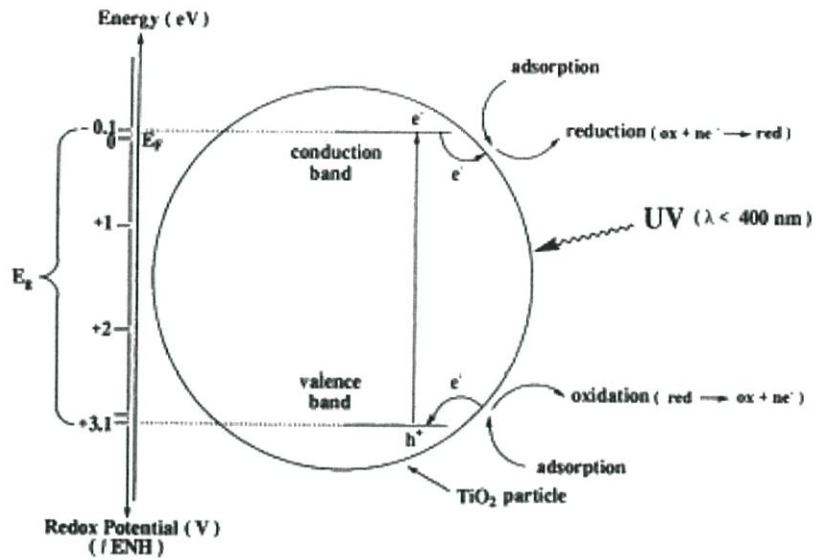


รูปที่ 2.4 ค่าพลังงานที่ขอบบนล่างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

ที่มา : Benedix, et al. (2000)

ความสามารถของสารกึ่งตัวนำภายใต้การก่อให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากการดูดซับของอนุภาคที่ถูกควบคุมโดยตำแหน่งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและความสามารถของปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox potentials) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ระดับศักยภาพของสารตัวรับอิเล็กตรอนต้องการจากตำแหน่งของแถบวาเลนซ์ที่ต้องให้อิเล็กตรอนกับโฮลที่ว่างอยู่ขอบของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำหลากหลายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสงด้วยโฟตอนที่เท่ากับหรือมากกว่าแถบพลังงาน ($h\nu$ มากกว่า E) โดยพลังงานที่ดูดซับทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e^-h^+) ให้อิเล็กตรอนอิสระที่แถบตัวนำและเกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Herrmann, 1999)

สารกึ่งตัวนำที่ใช้บำบัดน้ำไปสู่การใช้เป็นอิเล็กโทรด (แอโนด) ในรูปของ Ti(III)/Ti(IV)-Nb(V)/Nb(IV) ผสมกับออกไซด์ของโลหะเคลือบด้วยไทเทเนียมที่เป็นแท่งหรือแผ่น สารกึ่งตัวนำแอโนดคู่กับคาร์บอนเคลือบแคโทดในเซลล์อิเล็กโทรเคมีในระบบอิเล็กโทรไลซิสให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ขั้วแอโนดและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วแคโทดจากออกซิเจนรีดักชันไฮดรอกซิลเรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันในการย่อยสลายมลสารในสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

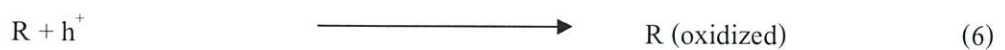


รูปที่ 2.5 พังแถบพลังงานของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พร้อมความสามารถการรีดอกซ์

ที่มา : Herrmann (1999)

2.4 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/ TiO_2)

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (Al-Ekabi, *et al.*, 1991)



- เมื่อ $h\nu$ = อนุภาคของแสง (photon)
- h^+ = หลุมประจุบวกที่แถบวาเลนซ์
- e^- = อิเล็กตรอนที่แถบตัวนำ
- OH^\cdot = ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)
- O_2^\cdot = ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide ion radicals)
- R = โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic molecule)

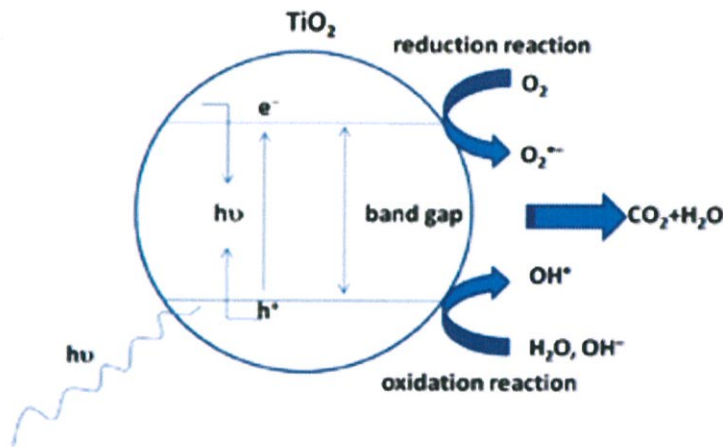
เมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงยูวีที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แก๊ป (~3.2 eV) ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบความนำเกิดเป็น e^- และ h^+ อิเล็กตรอนที่แถบความนำ (e^-) ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลออกซิเจนที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนเป็นซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Saquib, *et al.*, 2008) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายโดยตรงหรือไฮดรอกซิลไอออนทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล และยังทำให้โมเลกุลของน้ำที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่มีอำนาจออกซิเดชันสูงมีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงและทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดติดผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังสมการ



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e^- ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลตามสมการ



ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์
ที่มา : สิริชัย (2543)

2.5 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/TiO₂/H₂O₂)

กระบวนการนี้เป็นการนำกระบวนการ UV/H₂O₂ และ UV/TiO₂ มารวมกัน จึงมีแหล่งที่ทำให้เกิด OH[•] อยู่ 2 แห่ง ได้แก่ H₂O₂ และ TiO₂ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (Tang and An, 1995)



โดยกระบวนการการบำบัดโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเห็นได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้เกิด OH[•] และ O₂ ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น อีกทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถลดการเกิดรีคอมบินชันได้อีกด้วย (Muraganandham and Swaminathan, 2004)

Kawaguchi และ Matthews สรุปว่าการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ นั้นตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิด คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลกับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้น ในโฟโตแคตาไลซิสมีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่างๆดังต่อไปนี้

- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวแคตาไลสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวแคตาไลสต์
- ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิวแต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวแคตาไลสต์

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

2.6.1 ชนิดของสารมลพิษ (Type of Pollutants)

สารพิษแต่ละชนิดมีศักยภาพในการถูกทำให้สลายตัวแตกต่างกันดังนั้นในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการศึกษากระบวนการออกซิเดชันโดยวิธีกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสารมลพิษต่างๆในน้ำเสียจากการศึกษาของ

Dababrata Chatterjee (2543) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ 3 ชนิดคือ Phenol Chlorophenol และ Trichloroethylene โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยกระบวนการนี้ได้ง่ายที่สุดเรียง ตามลำดับดังนี้ Trichloroethylene ร้อยละ 97 Chlorophenol ร้อยละ 74 และ Phenol ร้อยละ 68

Prairie, et al. (2537) ได้ทำการทดลองการกำจัดโลหะหนัก 6 ชนิดได้แก่เงิน (Ag) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu)ปรอท (Hg) นิกเกิล (Ni) และแพลทินัม (Pt) พบว่ากระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดปรอทและเงินได้แต่ทองแดง นิกเกิลและแคดเมียมต้องใช้กระบวนการที่ย่างยากมากขึ้น

2.6.2 พีเอช (pH)

จากการศึกษาถึงการลดของพีเอชในปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสสามารถอธิบายสาเหตุของปรากฏการณ์นี้ได้ 3 ประการคือ

2.6.2.1 การเกิดไฮดรอกไซด์ไอออนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล

2.6.2.2 ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส

2.6.2.3 ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันกับสารประกอบบางชนิดก็มีผลน้อยมาก

Tanaka and Saha (2537) พบว่าการย่อยสลาย 2,4,6-Trichlorophenol ที่สภาวะต่างมีประสิทธิภาพดีกว่าที่สภาวะกรดซึ่งดูได้จากการเพิ่มของพีเอชจาก 3.6-6.8 ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นแม้การดูดติดของ 2,4,6-Trichlorophenol บนไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดติดได้ดีที่พีเอชต่ำและดูดติดได้น้อยที่พีเอชสูงแต่การดูดติดไม่มีผลต่อการเกิดโฟโตแคตาไลซิสอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะต่างเพราะว่าเป็นการเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออนและเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ ที่พีเอชน้อยกว่า 3 กระบวนการออกซิเดชันเกิดจากโฮลเป็นส่วนใหญ่แต่พีเอชมากกว่า 3 กระบวนการออกซิเดชันเกิดจากไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้ามการย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยวิธีแคตาไลซิสที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพดีกว่าที่พีเอช 11 ถึง 3 เท่าโดยใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงโดยใช้ CdS เป็นตัวแคตาไลสต์การย่อยสลายทางชีวภาพจำพวก Malacite Green, Crystal Violet, Methylorange โดยใช้วิธีโฟโตแคตาไลซิสมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาได้เร็วที่พีเอช 4.5 ถึง 5.5 การบำบัดสารละลายฟีนอลโดยโฟโตแคตาไลซิสเกิดได้ดีที่สภาวะกรดอนอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการดูดติดของสารต่างๆบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการดูดติดที่ผิวนี้เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสปัจจัยหลักที่ได้รับอิทธิพลของพีเอชซึ่งส่งผลต่อการดูดติดบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มี 2 ประการคือ

1) ค่าคงที่การแตกตัว (Dissociation Constant, pK_a) กล่าวคือพีเอชมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ เช่นในกรณีของ Tanaka and Saha ได้ทำการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสของ 2,4,6-Trichlorophenol พบว่าค่า pK_a ของ 2,4,6-Trichlorophenol เท่ากับ 0.6 ที่พีเอชต่ำ (พีเอช < 6) 2,4,6-Trichlorophenol ที่อยู่ในรูปไอออนจะมีมากกว่ารูปที่ไม่แตกตัว ดังนั้นการแตกตัวอยู่ในรูปต่างๆจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดติดแตกต่างกัน

2) จุดสมมูลประจุ (Isoelectric Point, i.e.p) เนื่องจากที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติที่จะเปลี่ยนประจุลบหรือบวกก็ได้ (Amphoteric Sites) ขึ้นอยู่กับสภาพพีเอชของสารละลายปฏิกิริยาสมมูลกรด-เบสที่ผิวของไทเทเนียมแสดงได้ ดังสมการที่ (14) และ (15)



2.6.3 ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

หน้าที่ของไทเทเนียมไดออกไซด์นอกจากจะทำหน้าที่เป็นตัวแคตาไลสต์แล้วยังทำหน้าที่เป็นสารดูดติดที่ผิวอริบายได้จาก L-H อัตราการดูดติดของสารขึ้นอยู่กับของพื้นที่ผิวตัวแคตาไลสต์ปริมาณและขนาดของตัวแคตาไลสต์ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสส่วนมากเกิดที่ผิวของตัวแคตาไลสต์ (สิริชัย, 2543)

Lakshmi, *et al.* (1995) ทำการย่อยสลายเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส พบว่าอัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะเป็นการเพิ่มจำนวนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของสีย้อมที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Muruganandham *et al.* (2006) รายงานเพิ่มอีกว่ายังเนื่องมาจากการเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคในพื้นที่ของการฉายแสงแต่ วุทธินันท์ (2544) พบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลงเนื่องจากอนุภาคที่มากเกินไปของไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องลงไป สารละลายทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลง

2.6.4 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Behnajady, *et al.* (2004) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เนื่องจาก OH^\cdot จำนวนมากเข้าทำลาย aromatic ring อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ Muruganandham and Swaminathan (2004) และ Aleboye, *et al.* (2005) ที่รายงานว่า การที่การย่อยสลายสีและการย่อยสลายสูงขึ้น โดยการเติม H_2O_2 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ OH^\cdot แต่เปอร์เซ็นต์การบำบัดจะเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่าหนึ่งจากนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นอีกเปอร์เซ็นต์การบำบัดจะลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับ OH^\cdot ต่อไปก่อให้เกิดเป็นน้ำและออกซิเจนทำให้ปริมาณ OH^\cdot ลดลงดังสมการ



2.6.5 ความเข้มแสง (light intensity)

ความเข้มแสง คือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาซึ่งพลังงานแสงนี้จะอยู่ในรูปของโฟตอนจากสมมติฐานของไอน์สไตน์ว่าด้วย 1 โฟตอนจะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอนดังนั้นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนแปรผันตามจำนวนโฟตอนแปรผันตามความเข้มข้นของแสง โดยเมื่อลดความเข้มแสงลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงตามไปด้วยเมื่อความเข้มข้นแสงเป็นศูนย์อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงมากจนถือว่าไม่เกิดปฏิกิริยา (ลัดดา, 2545)

Behnajady, *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาการทำลายด้วยแสง (photodestruction) ของแอซิดออเรนจ์ 7 โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟยูวีซี 30 วัตต์ความเข้มแสงเท่ากับ $1.5 \times 10^5 \text{ Einstein l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ และหลอดไฟยูวีซีกำลังไฟ 8 วัตต์ความเข้มแสงเท่ากับ $5 \times 10^6 \text{ Einstein l}^{-1} \text{ s}^{-1}$ พบว่าอัตราการย่อยสลายของการ

ใช้หลอดไฟกำลังไฟ 30 วัตต์จะสูงมากกว่าหลอดไฟกำลังไฟ 8 วัตต์ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงเมื่อความเข้มแสงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็เพิ่มขึ้นด้วย

เช่นเดียวกับ Muruganandham and Swaminathan (2004) พบว่าการเพิ่มความเข้มแสงจากกำลังไฟ 16 วัตต์ไปเป็นกำลังไฟ 62 วัตต์จะเพิ่มการย่อยสลายสีจากร้อยละ 50.69 ไปเป็นร้อยละ 79.86 และเพิ่มการย่อยสลายจากร้อยละ 18.66 ไปเป็นร้อยละ 45.69 ที่เวลา 60 นาทีเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ OH^{\cdot} อัตราของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H_2O_2 จะขึ้น โดยตรงกับพลังงานแสงที่ตกลงมาที่ความเข้มแสงสูงจะเกิด OH^{\cdot} มากทำให้อัตราการกำจัดเพิ่มมากขึ้น

2.6.6 อุณหภูมิ (Temperature)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดอิเล็กตรอนกับโฮลมีมากกว่าการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับ โฮลซึ่งทำให้โมเลกุลเกิดการชนกันบ่อยขึ้นและช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาแต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เกิดทุกช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วงไม่เกิน 21 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

2.6.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved, DO)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิซิสเพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดจับ e^{-} และ h^{+} ที่แถบความนำทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออนและจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลให้ออกซิเจนทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^{-} และ h^{+} นอกจากนี้ ออกซิเจนยังทำให้เกิด ไฮดรอกซิลเรดิคัล (อุษาพร, 2545)

2.6.8 อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

โดยทั่วไปน้ำเสียที่นำมาบำบัดจากชุมชนหรือโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีส่วนผสมของสารเคมีอื่นๆที่แตกตัวให้ทั้งประจุบวกและประจุลบซึ่งไอออนบางตัวมีผลดีต่อปฏิกิริยาแต่บางตัวก็มีผลต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา

Venkatadri and Perters (2007) กล่าวว่าโคบอลต์ 1 มิลลิโมล อลูมิเนียม 0.2 มิลลิโมล และสังกะสี 0.5 มิลลิโมล ทำให้อัตราการย่อยสลายคลอโรฟอร์มลดลงร้อยละ 50 70 และ 60 ตามลำดับแต่ในทางตรงกันข้ามเฟอร์ริกไอออน (Fe^{2+}) จะช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายของฟีนอล เนื่องจากเฟอร์ริกไอออนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีและทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลได้มากขึ้นแต่การเติมโลหะไปเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาไม่เป็นที่นิยม เพราะการปรับพีเอชและการแยกโลหะออกจากสารละลายต้องเสียค่าใช้จ่าย

เพิ่มสำหรับ Cl NO_3 Halide Ion Sulfate Ion และ Phosphate Ion เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาแต่ Carbonate Bicarbonate Nitrate และ Perchlorate ทำให้ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดย Carbonate และ Bicarbonate Ion สามารถยับยั้งการทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคอลลึงทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกยับยั้งเช่นกัน (ฉลาด และ ชูสิทธิ์ , 2548)

2.7 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทาในกลุ่มทรานซิชัน มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.867 หนต่อการกักร่อนสูง ไม่เป็นสารไวไฟ มีเลขออกซิเดชัน +4 +3 +2 แต่สภาพทั่วไปพบเป็น +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นผงสีขาวมวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยที่โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยวิธีการกระตุ้นด้วยแสงคือโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบ Orthorhombic และที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างแบบ Octahedron โดยที่มุมระหว่างแกนของ Octahedron ในรูไทล์มีค่าเท่ากับ 90 และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาเทสมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 และ 92.43

จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าพลังงานเสรีของกิบส์ของการเกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีค่า -884.5 กิโลจูลต่อโมลซึ่งมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ที่มีค่า -889.5 อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนั้น มีค่าเท่ากับ 3.894 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 4.250 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

คุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวจึงทำให้ผลึกของโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสนั้นจะมี แบนด์แก๊ปสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยค่าแบนด์แก๊ป ของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีค่าเท่ากับ 3.23 โวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าเท่ากับ 3.02 โวลต์ จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และโครงสร้างผลึกแบบบรูคไคท์ การทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ส่วนโครงสร้างผลึก

แบบรูปไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของ e^- และ h^+ ได้ง่ายทั้งยังมีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำกว่า โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบอื่น

รูปผลึกขนาดอนุภาคผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมเป็นการรวมเป็นผลึกและความบริสุทธิ์ของ กระบวนการผลิตถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งาน สารไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะทางเคมีที่ดี ทำให้มีผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากจึงปลอดภัยและใช้งานได้ง่าย

ตารางที่ 2.3 ส่วนสมบัติกายภาพและเชิงกลของ TiO_2 ได้สรุปดังตารางนี้

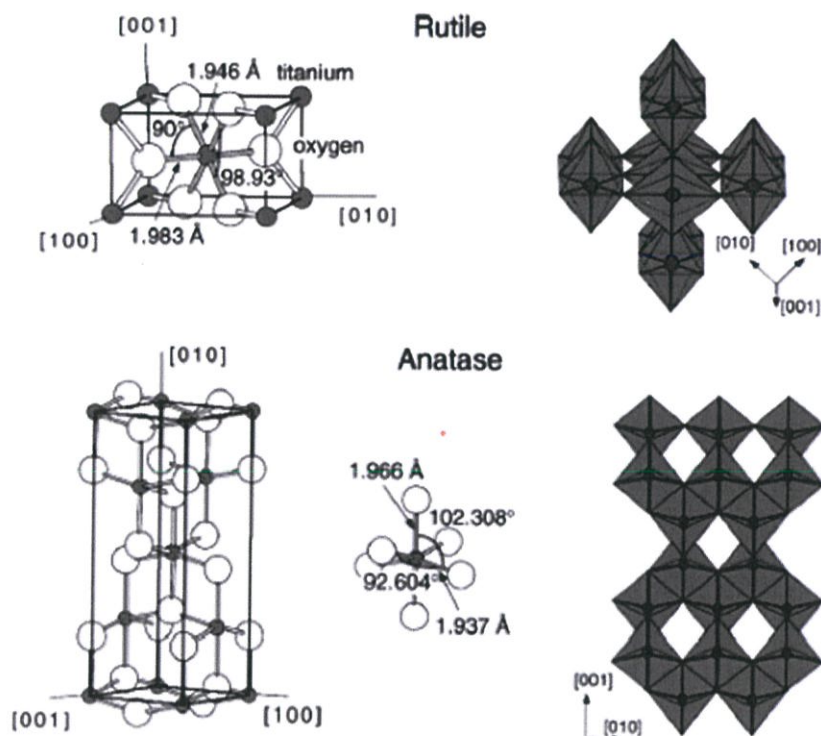
คุณสมบัติ	รายละเอียด
สถานะภาพ สี	ของแข็งสีขาว
ความพรุน	0 %
Modulus of Rupture	140 MPa
กำลังแรงกด	680 MPa
Poisson's Ratio	0.27
Fracture Toughness	3.2 Mpa.m ^{-1/2}
Shear Modulus	90 GPa
Modulus of Elasticity	230 GPa
Microhardness (HV0.5)	880
ค่าความต้านทาน (Resistivity, 25 ⁰ C)	10 ¹² ohm.cm
ค่าความต้านทาน (Resistivity, 700 ⁰ C)	2.5x10 ¹⁴ ohm.cm
Dielectric Constant (1MHz)	85
Dissipation factor (1MHz)	5x10 ⁻⁴
Dielectric strength	4 kVmm ⁻¹
Thermal expansion (RT-1000 ⁰ C)	9x10 ⁻⁶
Thermal Conductivity (25 ⁰ C)	11.7 WmK ⁻¹
ด้านความปลอดภัย (Safety)	
กิน (Ingestion)	อันตรายต่ำจากรับประทานโดยอุบัติเหตุ
สูดดม (Inhalation)	ทำให้คัน อันตรายในระยะยาว
ผิวหนัง (Skin)	อันตรายต่ำ
นัยน์ตา (Eyes)	อันตรายต่ำ

ที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/ไทเทเนียม>. 26 พฤศจิกายน 2556

2.7.1 รูปผลึกของสารไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปผลึกของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องและกล่าวถึง คือ รูไทล์และอนาเทส นั้นมีความแตกต่างกัน ด้านการหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยาของแสง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์และประจุบวกของออกซิเจน อยู่ในโครงสร้างตาข่ายที่มีมากมายหลายแบบ รูปผลึกแบบที่ 3 ซึ่งไม่ได้กล่าวถึงของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ บรึคไคท์ รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของรูปผลึกชนิดต่างๆ

รูไทล์มีรูปผลึกที่แน่นอน สามารถดูดกลืนรังสีเหนือม่วง (Ultra Violet) ได้น้อยกว่าอนาเทส อย่างไรก็ตามการนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มข้นสูง เพราะว่า ดัชนีการหักเหแสงสูงและการกระจายของแสงผลึกชนิดรูไทล์มีผลกระทบในดวงกลางจับสารอินทรีย์มากกว่าแบบ อนาเทส ประมาณ 20%



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของรูปผลึกของ รูไทล์ และ อนาเทส

ที่มา : Diebold (2003)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ต้องใช้แสงยูวีในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ ผิวหน้าผลึกของรูไทล์ประมาณ 10 เท่าต่อการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ และอนาเทสจะมีการลดลงร้อยละ 10 ของปฏิกิริยาครีงชีวิตของรูไทล์ ดังนั้นสำหรับการใช้งานภายนอก ต้องให้ความสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของผลึกรูไทล์และปริมาณร้อยละ 1 ของรังสี x-ray จะมาสามารถส่องผ่านผลึกของสารชนิดนี้ อีกทั้งสารชนิดนี้สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้โดยปฏิกิริยาคลอไรด์ที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ

2.7.2 สมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์มีเพียงบางส่วนในแถบพลังงานที่นำไฟฟ้าได้ (allowed energy band) ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) อธิบายได้โดยการใช้ระดับพลังงาน ซึ่งมีขนาดช่องว่างพลังงาน (energy gap) ประมาณ 3.0 และ 3.2 eV สำหรับเฟสรูไทล์และเฟสอนาเทสตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแถบพลังงานช่วงนี้ก็ยังถูกจัดว่ามีค่าค่อนข้างมากสำหรับการนำไปประยุกต์งานด้านแสง (photocatalytic reaction) ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์โดยการเจืออะตอมของธาตุหมู่ 3 ถึง 5 ลงไปเพื่อเพิ่มระดับพลังงานในช่องว่างพลังงาน นอกจากพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากอะตอมหมู่ 3 ถึง 5 ที่เจือจางลงไปแล้ว ก็ยังมีระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นมาจากตำแหน่งว่างของอะตอมออกซิเจน (oxygen vacancy level) โดยจะมีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าแถบการนำ (conduction band) 0 ถึง 1 eV ซึ่งจากการรายงานการทดลองพบว่าค่าประมาณ 2.21 และ 2.40 eV

2.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นสารออกซิเดนต์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีสภาพเสถียรคงตัวเมื่อบริสุทธิ์ เป็นสารออกซิเดนต์ที่แข็งแรง มีค่า Oxidation potential เท่ากับ 1.8 eV มีการนำ H_2O_2 ไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมไม้ ทางด้านสิ่งแวดล้อมก็มีการนำมาใช้บำบัดทั้งในน้ำ อากาศ น้ำเสีย ดิน และกากตะกอน คุณสมบัติของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Property	H ₂ O ₂ concentration/weight-%				
	30	35	50	70	90
Density, $\rho/g\text{ cm}^{-3}$					
T=0°C	-	1.1441	1.2110	1.3071	1.4136
T=20°C	-	1.1312	1.1953	1.2886	1.3920
T=25°C	1.1081	1.1282	1.1914	1.2839	1.3867
Viscosity, $\mu\text{mPa s}$					
T=0°C	-	1.82	1.87	1.93	1.88
T=20°C	-	1.11	1.17	1.23	1.26
Refractive index, n_D^{20}	-	1.3563	1.3672	1.3827	1.3995
Melting point, $\text{mp}/^\circ\text{C}$	-25.7	-33	-52.2	-40.3	-11.9
Boiling point, $\text{bp}/^\circ\text{C}$	106.2	107.9	113.8	125.5	141.3
pH	-	4.9	4.3	4.4	5.1

ที่มา : Oppenlander (2003)

2.9 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดมลพิษ

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเป็นนวัตกรรมใหม่สำหรับการบำบัดมลพิษ เป็นที่สนใจที่จะนำมา ใช้บำบัดสำหรับมลพิษอันตรายจากอุตสาหกรรมต่างๆ โดยวิศวกร นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามปรับปรุงนำมาใช้บำบัดอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Galvez and Malato, 2001) การประยุกต์

ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสสำหรับบำบัดมลพิษ (Mills and Hunte, 1993; Hoffman, *et al.*, 1995)
 ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสในการบำบัดมลพิษ

มลสารในสถานะตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	<ul style="list-style-type: none"> - การลดกลิ่น - การฆ่าเชื้อโรค - การย่อยสลายสารปราบ ศัตรูพืช - กำจัดมลสารอินทรีย์ - ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ - กำจัดสารตรึงผิว - นำโลหะกลับมาใช้ใหม่ - ย่อยสลายสี - สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - ออกซิเดชันออกไซด์ของไนโตรเจน - ลดกลิ่นภายในอาคาร - ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	<ul style="list-style-type: none"> - บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร - ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

ที่มา : Hoffman,*et al.* (1995)

งานวิจัยในรอบสิบปีที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่การบำบัดสารอินทรีย์ มีส่วนน้อยที่มุ่งเน้นสารอนินทรีย์ และยังมีการนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคด้วย ในตารางที่ 2.6 (Hoffman ,et al., 1995) แสดงถึงการนำกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสไปบำบัดเฉพาะเจาะจง

ตารางที่ 2.6 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส

ประเภทของมลสาร	มลสารตัวอย่าง
มลสารอินทรีย์	- Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Phenol, Trichloroethylene และสารระเหยจำพวก halogenated hydrocarbon อื่นๆ polychlorinated biphenyl (PCBs) Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), dioxins, สารฆ่าแมลงและสารปราบศัตรูพืช ลิกนินจากอุตสาหกรรม ออกา-โน ฟอสเฟต และกรดแรงตรึงผิว alkanes, aliphatic alcohols, aliphatic carboxylic acids, alkenes, phenols, aromatic carboxylic acids, simple aromatics, halogenated alkanes และ alkenes
มลสารอนินทรีย์	- Cyanide, Hydrogen sulfide, Mercury, Cadmium, Chromium (Cr^{6+}), Sulfite, Manganese, Lead, Zinc, Copper, Arsenic, Gold (Au^{3+}), Pt^{4+} , Rh^{3+}
เชื้อโรค	- Escherichia coli, Lactobacillus acidophilus, Saccharomyces cerevisiae, Fecal coliforms

ที่มา : Hoffman ,et al. (1995)

2.10 สารอินทรีย์ในน้ำเสีย

ปัญหาใหญ่ของน้ำเสีย เกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียทำให้ต้องมีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเกิดขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์มักย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีความต้องการออกซิเจนเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิต นั่นคือจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจความต้องการออกซิเจนที่มากเกินไปทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำธรรมชาติไม่เพียงพอ สภาพอากาศจึงเกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดน้ำเน่าเสียโดยพารามิเตอร์ที่ใช้วัดสารอินทรีย์ในน้ำและน้ำเสียมียหลายตัว เช่น บีโอดี(BOD) ซีโอดี ทีโอดี ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต (Absorbance) ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (TVS)

2.10.1 แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ

2.10.1.1 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter : NOM)

หมายถึง กลุ่มสารเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่พบในน้ำธรรมชาติ เนื่องจาก NOM มีผลต่อการบำบัดน้ำหลายกระบวนการ เช่น ออกซิเดชัน โคแอกกูเลชัน การดูดซับ เป็นต้น และมีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค นอกจากนี้ NOM ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางชีวภาพของน้ำ โดย NOM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- สารที่เป็นสารฮิวมิก (Humic) ลักษณะเป็นสารไฮโดรโฟบิกมากกว่า ประกอบด้วยกรดฮิวมิกในน้ำธรรมชาติประมาณร้อยละ 50 ของ TOC ที่ละลายน้ำเป็นสารฮิวมิกซึ่งเกิดจากการย่อยสลายตัวของซากพืช ซากสัตว์ สารฮิวมิกแบ่ง 3 ประเภท คือ

- 1) ฮิวมินเป็นสารฮิวมิกที่ละลายน้ำตลอดช่วงค่าพีเอช 0 ถึง 14
- 2) กรดฮิวมิกเป็นสารฮิวมิกที่ไม่ละลายน้ำที่พีเอชน้อยกว่า 2
- 3) เป็นสารฮิวมิกที่ละลายน้ำได้ตลอดช่วงค่าพีเอช 5 ถึง 14

- สารที่ไม่ใช่ฮิวมิก (Non Humic) มีลักษณะเป็นสารไฮโดรฟิลิกมากกว่า และประกอบด้วยสารอินทรีย์อื่น ๆ เช่น โพรตีน กรดอะมิโน แป้ง เป็นต้น (มันลิน, 2544)

2.10.1.2 สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นซึ่งจุลินทรีย์

ประกอบด้วยโปรโตซัว แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่ายเซลล์เดียว สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นนี้อาจจะละลายปนเปื้อนมากับน้ำโดยตรงหรือเกิดจากซากจุลินทรีย์ถูกย่อยสลาย ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ภายในเซลล์ละลายปนมากับน้ำ

2.10.1.3 สารอินทรีย์ที่เกิดจากชุมชนเกิดจากกิจกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

ได้แก่ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และสารเคมีต่าง ๆ เป็นต้น รวมทั้งการขับถ่ายชำระร่างกายของมนุษย์ มีส่วนทำให้สารอินทรีย์ปนเปื้อนมาในน้ำได้ เช่น สารเร่งตกตะกอนในระบบน้ำเสีย นอกจากนี้ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งมักจะมีสารอินทรีย์ที่ไม่อาจย่อยสลายได้ ตลอดจนซากจุลินทรีย์หลงเหลือที่ปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านระบบบำบัดเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอาจทำให้สารเหล่านี้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเพิ่มขึ้น เช่น ทำให้เกิดสารในกลุ่มไตรเฮโลมีเทน (Trihalomethanes: THM) ซึ่งเป็นสารที่เชื่อกันว่าก่อให้เกิดมะเร็ง (แสวง เกิดประทุม, ม.ป.ป)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มานพ (2550) จากการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ค่า COD เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการบำบัด และเนื่องจากน้ำเสียดังกล่าวมีคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอยู่ในรูปของแป้งและเซลลูโลสซึ่งยากต่อการบำบัดเจือปนอยู่ จากการศึกษาหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมตลอดจนสถานะกำลังวัตต์ของแสงยูวี และระยะเวลาที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดพบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกัน คือ 0 1 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร โดยใช้กำลังวัตต์ของยูวีต่างกัน คือ 30 45 และ 60 วัตต์ ในแต่ละชุดกำลังวัตต์ใช้เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร กำลังวัตต์หลอดยูวี 60 วัตต์ และระยะเวลาที่ 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพได้สูงสุด ร้อยละ 33 และจากการศึกษาผลของพีเอช ที่มีต่อการบำบัดโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยได้ทดลองปรับค่าพีเอชเป็น 3 7 และ 10 จากนั้นนำมาทดลองฉายแสงที่ กำลัง 60 วัตต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่า ที่สถานะเป็นกลาง เท่ากับ 7 ส่งผลต่อการบำบัดสูงสุดที่ร้อยละ 47 และจากการศึกษาผลจากการเติมออกซิเจนที่มีผลต่อการบำบัดโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ นำมาทดลองฉายแสงที่ กำลัง 60 วัตต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่าระบบที่มีการเติมออกซิเจนมีประสิทธิภาพการบำบัด ร้อยละ 39 ซึ่งสูงกว่าระบบที่ไม่เติมออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 33

ฉลาด และชุตินันท์ (2548) จากการศึกษาการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิส มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลา ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัด และประสิทธิภาพในการนำไปใช้น้ำบำบัดน้ำเสียจริงการทดลองทำโดยใช้แบบจำลองแบบเต็มเต็มครั้งเดียว (Batch) และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งปริมาณลิกนิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการหาระยะเวลาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม จากการทดลอง พบว่า ระยะเวลาลิกนินถูกบำบัดหมดใน 8 ชั่วโมง การศึกษาหาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม พบว่า ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 4.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสามารถกำจัดลิกนินได้ร้อยละ 100 และจากการทดลองในการบำบัดสีจากลิกนินในน้ำเสียจริง ซึ่งมีปริมาณลิกนิน 27.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 4.0 กรัมต่อลิตร และระยะเวลา 8 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินสามารถกำจัดได้ร้อยละ 69.8

วูธนันท์ (2544) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 5 กรัมต่อลิตร จึงจะให้ค่าการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงสุดส่วนค่าความเข้มข้นสีย้อมผ้าเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรที่จะให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด และสุดท้ายการเปลี่ยนความเข้มข้นแสงยูวีจาก 9.10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเป็น 1.08 มิลลิวัตต์ต่อ

ตารางเซนติเมตร พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมลดลงและปฏิกิริยาจะไม่เกิดขึ้นถ้าไม่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเลต

ธีรวิทย์ (2544) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ Advance Oxidation Processes โดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตและ H_2O_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าสถานะที่เหมาะสมของระบบ UV/ H_2O_2 ในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีและซีโอดี คือ ที่สถานะพีเอชเท่ากับ 9 ความเข้มข้นของ H_2O_2 เท่ากับ 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตรและเวลาสัมผัสเป็น 240 นาทีเป็นสถานะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าบีโอดีและซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60.3 และร้อยละ 48.4 ตามลำดับ

ลัดดา (2545) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟ 17 และสีรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่ากระบวนการโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสีทั้ง 2 ชนิด มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ค่าพีเอช 4 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและที่ความเข้มแสง 9.10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดสำหรับสีรีแอกทีฟ 17 คือค่าพีเอชที่ 10 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.5 มิลลิโมลาร์ และสีรีแอกทีฟบลู 19 คือ ค่าพีเอชที่ 10 ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ ส่วนค่าความเข้มข้นสีที่เริ่มต้นที่เหมาะสมและความเข้มแสงที่เหมาะสมของสีทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 9.10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ นั่นคือกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ดวงกมล (2546) ได้ศึกษาการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วในสารละลายด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่ว คืออัตราส่วนระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1: 20 ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของสารละลายเป็น 3 และได้ศึกษาเปรียบเทียบการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะอื่นๆ คือ สังกะสีและแคดเมียมพบว่าสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน

พวงรัตน์และอภิชน (ม.ป.ป.) ได้ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับโครเมียมบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าพีเอชที่มีค่าอยู่ในสถานะกรดทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมได้ดีกว่าในสถานะด่างโดยค่าพีเอชที่ทำให้เกิดการดูดซับโครเมียมบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีที่สุดคือที่พีเอช 5 โดยมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 2.14 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร

Kuo and Ho (2001) ได้ศึกษาการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ตรึงติดบนใบพัดกวนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงอาทิตย์และ

หลดออัลตราไวโอเลตแบบปรอทความดันต่ำเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสง ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสีย้อม พบว่าการใช้แสงอาทิตย์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีได้ดีกว่าการใช้ หลดออัลตราไวโอ เลตและประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นในสภาวะกรด และที่ความเข้มข้นของสีย้อม ต่ำสุด 5 ไมโครโมลาร์

Behnajady, *et al.* (2004) ได้ศึกษาการทำลายโครงสร้างโดยใช้แสงของแอซิดออเรนจ์7 (AO7) โดยใช้ UV/ H₂O₂ พบว่าสำหรับการทำลายด้วยแสง (Photodestruction) ของ AO₇ นั้นปริมาณ H₂O₂ ที่เหมาะสม คือ 80 มิลลิกรัมต่อลิตรอัตราย่อยสลายที่คงที่ของ AO₇ ภายใต้สภาวะกลางและต่ำจะดีกว่าสภาวะเป็นกรด และการใช้ EtOH จะไปยับยั้งกระบวนการ Photodestruction ของ AO₇

Muruganandham and Swaminathan (2004) ได้ศึกษาโฟโตเคมีคัลออกซิเดชันของสีย้อมรีแอคทีฟ ด้วยกระบวนการ UV/H₂O₂ พบว่าในการทดลองนั้นทั้งการใช้ UV/H₂O₂ และ Solar/H₂O₂ เป็นแหล่งของ แสงนั้นประสิทธิภาพของทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้ได้กับการย่อยสลายสีย้อมรีแอคทีฟโดยสภาวะการย่อย สลายที่มีประสิทธิภาพดีจะอยู่ที่พีเอช 3 และปริมาณของ H₂O₂ เท่ากับ 20 มิลลิโมลและสารเคมีที่เติมลงไป ช่วยในปฏิกิริยา คือ Na₂CO₃ และ NaOH ที่เข้มข้นจะไปยับยั้งประสิทธิภาพการกำจัดในกระบวนการ โฟโตเคมีคัลออกซิเดชันและในปี 2006 Muruganandham, *et al.* ได้ศึกษาแอดวานซ์ออกซิเดชันของการ กำจัดสีสีย้อมรีแอคทีฟเฮลโลไล 14 โดยศึกษาการเปรียบเทียบของกระบวนการ UV/TiO₂ UV/H₂O₂ UV/H₂O₂/Fe²⁺ พบว่าการเติม H₂O₂ ที่ปริมาณความเข้มข้น 5 ถึง 25 มิลลิโมลต่อลิตรจะเพิ่มอัตราการย่อย สลายสีจากร้อยละ 40.1 ไปเป็นร้อยละ 60.1 ที่เวลา 60 นาทีและเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ H₂O₂ จนเกิน 25 มิลลิโมลต่อลิตรอัตราการย่อยสลายสีจะลดลงจากร้อยละ 60.1 ไปเป็นร้อยละ 59.2 ซึ่งอย่างไรก็ตาม ปริมาณความเข้มข้นของ H₂O₂ ที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิโมลต่อลิตร

Aleboych, *et al.* (2005) ได้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่ควบคุมใน UV/H₂O₂ ของการกำจัดสี แอซิดบลู 74 พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสมในการย่อยสลายสี คือค่าพีเอชในช่วงระหว่าง 3.5 ถึง 5.5 อัตราการย่อยสลายสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ H₂O₂ ขึ้นเรื่อยๆจนถึง 0.05 โมลต่อลิตร เช่นเดียวกับ Modirshahla and Bennajady (2006) ที่ได้ศึกษาโฟโตออกซิเดชันในการย่อยสลาย มาลาโคลกรีน (MG) โดยใช้กระบวนการ UV/H₂O₂ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด MG นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อ เพิ่มความเข้มข้นของ H₂O₂ จนถึง 300 โมลต่อลิตร

Villanueva and Martinez (2007) ได้ศึกษาสีย้อมแอซิดออเรนจ์7 ด้วยกระบวนการ โฟโตแคตาไลซิสออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปแบบแวนดอลอยและเปอร์ซัลเฟตไดออกไซด์ (S₂O₈²⁻) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสี ซีโอดี และค่าพีเอชพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 85 จากความเข้มข้น ของสี 0.20 มิลลิโมลาร์ที่ค่าพีเอช 3 และเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับเปอร์ซัลเฟตไดออกไซด์จะให้ ประสิทธิภาพการกำจัด ซีโอดีเท่ากับร้อยละ 70

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

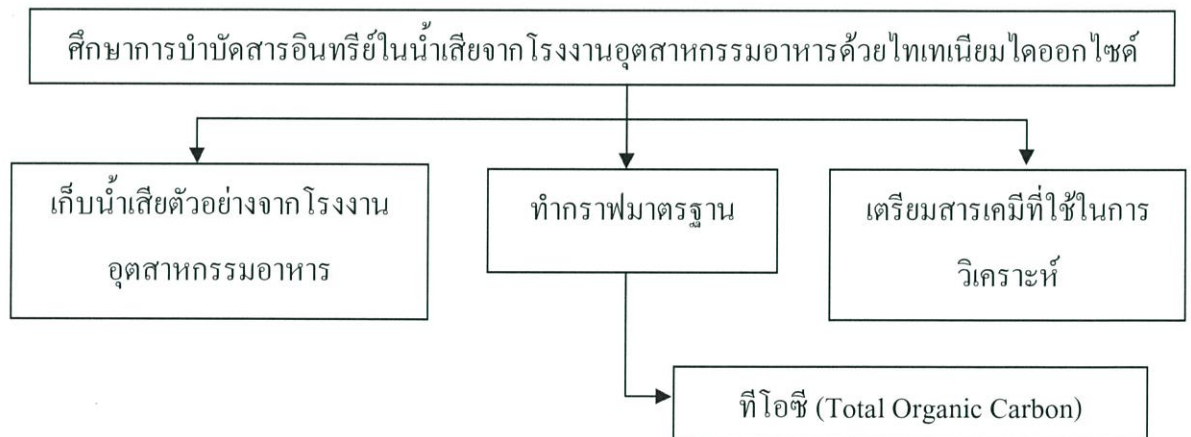
- 3.1.1 ไทเทเนียมออกไซด์เกรดวิเคราะห์ (TiOXIDE, TiO₂) บริษัท HUNTSMAN ประเทศ Malaysia
- 3.1.2 กรดซัลฟูริกเข้มข้นเกรดวิเคราะห์ (Sulfuric Acid 96%, Conc.H₂SO₄) บริษัท CarloErbaCo.,Ltd
- 3.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปเม็ด (Sodium Hydroxide Pellets, NaOH) บริษัท LobaChemicPvt .Ltd. ประเทศ India
- 3.1.4 โพแทสเซียมไดโครเมตเกรดวิเคราะห์ (Potassium Dichromate, K₂Cr₂O₇) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.5 เฟอรัลแอมโมเนียมซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ (Ammonium Sulphate, Fe (NH₄)₂ (SO₄)₂ H₂O) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.6 เมอร์คิวรี (II) ซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ในรูปผลึกหรือผง (Mercury (II) Sulphate, HgSO₄) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.7 ซิลเวอร์ซัลเฟตเกรดวิเคราะห์ (Silver Sulphate, Ag₂SO₄) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.8 กรดไนตริก 68% เกรดวิเคราะห์ (Nitric Acid 68%, HNO₃) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.9 ออร์โท-ฟีนานโทรลีนเกรดวิเคราะห์ (O-Phenanthroline, C₃H₃NCH:CHC₅H₃N•H₂O) บริษัท Carlo ErbaCo.,Ltd
- 3.1.10 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H₂O₂)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

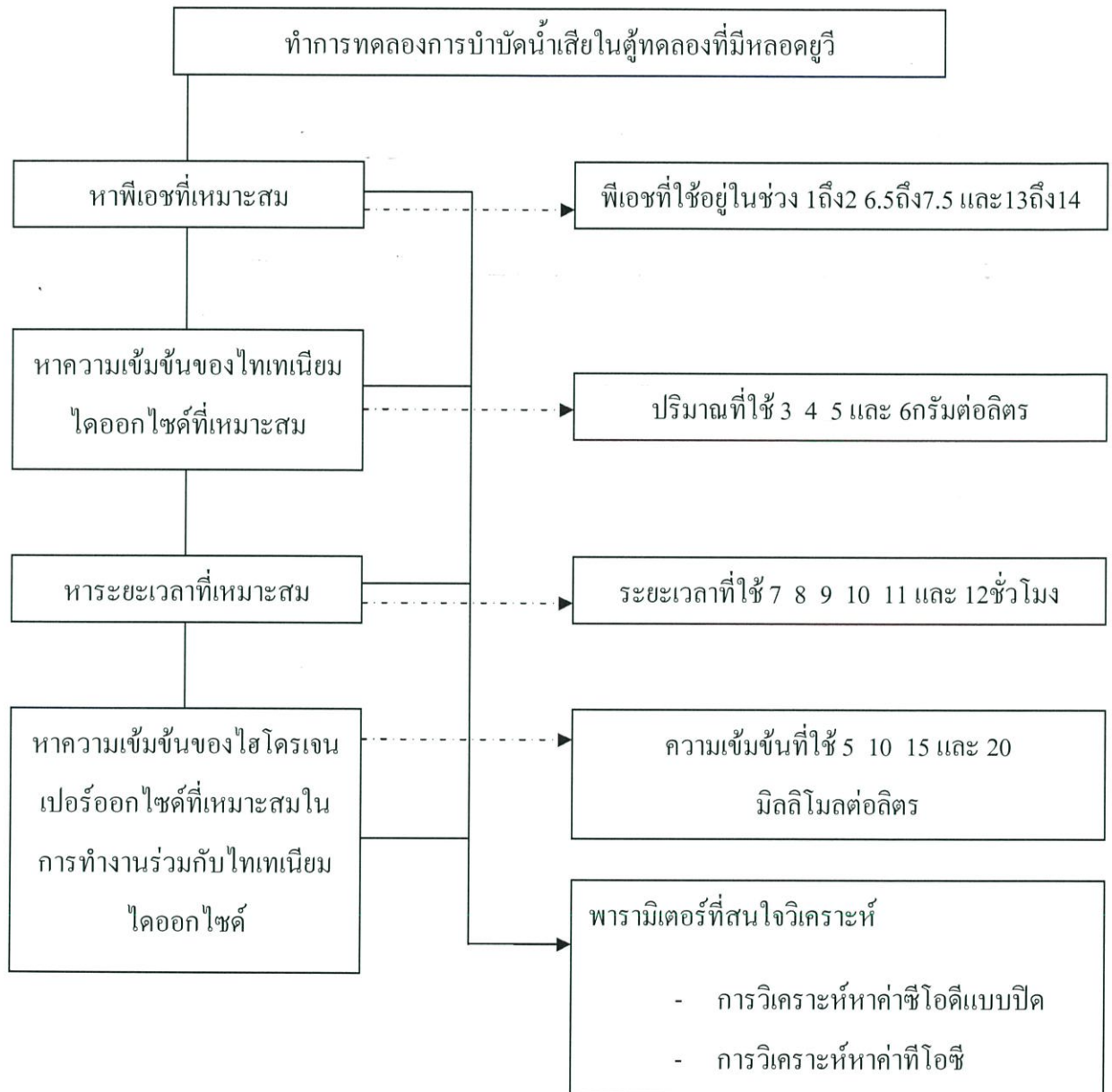
- 3.2.1 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ
- 3.2.2 ตู้ฉายแสงยูวีที่มีหลอดยูวีขนาดกำลังไฟ 8 วัตต์จำนวน 7 หลอด
- 3.2.3 เครื่องวิเคราะห์ที่โอซี (TOC analyzer) รุ่น TOC-VCPH พร้อมชุด Autosampler บริษัท Shimazu
- 3.2.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) บริษัท Metrohm รุ่น 827 pH Lab ประเทศ Switzerland
- 3.2.5 เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Gallenkamp
- 3.2.6 เครื่องปั่นเหวี่ยง ยี่ห้อ sanyo รุ่น MSBO20.CX.1.5 ประเทศ United Kingdom

- 3.2.7 กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาด 70 มิลลิเมตร ยี่ห้อ WhatmanTM ประเทศ United Kingdom
- 3.2.8 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.2.9 ผู้ดูแลวันบริษัท Science Technology
- 3.2.10 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งบริษัท SARTORIUS AG GERMANY รุ่น ED224S

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมการทดลอง



ขั้นตอนที่ 2 การทดลอง



3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การหาช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.1.1 นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นกรดด้วยสารละลายไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์

3.3.1.2 นำน้ำเสียที่ทำการปรับพีเอชแล้วมาในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

3.3.1.3 เติมน้ำไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 3 กรัมต่อลิตร หรือ 0.3 กรัมต่อน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร

3.3.1.4 นำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 8 9 10 11 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดี และค่าทีไอซี

3.3.1.5 ทำการทดลองซ้ำโดยการปรับพีเอชของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.5 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นกลาง และในช่วง 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นเบส ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4 โมลาร์

3.3.1.6 เปลี่ยนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จากปริมาณ 3 กรัมต่อลิตร หรือ 0.3 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็น 4 กรัมต่อลิตร หรือ 0.4 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็น 5 กรัมต่อลิตร หรือ 0.5 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และ 6 กรัมต่อลิตร หรือ 0.6 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3.3.2 การหาความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

3.3.2.1 นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่กำหนดจากข้อ 3.3.1

3.3.2.2 นำน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วมาในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

3.3.2.3 เติมน้ำไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 3 กรัมต่อลิตร หรือ 0.3 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

3.3.2.4 นำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 8 9 10 11 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดี และค่าทีไอซี

3.3.2.5 เปลี่ยนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จากปริมาณ 3 กรัมต่อลิตรหรือ 0.3 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็น 4 กรัมต่อลิตร หรือ 0.4 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็น 5 กรัมต่อลิตร หรือ 0.5 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร และ 6 กรัมต่อลิตร หรือ 0.6 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3.3.3 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.3.1 นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่กำหนดจากข้อ

3.3.1

3.3.3.2 นำน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วมาในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250

มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

3.3.3.3 เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.3.2

3.3.3.4 นำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 8 9 10 11 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดี และค่าทีโอซี

3.3.4 การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมทำงานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

3.3.4.1 นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่กำหนดจากข้อ

3.3.1

3.3.4.2 นำน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วมาในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250

มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

3.3.4.3 เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.3.2 และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 0.5 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร 10 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 1.0 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร 15 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 1.5 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 2.0 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3.3.4.4 นำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 8 9 10 11 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดี และค่าทีโอซี

3.3.5 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.3.5.1 นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่กำหนดจากข้อ

3.3.1

3.3.5.2 นำน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วมาในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

3.3.5.3 เติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.3.2 และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เติมที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 5 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 0.5 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร 10 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 1.0 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร 15 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 1.5 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร หรือ 2.0 มิลลิโมลต่อ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ

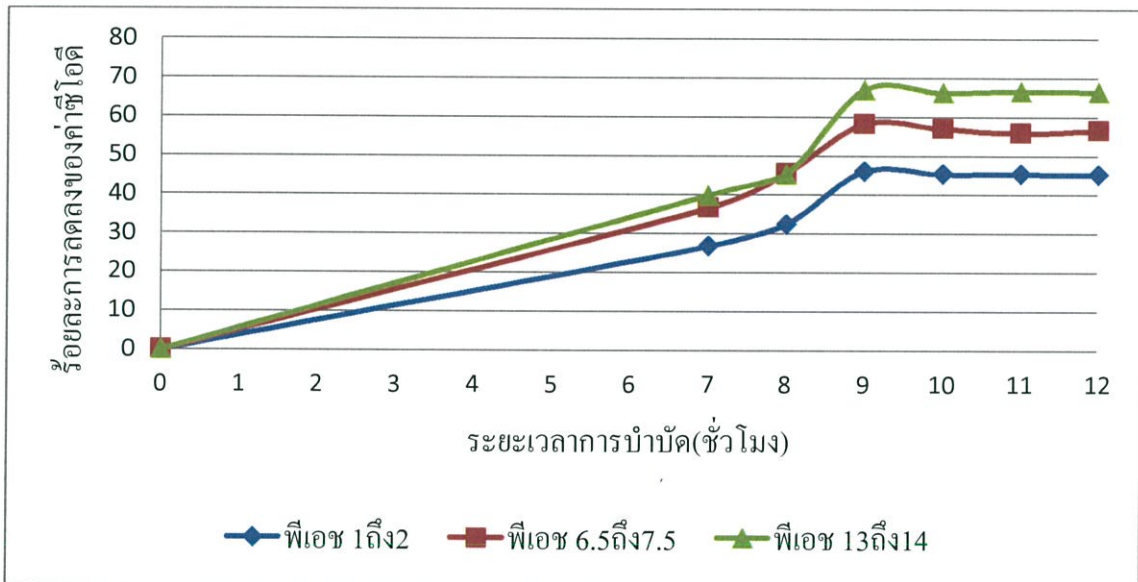
3.3.5.4 นำไปฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 8 9 10 11 และ 12 ชั่วโมงตามลำดับจากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีและค่าทีไอซี

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

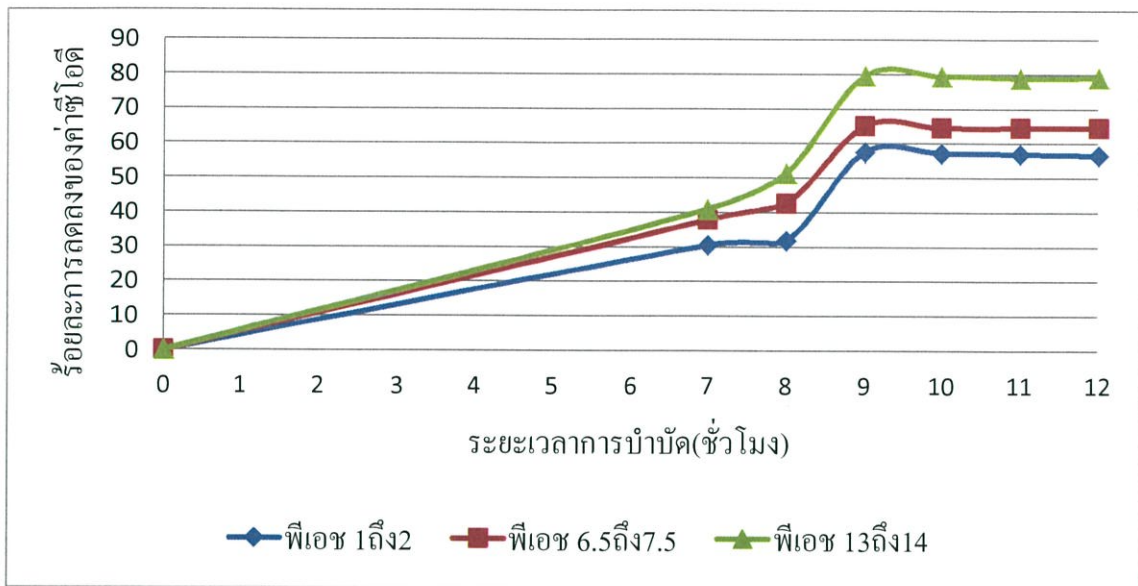
4.1 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

การศึกษานี้เป็นการบำบัดแบบไม่เติมออกซิเจน โดยการหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ จากการทดลองจะนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร มาปรับพีเอช 3 สภาวะ คือ สภาวะที่เป็นกรดอยู่ในช่วงพีเอช 1 ถึง 2 สภาวะที่เป็นกลาง อยู่ในช่วงพีเอช 6.5 ถึง 7.5 และสภาวะที่เป็นเบส อยู่ในช่วงพีเอช 13 ถึง 14 โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันคือ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์จากพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ซีไอดี และทีไอซี แล้วเปรียบเทียบในช่วงค่าพีเอชที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ถึง 4.8



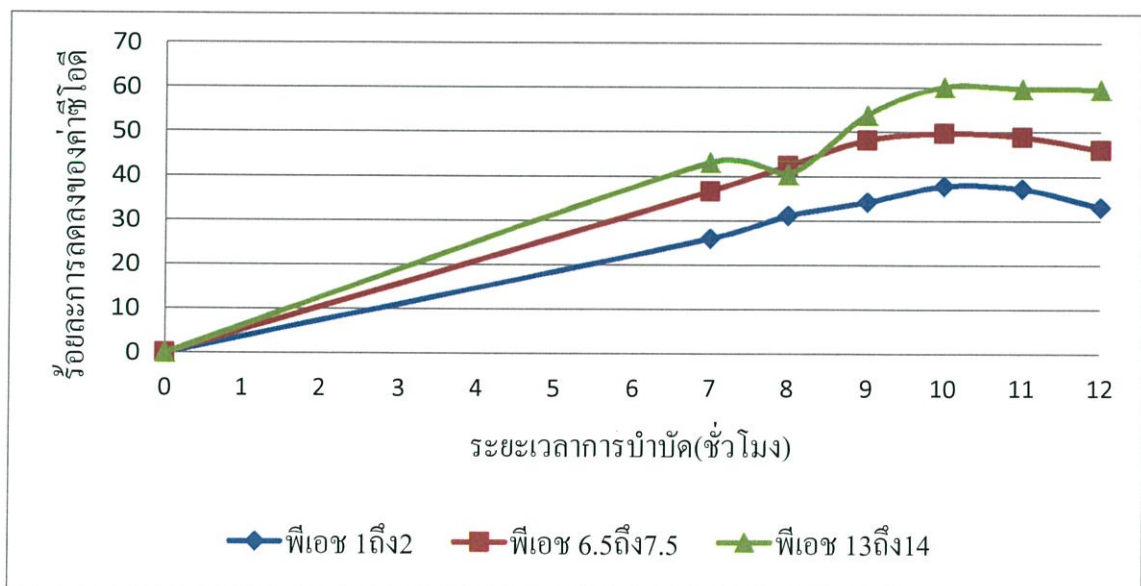
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีสูงสุดที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 46.02 58.22 และ 67.02 ในชั่วโมงที่ 9 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดี เป็น 1767.28 1738.87 และ 1557.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 953.97 726.58 และ 513.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



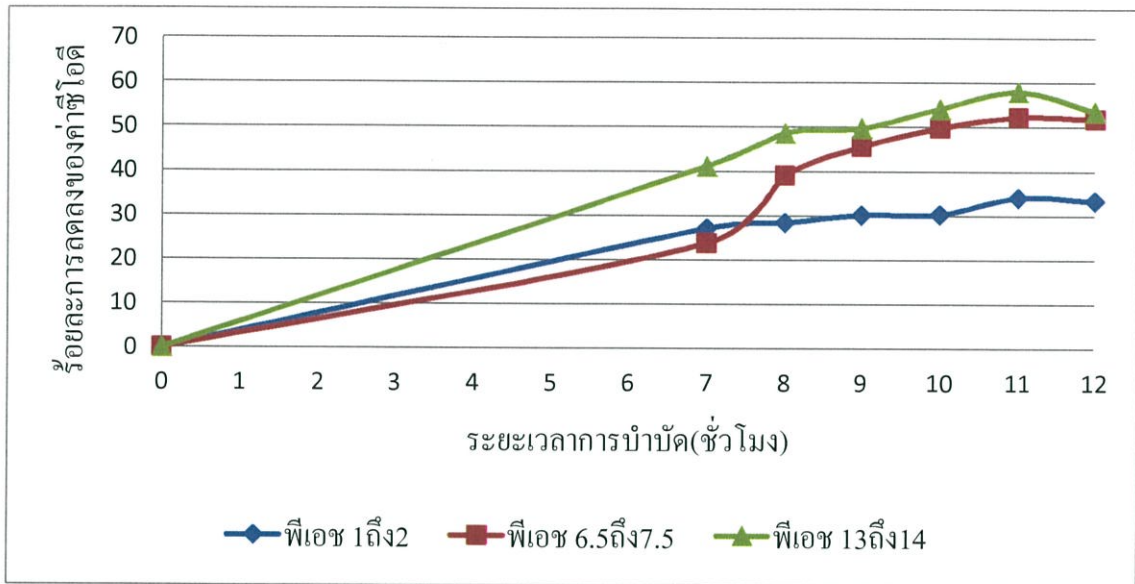
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.2 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 57.63 65.19 และ 79.69 ในชั่วโมงที่ 9 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดีเป็น 1679.83 1667.86 และ 1522.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 711.82 580.55 และ 309.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



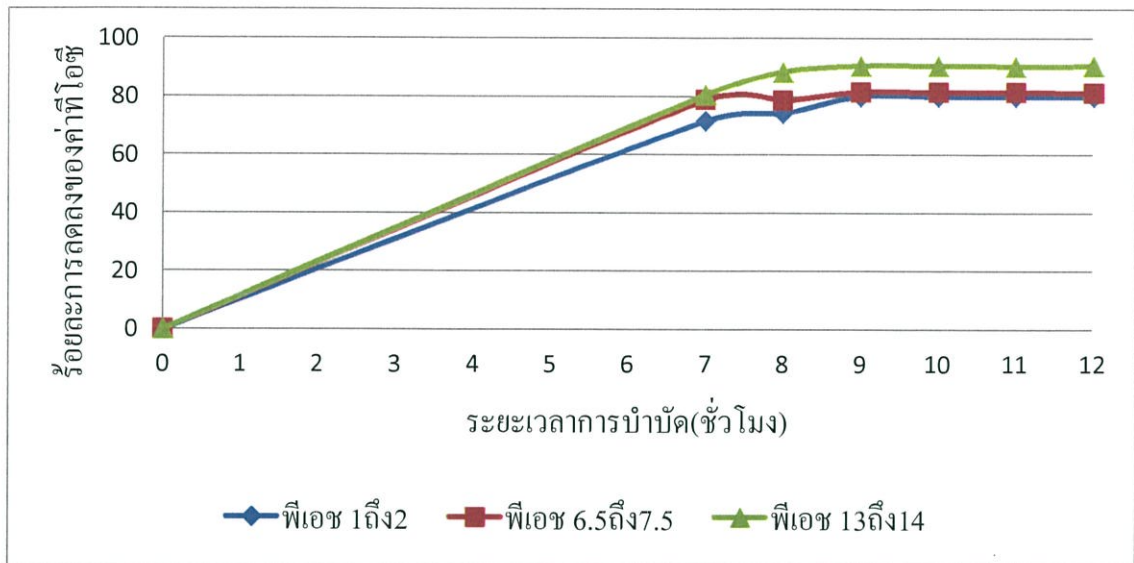
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.3 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 37.82 49.81 และ 60.29 ในชั่วโมงที่ 10 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดีเป็น 1805.02 1779.92 และ 1703.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 1122.39 893.19 และ 604.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



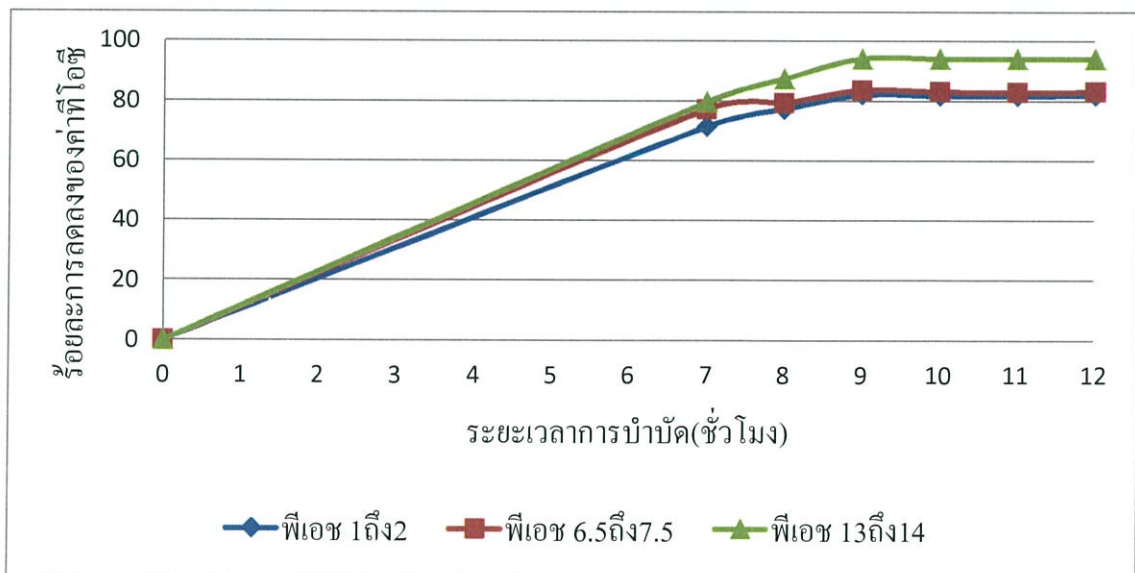
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 6 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.4 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 34.13 52.30 และ 58.04 ในชั่วโมงที่ 11 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดีเป็น 1839.28 1851.82 และ 1758.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 1211.54 883.23 และ 737.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



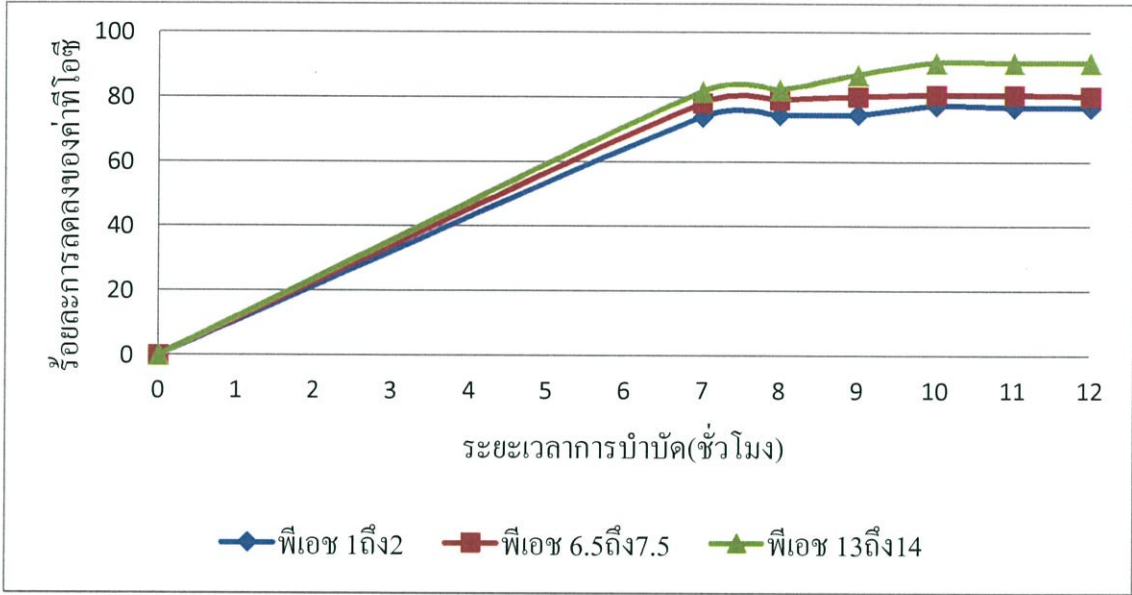
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.5 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าไอโอดีสูงสุดที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 80.16 81.66 และ 90.86 ในชั่วโมงที่ 9 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าไอโอดี เป็น 1789.30 1748.86 และ 1565.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าไอโอดีลดลงเหลือ 355.01 302.73 และ 145.92 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ



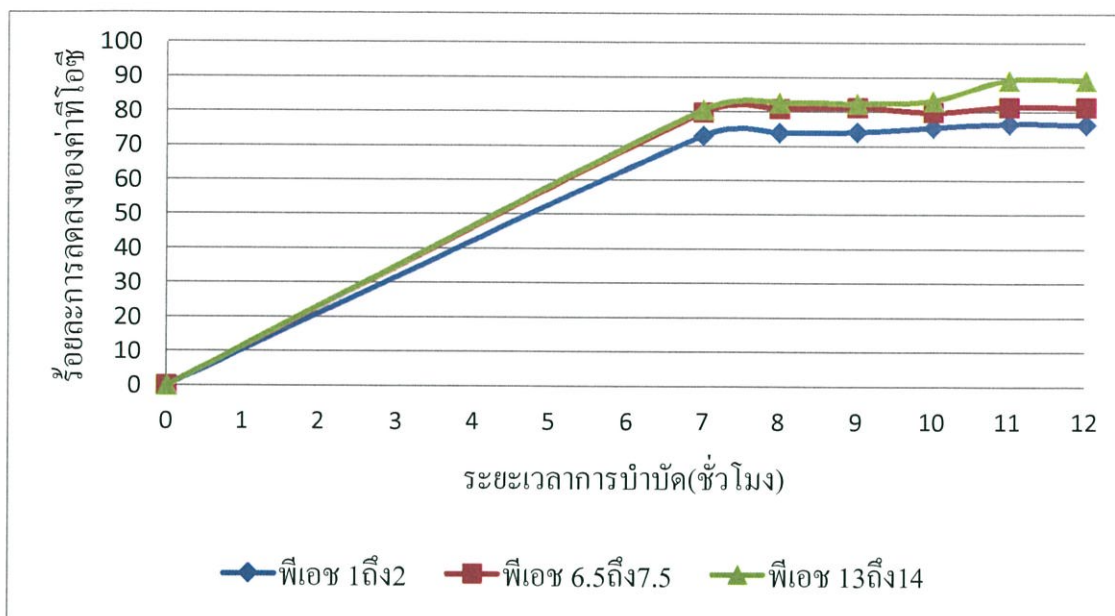
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.6 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอซีสูงสุดที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 82.05 83.76 และ 94.23 ใน ชั่วโมงที่ 9 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอซี เป็น 1693.73 1679.60 และ 1526.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าที่ไอซีลดลงเหลือ 304.01 272.70 และ 88.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.7 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอซีสูงสุดที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 77.48 80.95 และ 90.81 ใน ชั่วโมงที่ 10 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอซี เป็น 1811.78 1788.60 และ 1708.68 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าที่ไอซีลดลงเหลือ 407.98 340.66 และ 156.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 6 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัด

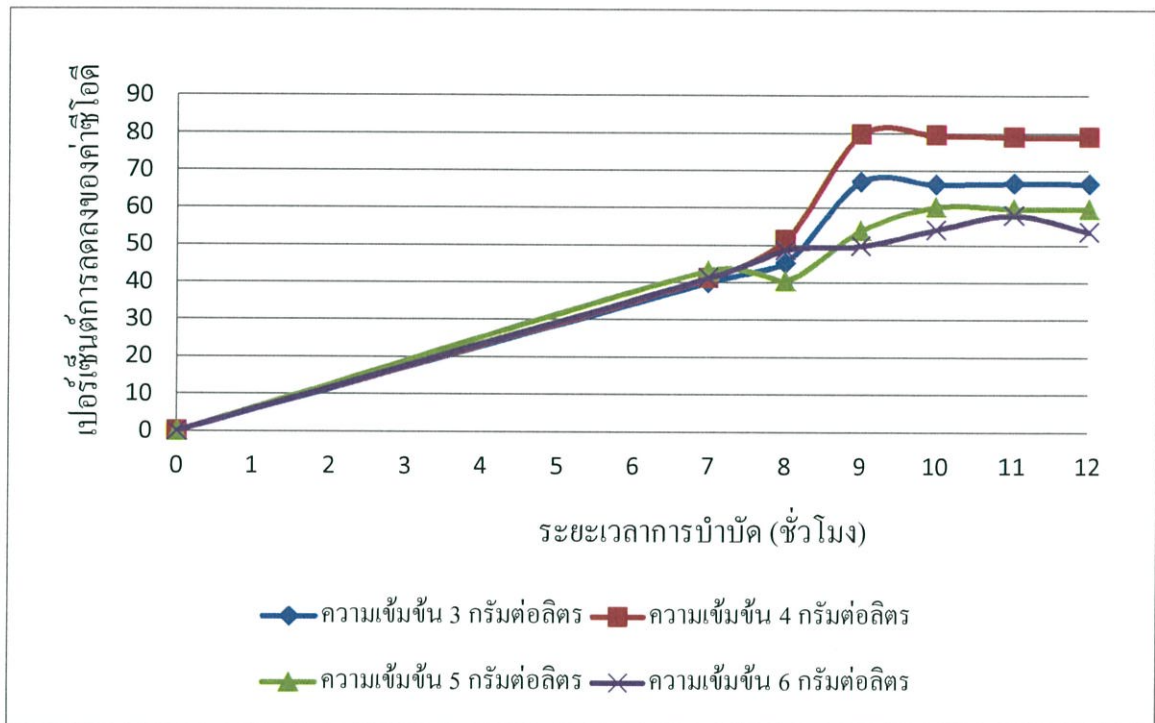
จากรูปที่ 4.8 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 กรัมต่อลิตร มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอซีสูงสุดที่พีเอช 1 ถึง 2 6.5 ถึง 7.5 และ 13 ถึง 14 เท่ากับร้อยละ 76.64 81.49 และ 89.31 ในชั่วโมงที่ 11 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอซีเป็น 1851.43 1862.14 และ 1766.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าที่ไอซีลดลงเหลือ 432.45 344.68 และ 188.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองนี้ พบว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์เหมือนกัน คือ ช่วงพีเอช 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในสถานะเบส จะมีร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์สูงที่สุด และแนวโน้มของค่าพีเอชที่รองลงมา คือ ช่วงพีเอช 6.5 ถึง 7.5 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นกลาง และแนวโน้มของค่าพีเอชที่มีร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์น้อยที่สุด คือ ช่วงพีเอช 1 ถึง 2 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นกรด

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 สถานะ โดยดูจากทั้งสองพารามิเตอร์ พบว่า ที่สถานะเบสจะมีอัตราการบำบัดสูงสุด เนื่องจากการปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีปริมาณไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มมากขึ้น อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในสถานะเบสจึงเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงตามไปด้วย ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสามารถในการออกซิไดส์ และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้สูง

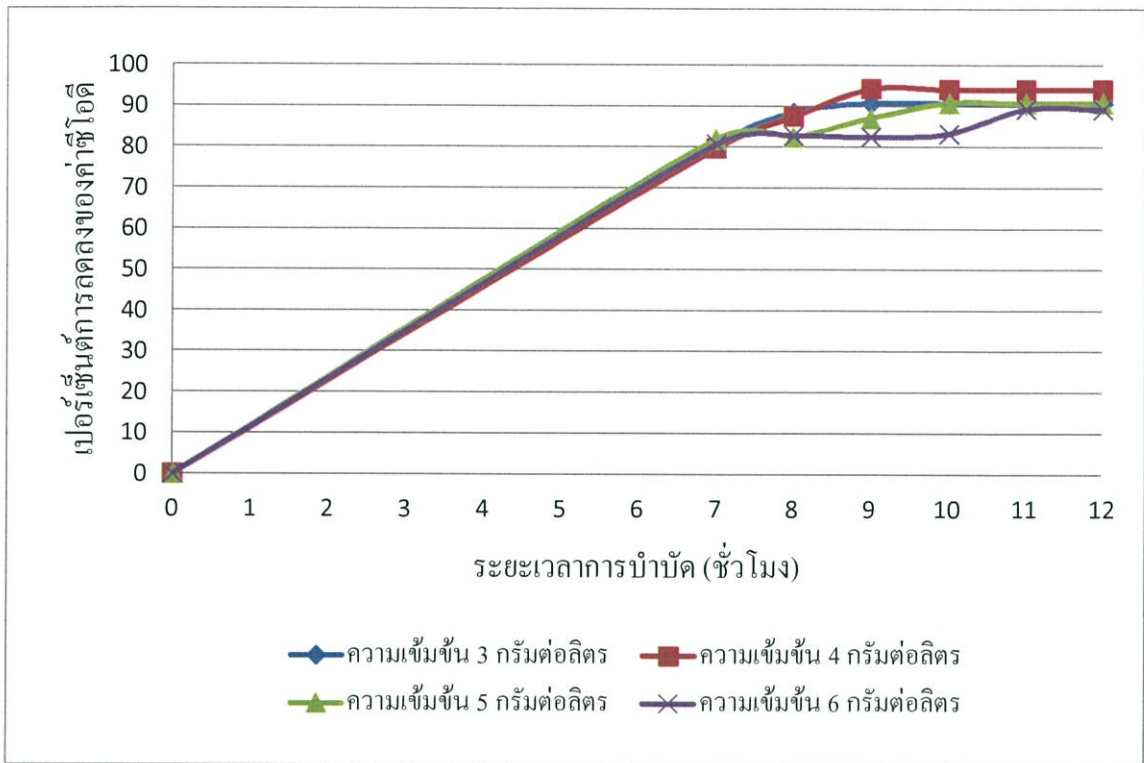
4.2 การศึกษาความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะการบำบัดที่เป็นเบส จะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้ดีที่สุด ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด ดังนั้นการทดลองนี้จึงนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร มาปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงพีเอช 13 ถึง 14 เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทดลองแตกต่างกัน คือ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์จากพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ซีไอดี และทีไอซีแล้วเปรียบเทียบในความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ถึง 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กับระยะเวลาการบำบัด

จากรูปที่ 4.9 อธิบายได้ว่า ที่พีเอช 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในช่วงเบส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีสูงสุด ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 67.02 79.69 60.29 และ 58.04 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดี เป็น 1557.47 1522.64 1703.94 และ 1758.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 513.59 309.24 604.59 และ 737.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กับระยะเวลาการบำบัด

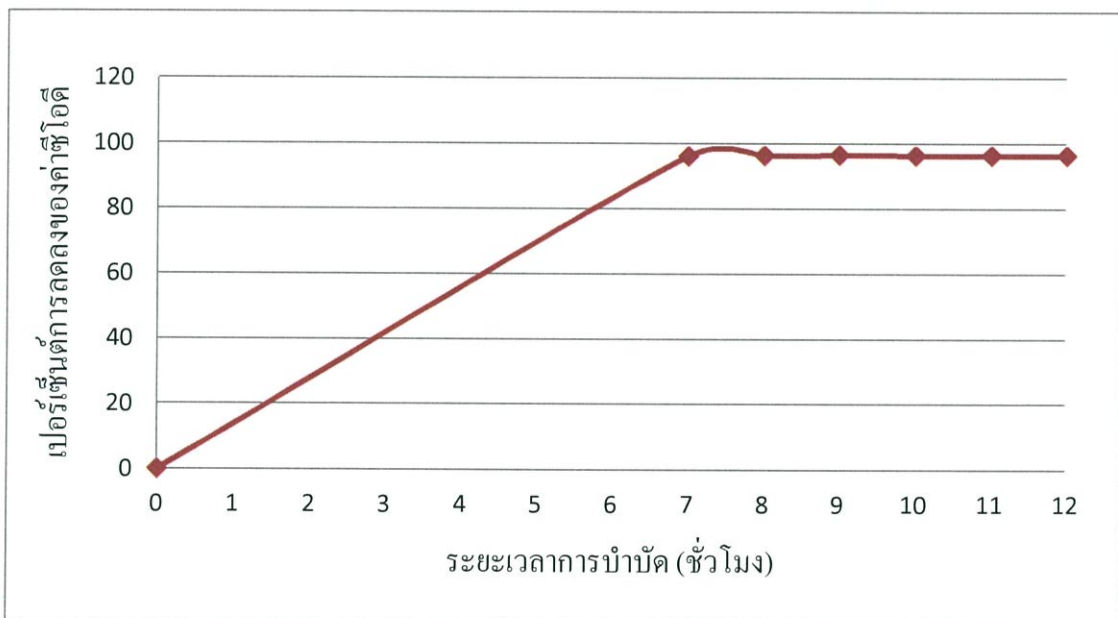
จากรูปที่ 4.10 อธิบายได้ว่า ที่พีเอช 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในช่วงเบส มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอซีสูงสุดที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 90.68 94.23 90.81 และ 89.31 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอซีเป็น 1565.81 1526.68 1708.68 และ 1766.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าที่ไอซีลดลงเหลือ 145.92 88.10 156.93 และ 188.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากการทดลองนี้ พบว่า การใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี และที่ไอซีสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงจนถึงชั่วโมงที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่าง 3 5 และ 6 กรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร สามารถส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้สูงที่สุดนั้น เนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้อัตราการเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลได้สูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้น และในการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 กรัมต่อลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยที่สุดนั้น เนื่องจากมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันเองและขัดขวางแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งลงไปโดยสารละลายทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงลดลงจึงมีปริมาณไฮดรอกซิล

เรดิคอลลดลง ซึ่งส่งผลทำให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสลดลงด้วย โดยความเข้มข้นของไทเทเนียมที่ใช้ส่วนใหญ่มีปริมาณความเข้มข้น 1 ถึง 5 กรัมต่อลิตร (Davis, 1994 อ้างถึงในฉลาด และชูสิทธิ์, 2548)

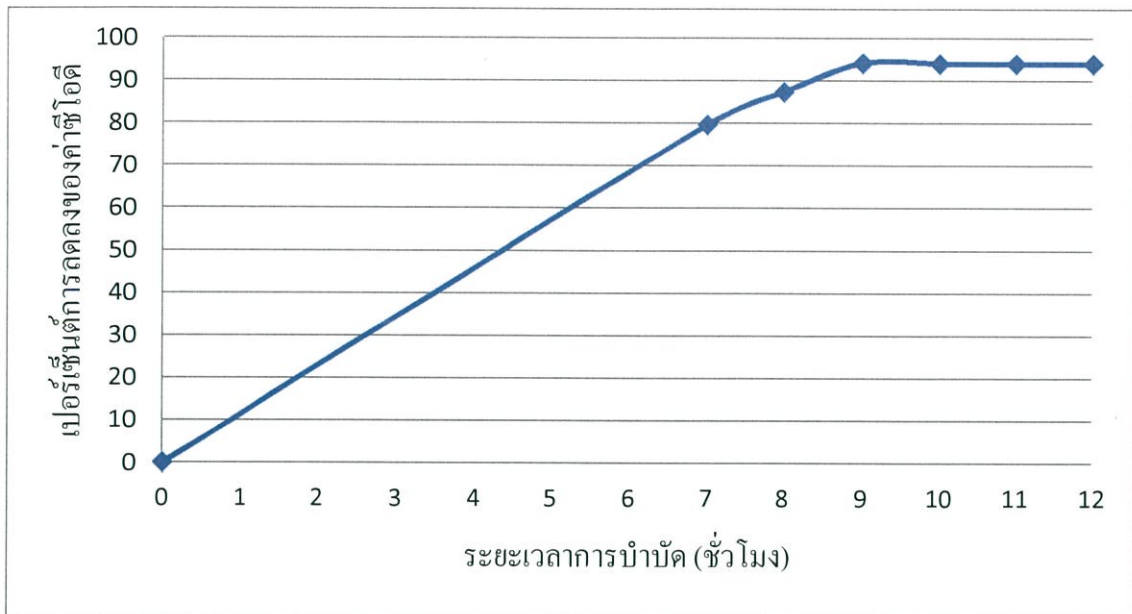
4.3 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะการบำบัดที่เป็นเบส โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร มาปรับพีเอช และใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าว จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์จากพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ซีไอดี และทีไอซี แล้วเปรียบเทียบในระยะเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13 ถึง 14

จากรูปที่ 4.11 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตรในสภาวะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี เท่ากับร้อยละ 95.8 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดี เป็น 1522.64 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 309.24 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอโอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรกับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13 ถึง 14

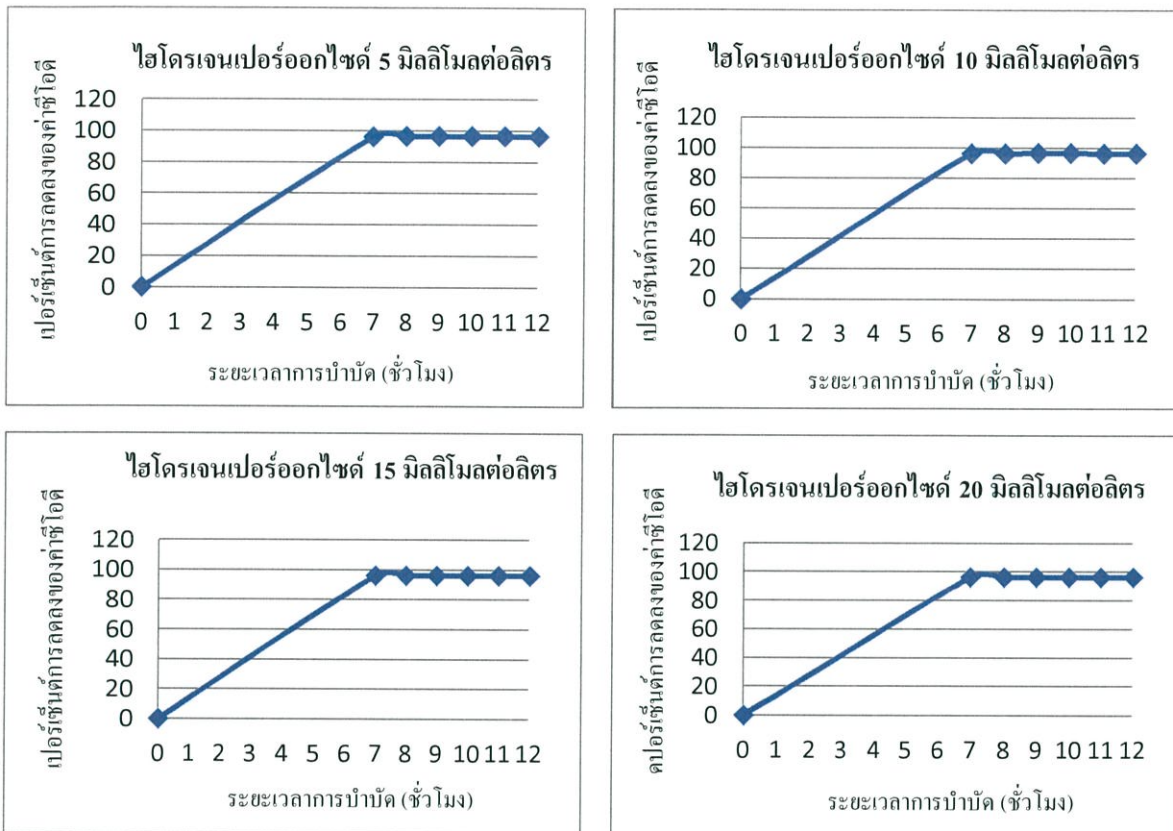
จากรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตรในสถานะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอโอดี เท่ากับร้อยละ 94.23 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอโอดีเป็น 1526.68 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการบำบัดค่าที่ไอโอดีลดลงเหลือ 88.10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองนี้ พบว่า ที่ระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 9 ชั่วโมง ส่งผลต่อการบำบัดมากที่สุด โดยมีแนวโน้มค่าร้อยละการลดลงสูงสุด และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสจะเกิดได้ดี เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นซึ่งศึกษาได้จากกราฟแสดงแนวโน้มร้อยละการลดลงของค่าที่ไอโอดีและที่ไอโอดีที่มีค่าลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งค่าได้นั้นลดลงมากที่สุดในช่วงเวลาที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับชั่วโมงเริ่มต้น

4.4 การศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์

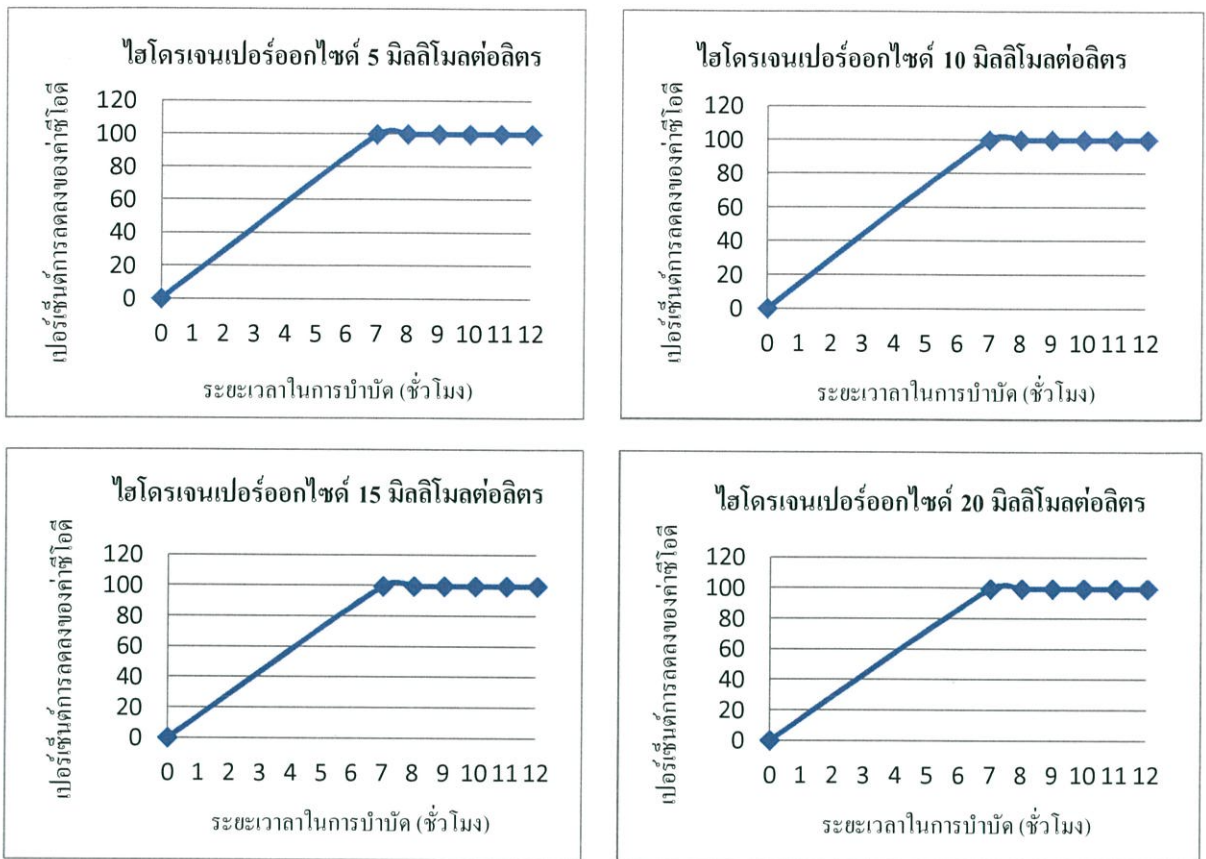
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ที่สถานะการบำบัดที่เป็นเบส โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร มาปรับพีเอช ใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทดลองที่แตกต่างกัน คือ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตรและใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าว จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาร้อยละการลดลงของ

สารอินทรีย์จากพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ซีไอดี และทีไอซี แล้วเปรียบเทียบในระยะเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.14



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกับระยะเวลาการบำบัด ที่พีเอช 13 ถึง 14

จากรูปที่ 4.13 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในสภาวะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีสูงสุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 96.52 96.67 96.58 และ 96.46 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดี เป็น 1548.30 1491.67 1693.80 และ 1716.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 55.87 49.60 57.87 และ 60.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14

จากรูปที่ 4.14 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในสภาวะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าที่ไอซีสูงสุดที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร เท่ากับร้อยละ 99.66 99.90 99.67 และ 99.51 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าที่ไอซีเป็น 1502.73 1481.37 1671.67 และ 1703.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากการบำบัดค่าที่ไอซีลดลงเหลือ 5.02 1.44 5.54 และ 8.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

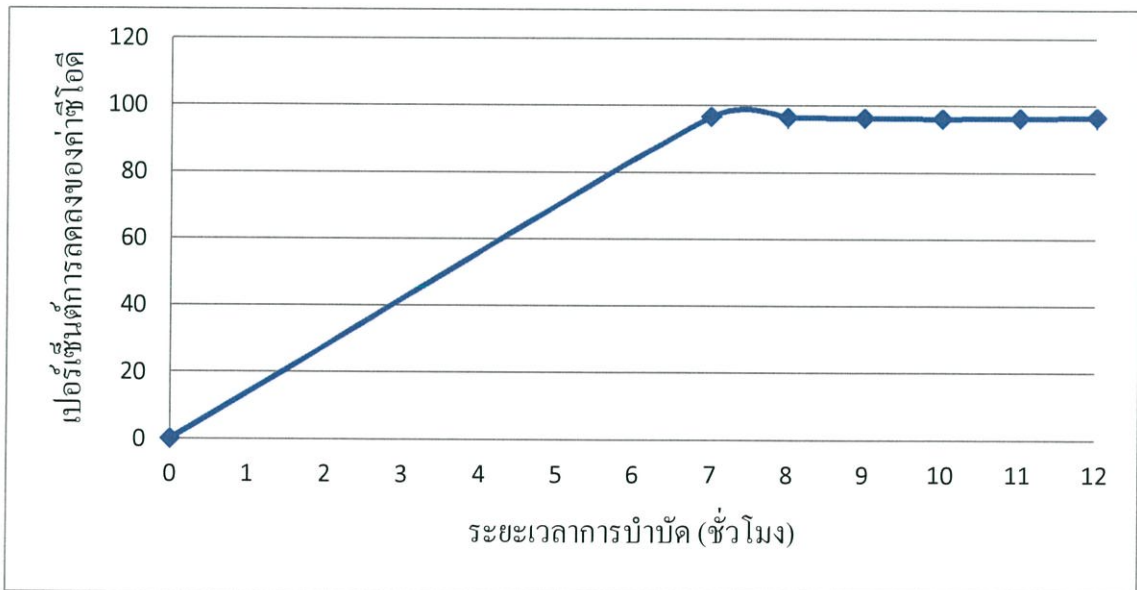
จากการทดลองนี้ พบว่า การใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำห้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นไปกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและที่ไอซีมีประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน ดังนั้นความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 5 มิลลิโมลต่อลิตร จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นการเพิ่มปริมาณ OH^- ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับ OH^-

ต่อไป ก่อให้เกิดเป็น OH^{\cdot} และ O_2^{\cdot} ดังสมการที่ (31) และ (32) ทำให้สูญเสียปริมาณ OH^{\cdot} (ถัดมา, 2545; Behnajady, et al. 2004; Muraganandham et al. 2005 and Behnajady)



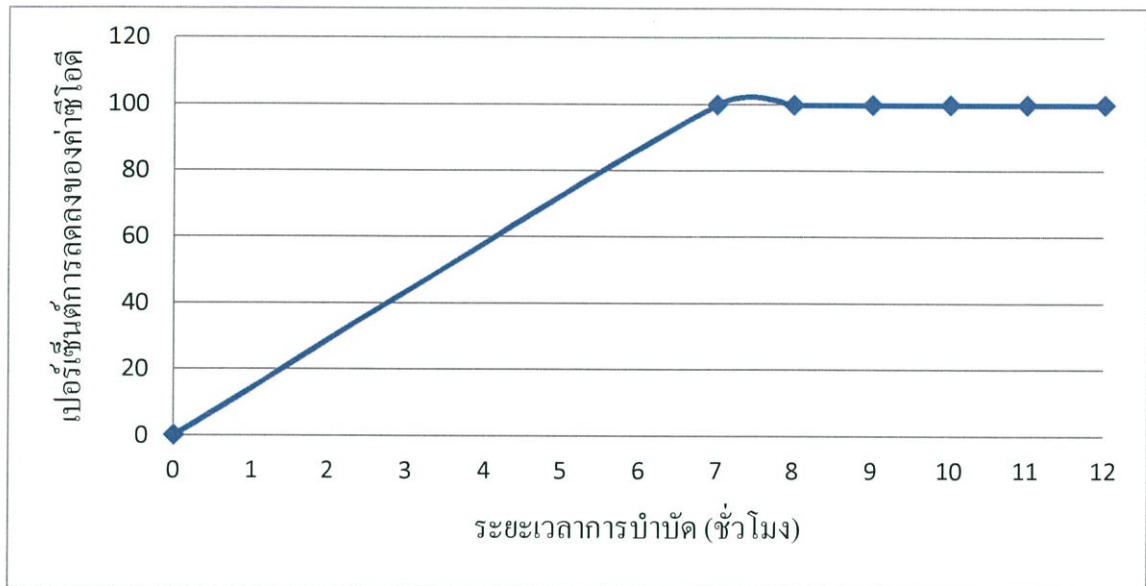
4.5 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 4.2 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะการบำบัดที่เป็นเบส โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร มีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงนำน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารมาปรับพีเอช และใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดังกล่าว จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารอินทรีย์จากพารามิเตอร์ทั้งสอง คือ ซีไอดี และทีไอซี แล้วเปรียบเทียบในระยะเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ถึง 4.16



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร กับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14

จากรูปที่ 4.15 อธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ทำงานร่วมกับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสภาวะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี เท่ากับร้อยละ 96.52 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดี เป็น 1548.30 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการ บำบัดค่าซีไอดีลดลงเหลือ 55.87 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตรทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร กับระยะเวลาการบำบัดที่พีเอช 13-14

จากรูปที่ 4.16 อธิบายได้ว่าที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ทำงานร่วมกับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสภาวะเบส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี เท่ากับร้อยละ 99.66 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของค่าซีไอดีเป็น 1502.73 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการบำบัด ค่าซีไอดีลดลงเหลือ 5.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองนี้ พบว่า ที่ระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 7 ชั่วโมง ส่งผลต่อการบำบัดมากที่สุดโดยมีแนวโน้มการลดลงสูงสุด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวซึ่งศึกษาได้จากกราฟแสดงแนวโน้มร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี และที่ซีไอดี ที่มีค่าลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งค่าได้นั้นลดลงมากที่สุดในช่วงที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกับชั่วโมงเริ่มต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส ออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ ในการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองทั้ง 3 สภาวะคือ สภาวะที่เป็นกรด สภาวะที่เป็นกลาง และสภาวะที่เป็นเบส โดยใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันคือ 3 4 5 และ 6 กรัมต่อลิตร แล้วทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยเริ่มจากชั่วโมงที่ 7 เป็นต้นไป จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์อยู่ในช่วงพีเอช 13 ถึง 14 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นเบส ซึ่งมีร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์สูงที่สุด โดยที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 กรัมต่อลิตร พบว่า มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและค่าทีไอซี คือร้อยละ 67.02 และ 90.68 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร พบว่า มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและค่าทีไอซี คือร้อยละ 79.69 และ 94.23 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อลิตร พบว่า มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและค่าทีไอซี คือร้อยละ 60.29 และ 90.81 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 กรัมต่อลิตร พบว่า มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี และค่าทีไอซี คือร้อยละ 58.04 และ 89.31 ตามลำดับ

ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร ส่งผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์มากที่สุด โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ ระยะเวลาการทดลอง 9 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมที่ทำปฏิกิริยาร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ จากการทดลองบำบัดน้ำเสียที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้ความเข้มข้นที่บำบัดดีที่สุด คือ 4 กรัมต่อลิตร ทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 5 10 15 และ 20 มิลลิโมลต่อลิตร ทำในสภาวะที่เป็นเบส พบว่า ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 มิลลิโมลต่อลิตร ส่งผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์มากที่สุด โดยระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ ที่ระยะเวลาการทดลอง 7 ชั่วโมง โดยร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีและค่าทีไอซี คือร้อยละ 96.52 และ 99.66 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาและพิสูจน์คุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสด้วยการทดลองบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียชนิดอื่นๆ เช่น สีข้อม (กาญจนา และนงนุช, 2553)

5.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยการผสมกับโลหะอื่นๆ ร่วมด้วย

5.2.3 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์ตัวอื่นๆนอกจากไทเทเนียมไดออกไซด์

5.2.4 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ความเข้มของแสงจากหลอดยูวีที่กำลังวัตต์ต่างๆในการบำบัดต่อการใช้ไทเทเนียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมและภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2542. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ. 499 หน้า.
- กาญจนา ถือพงษ์และนางนุช ศศิธร. 2553. **การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตาไลติกร่วมกับกระบวนการดูดซับ**. คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลมทร. 72 หน้า.
- ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิภม. 2548. **การบำบัดน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์**. ปรินญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 61 หน้า.
- ชลลดา ชีรการณวงศ์. 2554. **ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์**. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 6(1): 62-73.
- ชวิศรี ทรัพย์เมธากุล. 2549. **การปรับแต่งผิวหน้าของไททานเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง**. ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 125 หน้า.
- ณัฐดี เทียนผ่องใส, ปรานทิพย์ ทองอุดม และศิริรัตน์ โพธิ์ พิมพ์. 2551. **การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. ปรินญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 51 หน้า.
- บริษัท แอร์ ปิคนิก จำกัด. ม.ป.ป. **ไทเทเนียมไดออกไซด์คืออะไร**. [Online]. แหล่งที่มา: http://www.thaiairpure.com/index.php?route=information/info&info_id=8. วันที่สืบค้นข้อมูล: 1 ตุลาคม 2556.
- พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และ อภิชน วัชรนทรวิงศ์. ม.ป.ป. **พฤติกรรมการณ์การดูดซับโครเมียม (VI) บนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์**. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย (1): 87-95.
- มันสิน ตัลฑุทเวสน์. 2543. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มานพ ขลังวิเชียร. 2550. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 73 หน้า.

ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. การกำจัดสีรีแอกทีฟเอลโด 17 และสีรีแอกทีฟบลู19 ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วุทธินันท์ ศิริพงษ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 100 หน้า.

แสวง เกิดประทุม. สารประกอบอินทรีย์ในน้ำ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. [Online]. แหล่งที่มา:<http://www.tistr.or.th/ed/images/stories/engineer/article/organiccomponentinwater.pdf>. วันที่สืบค้นข้อมูล: 28 กันยายน 2556.

ธีรวิทย์ ปู่ฟ้า. 2544. กระบวนการบำบัดขั้นต้นโดย UV/H₂O₂ สำหรับสารซักล้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรุณี คงศักดิ์ไพศาล. 2552. เคมีวิเคราะห์ 1. กรุงเทพฯ: โครงการตำรา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Aleboye, Azam, Yasser Moussa and Hamid Aleboye. 2004. The effect of operational parameters on UV/H₂O₂ decolorisation of Acid Blue 74. **Dyes and Pigments** 2005 (66): 129-134.

Behnajady, M.A., N. Modirshahla and M. Shokri. 2003. Photodestruction of Acid Orange 7 (AO7) in aqueous solution by UV/H₂O₂: influence of operational parameters. **Chemosphere** 2004 (55): 129-134.

Costa, A.P. Francisco, Edson M. dos Reis, Julio C.R. Azeveco and Jorge Nozaki. 2004. Bleaching and photodegradation of textile dyes by H₂O₂ and solar or ultraviolet radiation. **Solar Energy** 2004 (77): 29-35.

Kuo, W.S. and P.H. Ho. 2000. Solar photocatalytic decolorization of methylene blue in water.

Chemosphere 2001 (45): 77-83.

Muruganandham, M. and M. Swaminathan. 2003. Photochemical oxidation of reactive azo dye

with UV- H_2O_2 process. **Dyes and Pigments** 2003 (62): 269-275.

Villanueva, Susana Flores and Susana Silva Martinez. 2007. TiO_2 -assisted degradation of acid

orange 7 textile dye under solar light. **Solar energy materials and solar cells** 2007 (91):

1492-1495.

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมประเภทต่างๆที่ลักษณะน้ำเสียมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ ซึ่งอุตสาหกรรมแต่ละประเภทมีปริมาณน้ำเสียไม่เท่ากันแสดงในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ประเภทโรงงาน	พีเอช (pH)	ของแข็ง แขวนลอย (SS)	บีโอดี (BOD)	ซีโอดี (COD)	ทีเคเอ็น (TKN)	น้ำมันและ ไขมัน	สี (Color) (Pt-Co)
โรงงานฟอกหนัง	6.67-8.64	1,027-4,361	958-4,200	2,433-8,100	215-644	-	-
โรงงานฟอกย้อม	8.20-9.10	43-140	110-400	300-1,200	-	400-670	-
โรงงานผลิตแป้งมัน สำปะหลัง	5.10-7.40	999-15,710	2,575-19,500	6,046-52,399	-	-	-
โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	6.70-7.50	276-2,190	415-1,500	1,001-5,180	-	-	-
โรงงานผลิตกระดาษกราฟท์	5.80-9.00	165-1,500	474-1500	176-3,000	-	-	-
โรงงานฆ่าสัตว์	-	500-700	490-2,950	890-7,800	110-588	-	14-218
โรงงานผลิตกระป๋อง	-	1,548-2,233	3,900-7,313	5,072-10,569	479-890	-	380-3,019

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542

ตารางที่ ก-2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารที่ยังไม่ผ่านการบำบัด

ครั้งที่	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์			
	พีเอช	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ทีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	11.39	1858.00	1994.88	1808.65
2	11.56	1646.00	1915.38	1809.00
3	12.32	1739.00	1894.32	1797.95
4	13.02	1841.00	1914.00	1854.35
5	11.97	1784.00	2027.11	1885.40



ภาพที่ ก-1 ลักษณะสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารที่ยังไม่ผ่านการบำบัด



ภาพที่ ก-2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร
ที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลเบื้องต้นของน้ำเสียตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์

ตารางที่ ข-1 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	31.0	31.0	30.0	29.0	29.0	31.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	30.0
7	35.0	35.0	34.0	35.0	35.0	36.0	34.0	33.0	34.0	35.0	35.0	35.0
8	36.0	36.0	34.0	35.0	34.0	34.0	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	35.0
9	37.0	37.0	36.0	35.0	35.0	34.0	35.0	35.0	33.0	36.0	36.0	36.0
10	37.0	35.0	35.0	35.0	35.0	36.0	36.0	36.0	36.0	34.0	33.0	35.0
11	36.5	35.0	36.0	37.5	37.5	38.0	36.0	36.0	35.5	37.0	37.5	37.0
12	37.5	37.5	34.0	35.0	35.0	35.0	35.5	35.0	34.0	36.0	36.0	36.0

ตารางที่ ข-2 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.5	30.0
7	35.0	35.0	34.0	33.0	33.5	32.0	35.0	35.0	35.0	34.0	34.5	34.0
8	35.0	35.5	32.0	33.0	33.0	34.0	30.0	35.0	36.0	36.0	36.0	35.0
9	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	34.5	35.0	35.0	36.0	36.5	36.5	37.0
10	36.5	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	34.0	33.5	35.0	36.0	35.0	36.0
11	35.5	36.5	36.0	36.0	36.0	36.5	35.5	34.5	36.5	34.5	35.0	35.0
12	37.0	37.0	36.0	36.5	36.5	36.5	37.0	37.0	36.5	36.0	36.0	36.0

ตารางที่ ข-3 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	29.0	29.0	29.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0
7	35.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
8	36.0	36.0	34.5	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	34.0	36.0	36.0	36.5
9	35.0	35.0	35.0	36.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
10	37.5	36.0	35.5	36.0	36.0	36.0	35.5	35.5	36.0	36.0	36.5	36.0
11	37.0	37.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	35.0	34.0	34.0	34.0	35.0
12	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5	36.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.5

ตารางที่ ข-4 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.5	31.0
7	35.0	35.0	36.0	33.0	33.5	32.0	35.0	35.5	35.0	34.0	34.5	34.0
8	35.0	35.5	35.0	33.0	33.0	36.0	30.0	35.0	36.0	36.0	36.0	35.0
9	36.0	35.0	36.0	35.0	35.0	34.5	35.0	35.0	36.0	36.5	36.5	37.0
10	36.5	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	34.0	34.5	35.0	36.0	35.0	36.0
11	36.5	36.5	36.0	36.0	36.0	36.5	35.5	34.5	36.5	35.5	35.0	35.0
12	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5	36.5	37.0	37.0	36.5	36.0	36.0	36.0

ตารางที่ ข-5 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	29.0	29.0	29.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0
7	35.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
8	36.0	36.0	34.5	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	34.0	36.0	36.0	36.5
9	35.0	35.0	35.0	36.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
10	37.5	36.0	35.5	36.0	36.0	36.0	35.5	35.5	36.0	36.0	36.5	36.0
11	37.0	37.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	35.0	34.0	34.0	34.0	35.0
12	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5	36.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.5

ตารางที่ ข-6 ค่าอุณหภูมิภายในระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.5	31.0
7	35.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
8	36.0	36.0	34.5	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	34.0	36.0	36.0	36.5
9	36.0	36.0	36.0	36.5	36.5	36.0	35.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.5
10	36.0	36.0	34.5	36.0	36.0	36.0	35.0	35.0	34.0	36.0	36.0	36.5
11	35.0	35.0	35.0	36.0	35.5	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
12	36.5	35.0	36.0	37.5	37.5	38.0	36.0	36.0	35.5	37.0	37.5	37.0

ตารางที่ ข-7 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	31.0	31.0	30.0	29.0	29.0	31.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	30.0
7	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.0	30.5	30.5	30.5
8	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0
9	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0
10	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0
11	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0
12	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	30.0	30.0	30.0	32.0	32.0	32.0

ตารางที่ ข-8 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.5	30.0
7	31.0	31.0	31.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0
8	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
9	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
10	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0
11	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
12	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	29.0	29.0	29.0

ตารางที่ ข-9 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	29.0	29.0	29.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0
7	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
8	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
9	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0
10	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0
11	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0
12	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0

ตารางที่ ข-10 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.5	31.0
7	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.0	30.5	30.5	30.5
8	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0
9	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0
10	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0
11	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
12	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0

ตารางที่ ข-11 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	29.0	29.0	29.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0
7	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0
8	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0
9	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0
10	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
11	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0
12	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0

ตารางที่ ข-12 ค่าอุณหภูมิภายนอกระหว่างการทดลองของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.5	31.0
7	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
8	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0
9	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
10	30.0	30.0	30.0	31.0	31.0	31.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0
11	29.0	29.0	29.0	29.5	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0
12	29.0	29.0	29.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	31.0

ตารางที่ข-13 ค่าพีเอชของน้ำเสี้ยวตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	1.92	1.92	1.94	1.96	1.96	1.93	1.94	1.96	1.95	1.87	1.89	1.91
7	1.90	1.89	1.90	1.91	1.90	1.90	1.89	1.88	1.85	1.84	1.83	1.81
8	1.81	1.90	1.78	1.87	1.87	1.83	1.78	1.77	1.80	1.83	1.85	1.70
9	1.83	1.85	1.69	1.84	1.63	1.63	1.78	1.60	1.65	1.68	1.72	1.67
10	1.81	1.80	1.77	1.86	1.88	1.91	1.77	1.57	1.73	1.78	1.76	1.74
11	1.83	1.85	1.70	1.71	1.75	1.83	1.64	1.62	1.45	1.74	1.77	1.65
12	1.77	1.82	1.70	1.66	1.68	1.57	1.54	1.65	1.48	1.49	1.41	1.45

ตารางที่ ข-14 ค่าพีเอชของน้ำเสี้ยวตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	7.48	7.46	7.49	6.93	7.43	7.07	7.42	7.08	6.88	6.97	6.56	6.98
7	7.54	6.99	7.09	7.46	7.46	6.99	6.93	6.59	6.54	7.21	6.71	6.81
8	6.97	6.74	6.55	6.03	6.56	6.78	6.45	6.36	6.68	6.66	6.45	6.95
9	6.49	7.02	6.70	5.97	6.88	6.11	6.43	6.31	4.89	6.04	5.89	6.01
10	7.32	7.03	7.05	5.63	6.48	6.05	6.29	6.19	6.32	6.44	6.19	6.35
11	6.62	6.86	6.80	6.13	6.47	5.78	5.96	6.37	6.09	5.73	4.88	6.03
12	6.63	6.83	5.89	5.44	5.39	6.01	5.77	5.43	6.12	5.93	5.99	5.51

ตารางที่ ข-15 ค่าพีเอชของน้ำเสี้ยวตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	13.03	13.08	13.08	13.13	13.12	13.08	13.09	13.35	13.34	13.65	13.45	13.23
7	12.98	12.87	13.05	12.67	12.98	12.78	12.94	12.94	13.03	13.02	12.98	12.78
8	12.91	12.89	12.98	12.78	12.38	12.84	12.90	12.85	12.09	12.42	12.23	12.45
9	12.76	12.45	12.75	13.13	13.14	12.86	12.93	12.35	12.47	12.58	12.89	13.02
10	12.57	12.21	12.63	13.58	12.64	12.42	12.85	12.69	12.40	12.50	12.37	12.06
11	13.02	13.03	13.12	13.53	13.24	13.21	13.52	12.42	12.90	12.64	12.40	12.46
12	12.79	12.99	12.93	13.82	12.45	12.01	12.62	13.07	13.21	13.01	12.90	12.57

ตารางที่ ข-16 ค่าพีเอชของน้ำเสี้ยวตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1.80	1.82	1.84	1.96	1.91	1.91	1.94	1.96	1.95	1.83	1.79	1.91
7	1.90	1.89	1.90	1.91	1.90	1.68	1.89	1.88	1.85	1.84	1.83	1.81
8	1.71	1.90	1.97	1.87	1.77	1.83	1.78	1.74	1.80	1.83	1.85	1.70
9	1.83	1.89	1.65	1.84	1.63	1.63	1.78	1.63	1.65	1.68	1.72	1.67
10	1.81	1.80	1.88	1.86	1.88	1.91	1.77	1.87	1.73	1.78	1.76	1.74
11	1.83	1.85	1.90	1.71	1.85	1.83	1.55	1.62	1.45	1.78	1.77	1.65
12	1.77	1.82	1.70	1.66	1.68	1.57	1.54	1.65	1.48	1.57	1.78	1.55

ตารางที่ ข-17 ค่าพีเอชของน้ำเสียดัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	7.28	7.34	7.39	6.93	7.23	7.17	7.21	7.11	6.58	6.27	6.36	6.58
7	7.14	6.19	7.00	7.46	7.46	6.99	6.93	6.59	6.04	7.01	6.71	6.51
8	5.97	5.90	6.43	6.03	6.56	6.78	6.45	5.96	6.68	6.61	6.35	6.95
9	6.09	7.02	6.70	5.57	6.85	6.11	6.43	6.31	4.89	6.04	5.89	6.01
10	7.02	7.03	7.05	5.63	6.48	6.09	6.29	6.19	6.39	6.44	6.19	6.35
11	5.62	6.86	6.80	6.13	6.47	5.78	5.96	6.37	6.09	5.73	4.98	6.08
12	6.03	6.53	5.89	5.94	5.19	6.01	5.77	5.43	6.12	5.93	5.39	5.11

ตารางที่ ข-18 ค่าพีเอชของน้ำเสียดัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (g/L) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mg/L)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	12.98	12.78	12.38	12.84	12.90	12.85	12.09	12.42	13.13	13.14	12.08	13.09
7	12.75	13.13	13.14	12.86	12.93	12.35	12.47	12.58	12.57	12.21	12.63	13.58
8	12.63	13.58	12.64	12.42	12.85	12.69	12.40	12.50	13.02	13.03	13.12	13.53
9	13.08	13.13	13.12	13.08	13.09	13.35	12.85	12.09	12.42	12.23	12.98	13.12
10	12.42	12.90	12.64	12.40	12.45	12.75	12.35	12.47	12.58	12.89	12.38	12.98
11	12.94	13.03	13.02	12.98	12.78	12.78	12.69	12.40	12.50	12.37	13.14	12.38
12	12.85	12.09	12.42	12.23	12.45	12.84	12.09	12.42	12.23	12.63	13.58	12.64

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD)

กำลังความสกปรกของน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนและโรงงานอาจบอกได้จากค่าซีโอดีซึ่งเป็นค่าความต้องการของออกซิเจนทั้งหมดเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยอาศัยหลักที่ว่าสารอินทรีย์เกือบทั้งหมด(ยกเว้นสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนบางตัวเช่นเบนซีนโทลูอินและไพรีดีนจะไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยวิธีนี้) สามารถที่จะออกซิไดส์ได้โดยตัวเดิมออกซิเจนอย่างแรง (Strong Chemical Oxidant) ในสารละลายที่เป็นกรด

ดังนั้นค่าซีโอดีจึงแสดงถึงปริมาณเกือบทั้งหมดในน้ำเสียที่แบคทีเรียย่อยสลายได้ (Biodegradable Organic Compound) และที่แบคทีเรียย่อยสลายไม่ได้ (Non-Biodegradable Organic Compound) โดยปกติค่าซีโอดีจะสูงกว่าค่าบีโอดีเสมอ

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับการย้อย (Standard Potassium Dichromate Solution) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
 - ละลายโพแทสเซียมไดโครเมตซึ่งอบแห้งที่ 130 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหนัก 4.913 กรัมในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตรเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตรและเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟูริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. Sulfuric Acid with Silver Sulfate)
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO_4) 22 กรัมลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วันซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทแทนต์ (Ferrous Ammonium Sulfate Titrant; FAS) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
 - ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ (Analytical Grade Crystal) ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตรทำให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)
 - ละลาย (1,10-Phenanthroline Monohydrate, ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)) 1.485 กรัมและไอร์ออน(II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.695 กรัมในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีแบบปิด (Close Reflux, Titrimetric Method)

1. ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟูริก 20% ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
 2. หลอดย่อยสลายที่ใช้หาค่าซีโอดีมีหลายขนาดการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับค่าซีโอดีที่มีในตัวอย่างในกรณีที่ค่าซีโอดีต่ำ (< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ใช้หลอดย่อยสลายขนาด 25.150 มิลลิเมตร ถ้าค่าซีโอดีสูงใช้ตัวอย่างน้ำปริมาณน้อยจึงใช้หลอดย่อยสลายขนาดเล็ก (16.100 มิลลิเมตร) โดยปกติจะใช้หลอดมาตรฐานที่มีความจุสูงสุด 10 มิลลิลิตร (หรือขนาด 16.100 มิลลิเมตร) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุดดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำมากๆ มักจะผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างน้ำน้อยเกินไป
 3. เมื่อเลือกขนาดหลอดย่อยสลายได้แล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีตามตารางที่ค-1 โดยเติมตัวอย่างน้ำลงในหลอดแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต สำหรับการย่อยสลายแล้วค่อยๆ เติมสารละลายกรดซัลฟูริกให้เกิดชั้นกรดที่อยู่ก้นแก้วปิดฝาให้แน่นพอดีแล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี
- ข้อควรระวัง** ควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนขณะกลับหลอดไปมาและควรผสมสารละลายให้เข้ากันก่อนให้ความร้อนเพื่อป้องกันระเบิด
4. นำหลอดย่อยสลายใส่ลงในตู้อบที่ 150 องศาเซลเซียสแล้วอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมงทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
 5. เปิดฝาเทสารละลายจากหลอดย่อยสลายลงขวดรูปชมพู่เพื่อความสะดวกในการไทเทรตและใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดให้หมด
 6. ไทเทรตด้วย FAS 0.05 นอร์มัลโดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงเมื่อถึงจุดยุติ
 7. ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้งโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำใช้ปริมาตรที่เท่ากับการใช้ตัวอย่างและใช้สารละลายรีเอเจนต์ต่างๆ เหมือนกับตัวอย่าง

ตารางที่ ก-1 ปริมาณของตัวอย่างน้ำและReagent ต่างๆในหลอดย่อยสลาย

Digestion vessel	Sample (ml)	Digestion solution (ml)	H2SO4 reagent (ml)	Total final volume (ml)
Culture Tube 16 x 100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 mm	10.0	14.0	14.0	34.0
Standard 10 ml Sample	2.5	1.5	3.5	7.5

การคำนวณค่าซีโอดี(COD)

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times M \times 8,000}{\text{ลบ.นม.ตัวอย่างน้ำ}}$$

A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (มิลลิกรัม)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิกรัม)

M = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ซีโอดี (COD)

ตารางที่ ง-1 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	1789.03	1779.32	1733.49	1683.13	1672.82	1683.55	1804.30	1801.40	1809.35	1823.35	1851.87	1842.63
7	1294.90	1289.74	1297.92	1158.72	1142.40	1194.53	1289.74	1428.24	1289.74	1367.65	1263.78	1315.71
8	1172.77	1213.46	1197.17	1133.94	1125.28	1175.04	1272.43	1229.15	1225.28	1315.71	1372.80	1331.20
9	997.73	910.21	953.97	717.66	717.66	700.16	1164.02	1190.27	1207.78	1225.28	1277.79	1295.30
10	963.18	986.62	948.18	719.41	722.70	710.72	1099.74	1142.59	1125.28	1311.26	1269.50	1294.56
11	954.92	966.46	973.81	727.79	724.72	711.56	1121.24	1142.89	1134.91	1224.00	1197.17	1213.46
12	923.30	1010.74	972.43	728.62	730.86	727.24	1225.28	1240.32	1156.74	1224.00	1220.32	1231.96

ตารางที่ ง-2 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียม ไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	1735.89	1747.18	1733.53	1677.96	1672.34	1653.28	1772.63	1783.56	1783.56	1842.33	1853.88	1859.25
7	1083.15	1107.54	1115.73	1050.58	1026.14	1026.14	1158.72	1158.72	1060.80	1378.20	1452.48	1403.52
8	917.54	960.82	960.82	969.47	943.50	952.16	955.44	1073.34	1004.10	1170.58	1170.58	1042.43
9	717.66	726.24	735.66	568.88	595.14	577.63	908.88	931.84	923.52	978.13	1012.75	1030.06
10	774.28	722.32	743.50	588.84	591.52	592.35	917.57	818.50	943.50	952.16	901.46	931.84
11	773.66	776.96	752.01	589.01	591.52	592.35	876.96	927.07	918.72	881.92	901.46	866.45
12	760.86	752.16	752.16	593.66	591.37	581.85	943.50	952.16	986.78	883.74	890.23	901.46

ตารางที่ ง-3 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียม ไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
0	1555.33	1564.21	1552.87	1532.96	1511.48	1523.47	1700.01	1707.58	1704.23	1759.35	1748.45	1766.97
7	944.70	944.70	920.27	891.57	908.88	891.57	839.63	830.98	926.19	1011.84	1028.16	1060.80
8	806.26	879.55	871.41	734.40	750.72	734.40	926.20	908.88	882.91	718.27	776.74	751.68
9	510.70	519.36	510.70	297.57	315.07	315.07	701.57	709.92	693.22	891.57	891.57	865.60
10	539.08	520.15	515.62	301.26	320.33	312.45	599.04	615.68	599.04	779.04	805.01	830.98
11	518.27	527.64	512.51	322.14	322.14	312.45	608.18	605.95	619.67	723.84	757.12	732.16
12	516.82	518.14	529.09	315.07	320.33	320.33	615.68	608.18	615.68	824.70	809.27	813.44

ตารางที่ ง-4 ค่าซีโอดีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง
0	1767.28	29.66	17.12	0.00	1679.83	6.08	3.51	0.00	1805.02	4.02	2.42	0.00	1839.28	14.55	8.40	0.00
7	1294.19	4.14	2.39	26.77	1165.22	26.67	15.40	30.63	1335.91	79.96	46.16	25.99	1339.90	29.52	17.04	27.15
8	1194.47	20.48	11.82	32.41	1144.75	26.58	15.35	31.85	1242.29	26.18	15.12	31.18	1315.71	51.94	29.99	28.47
9	953.97	43.76	25.26	46.02	711.82	10.10	5.83	57.63	1187.36	22.02	12.71	34.22	1283.63	10.11	5.84	30.21
10	965.99	19.37	11.18	45.34	717.61	6.19	3.57	57.28	1122.39	21.56	12.45	37.82	1281.28	57.64	33.28	30.34
11	965.06	9.52	5.49	45.39	721.36	8.62	4.98	57.06	1133.01	10.95	6.32	37.23	1211.54	13.52	7.81	34.13
12	968.82	43.83	25.31	45.18	728.91	1.83	1.06	56.61	1207.45	44.55	25.72	33.11	1225.43	5.95	3.44	33.37

ตารางที่ ง-5 ค่าซีโอดีของน้ำเสี้ยวตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง
0	1738.87	7.30	4.21	0.00	1667.86	12.94	7.47	0.00	1779.92	6.31	3.64	0.00	1851.82	8.65	4.99	0.00
7	1102.14	16.95	9.79	36.62	1034.29	14.11	8.15	37.99	1126.08	56.53	32.64	36.73	1411.40	37.76	21.80	23.78
8	946.39	24.99	14.43	45.57	955.04	13.22	7.64	42.74	1024.29	42.70	24.65	42.45	1127.86	73.99	42.72	39.09
9	726.58	9.00	5.20	58.22	580.55	13.37	7.72	65.19	921.41	11.62	6.71	48.23	1006.98	26.44	15.27	45.62
10	746.70	26.13	15.09	57.06	590.90	1.83	1.06	64.57	893.19	65.97	38.08	49.81	928.49	25.52	14.73	49.86
11	767.54	13.55	7.82	55.86	590.96	1.74	1.00	64.57	907.58	26.85	15.50	49.01	883.23	17.54	10.13	52.30
12	755.06	5.02	2.90	56.58	588.96	6.26	3.61	64.69	960.81	22.90	13.22	46.02	891.81	8.97	5.18	51.84

ตารางที่ ง-6 ค่าซีไอของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง
0	1557.47	5.97	3.45	0.00	1522.64	10.76	6.21	0.00	1703.94	3.79	2.19	0.00	1758.26	9.31	5.38	0.00
7	936.56	14.10	8.14	39.87	897.34	9.99	5.77	41.07	865.60	52.65	30.40	43.15	1033.60	24.93	14.39	41.21
8	852.41	40.17	23.19	45.27	739.84	9.42	5.44	51.41	906.00	21.79	12.58	40.50	901.46	8.76	5.06	48.73
9	513.59	5.00	2.89	67.02	309.24	10.10	5.83	79.69	701.57	8.35	4.82	53.92	882.91	14.99	8.65	49.79
10	524.95	12.44	7.18	66.29	311.35	9.58	5.53	79.55	604.59	9.61	5.55	60.29	805.01	25.97	14.99	54.22
11	519.47	7.64	4.41	66.65	318.91	5.59	3.23	79.06	611.27	7.36	4.25	59.85	737.71	17.32	10.00	58.04
12	521.35	6.74	3.89	66.53	318.58	3.04	1.76	79.08	613.18	4.33	2.50	59.73	815.80	7.98	4.61	53.60

ตารางที่ ง-7 ค่าซีโอดีของน้ำเสยตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13ถึง14

ชั่วโมงที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลต่อลิตร)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1548.50	1552.40	1544.00	1491.20	1490.00	1493.80	1695.40	1697.80	1688.20	1712.40	1714.80	1722.40
7	54.40	54.40	52.80	49.60	49.60	49.60	56.00	57.60	60.01	60.01	62.80	59.20
8	54.40	54.40	59.20	52.80	52.80	49.60	59.00	65.60	61.50	62.80	66.95	59.20
9	56.00	56.00	55.19	54.04	56.20	52.80	64.40	61.50	57.60	59.20	65.60	67.20
10	55.19	57.60	59.20	54.60	54.60	59.20	59.20	65.60	56.00	65.60	60.10	54.40
11	52.80	54.40	54.40	52.80	54.54	54.54	56.00	57.60	60.01	60.01	62.80	59.20
12	59.80	50.10	52.80	50.55	52.80	56.00	60.10	59.20	54.40	64.82	60.10	60.10

ตารางที่ ง-8 ค่าซีไอคิของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆที่พีเอช 13ถึง14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลต่อลิตร)															
	4 : 5				4 : 10				4 : 15				4 : 20			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง
0	1548.30	5.28	3.05	0.00	1491.67	1.94	1.12	0.00	1693.80	5.00	2.89	0.00	1716.53	5.22	3.01	0.00
7	55.87	0.92	0.53	96.52	49.60	0.00	0.00	96.67	57.87	2.02	1.17	96.58	60.70	1.87	1.08	96.46
8	56.00	2.77	1.60	96.38	51.73	1.85	1.07	96.53	62.03	3.33	1.92	96.34	62.98	3.88	2.24	96.33
9	55.73	0.47	0.27	96.40	54.35	1.72	0.99	96.36	61.17	3.41	1.97	96.39	64.00	4.23	2.44	96.27
10	57.33	2.02	1.17	96.29	56.13	2.66	1.54	96.24	60.27	4.89	2.82	96.44	60.03	5.60	3.23	96.50
11	55.87	0.92	0.53	96.52	53.96	1.00	0.58	96.38	57.87	2.02	1.17	96.58	60.70	1.87	1.08	96.46
12	54.23	5.01	2.89	96.49	53.12	2.74	1.58	96.44	57.90	3.06	1.77	96.58	61.67	2.73	1.58	96.41

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ที่ไอซี (Total Organic Carbon, TOC)

ค่าที่ไอซีคือปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียหาได้โดยการพ่นตัวอย่างน้ำเสียปริมาณหนึ่งเข้าในเตาอุณหภูมิสูงให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาได้โดยใช้แสงอินฟราเรดคาร์บอนในสารอินทรีย์บางชนิดจะไม่สลายตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนดังนั้นค่าที่ไอซีที่วัดได้จะต่ำกว่าปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่จริง (Theoretical Organic Carbon: TOC) เล็กน้อยการหาค่าที่ไอซีนิยมใช้กันมากเพราะสามารถหาได้รวดเร็วและค่าที่หาได้ใกล้เคียงกับค่าบีโอดี

ขั้นตอนการทดลอง

1) การทำ Calibration Curve ของปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (TC)

1.1 นำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต 1000 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (mgC/L) ใส่ในหลอดแก้วสำหรับวิเคราะห์ TC จำนวน 3 หลอด

1.2 เลือกช่วงการเจือจางและดำเนินการทดลองโดยป้อนคำสั่งให้เครื่องวัด TOC ตามคู่มือการใช้เครื่องตามความเหมาะสมและบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง

1.3 สำหรับการทำให้ Calibration Curve ของสารอินทรีย์ (IC) ให้ทำการทดลองด้วยวิธีเดียวกันนี้แต่เปลี่ยนมาใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร (mgC/L) แทนสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

1.4 สำหรับการทำให้ Calibration Curve ของ NPOC ให้ทำการทดลองด้วยวิธีเดียวกับ TC แต่ต้องมีการเติมกรดเพิ่มลงไป

2) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

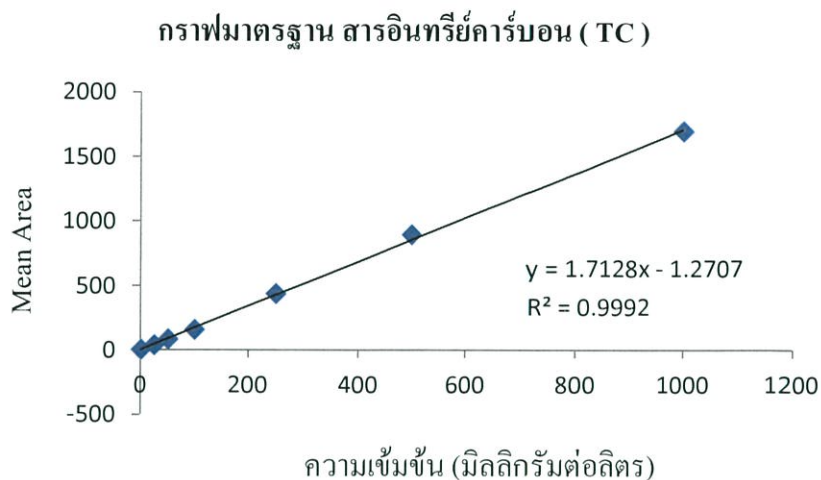
2.1 ให้นำตัวอย่างสารอินทรีย์มาทำการวิเคราะห์โดยเลือก Mode (TC, IC, NPOC) ในการวิเคราะห์ดำเนินการทดลองโดยป้อนคำสั่งให้เครื่องวัด TOC ตามคู่มือการใช้เครื่อง

2.2 ในการทดลองทุกครั้งต้องทำแบลนด์ของน้ำกลั่นด้วย

ภาคผนวก ฉ

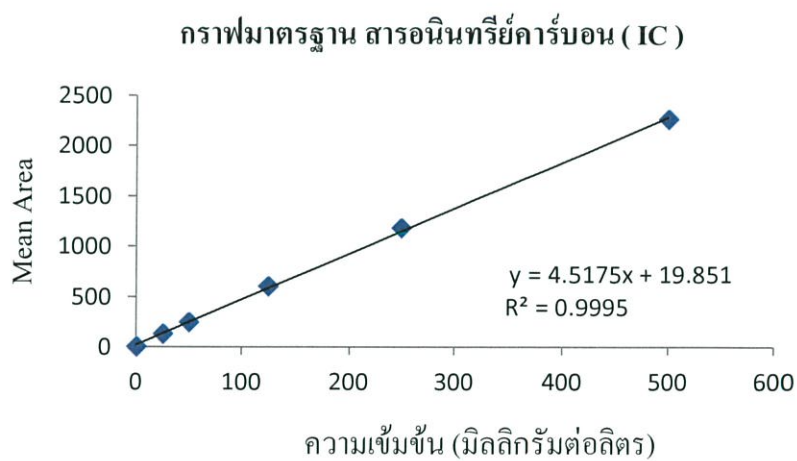
ผลการวิเคราะห์ที่ไอซี (TOC)

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Mean Area
0.00	0.00
25.00	36.71
50.00	79.59
100.00	153.00
250.00	434.30
500.00	890.70
1000.00	1694.00



รูปที่ ๑-1 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมพทาเลตที่ใช้ในการทำกราฟมาตรฐานที่ไอซี

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Mean Area
0.00	0.00
25.00	128.90
50.00	240.70
125.00	602.10
250.00	1179.00
500.00	2260.00



รูปที่ ๑-2 กราฟมาตรฐานสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตร่วมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต
ที่ใช้ในการทำกราฟมาตรฐานที่ไอซี

ผลการวิเคราะห์ที่โอซี (TOC)

ตารางที่ ฉ-1 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1789.10	1785.25	1793.55	1692.75	1699.20	1689.26	1811.30	1808.65	1815.40	1854.35	1840.95	1859.00
7	507.50	511.25	505.20	484.50	471.85	493.65	445.50	462.30	505.00	524.00	478.15	493.60
8	455.55	453.85	473.45	389.20	393.35	372.45	463.05	464.80	460.70	480.55	488.10	479.60
9	368.30	349.10	347.65	302.40	300.15	309.50	457.70	457.79	455.95	476.00	473.45	491.50
10	360.25	359.20	355.20	306.75	309.55	310.90	410.25	407.10	406.60	455.15	460.10	452.95
11	356.15	356.15	362.55	308.85	305.45	309.15	418.85	402.70	429.55	427.65	433.95	435.75
12	345.25	368.20	361.70	306.60	307.80	308.40	419.80	410.95	425.15	429.05	452.85	434.40

ตารางที่ จ-2 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1745.75	1757.35	1743.49	1687.84	1681.93	1669.05	1786.33	1798.40	1781.07	1854.95	1855.04	1876.45
7	375.25	360.15	372.60	385.05	381.45	377.75	388.35	390.00	382.60	379.70	365.65	381.75
8	366.15	375.25	373.55	352.53	341.05	344.00	373.55	373.60	365.65	366.15	355.00	352.20
9	320.75	321.45	320.00	281.10	273.50	270.15	352.55	351.90	351.90	348.10	348.40	349.30
10	322.85	325.25	320.05	286.40	287.40	273.05	341.95	339.90	340.15	369.90	372.05	335.85
11	320.80	319.65	325.89	285.45	286.05	288.60	351.35	332.75	346.00	340.28	342.90	350.85
12	319.95	325.35	327.55	284.40	279.58	285.02	350.25	348.10	344.15	353.35	342.15	342.35

ตารางที่ ๓-3 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)											
	3			4			5			6		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1564.35	1562.10	1571.00	1567.85	1549.02	1463.17	1703.56	1713.15	1709.35	1768.93	1759.45	1771.50
7	295.30	301.50	309.10	311.50	314.10	304.25	341.45	334.10	348.60	312.20	304.05	310.40
8	180.15	187.75	173.45	198.95	187.75	189.30	300.60	298.30	299.65	299.55	305.15	311.00
9	147.40	143.75	146.60	95.35	77.9	91.05	216.30	217.95	227.40	313.85	316.60	299.25
10	150.05	142.60	146.60	89.90	89.90	90.10	156.25	155.70	158.85	294.70	290.85	299.75
11	151.75	150.10	144.50	91.20	90.10	88.00	159.50	159.20	155.70	189.70	187.75	189.30
12	147.30	147.30	146.25	86.05	89.72	95.15	158.85	156.95	158.80	190.55	189.30	190.55

ตารางที่ ๓-4 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 1 ถึง 2

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง
0	1789.30	4.15	2.40	0.00	1693.73	5.04	2.91	0.00	1811.78	3.40	1.96	0.00	1851.43	9.37	5.41	0.00
7	507.98	3.05	1.76	71.61	483.33	10.95	6.32	71.46	470.93	30.68	17.71	74.01	498.58	23.33	13.47	73.07
8	460.95	10.86	6.27	74.24	385.00	11.07	6.39	77.27	462.85	2.06	1.09	74.45	482.75	4.66	2.69	73.93
9	355.01	11.53	6.66	80.16	304.01	4.88	2.82	82.05	457.14	1.04	0.60	74.77	480.31	9.77	5.64	74.06
10	358.22	2.66	1.54	79.98	309.07	2.12	1.22	81.75	407.98	1.98	1.14	77.48	456.06	3.66	2.11	75.37
11	358.28	3.70	2.13	79.98	307.82	2.06	1.19	81.83	417.03	13.52	7.80	76.98	432.45	4.25	2.46	76.64
12	358.38	11.83	6.83	79.97	307.60	0.92	0.53	81.84	418.63	7.17	4.14	76.89	438.77	12.49	7.21	76.30

ตารางที่ ๓-5 ค่าที่ไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 6.5 ถึง 7.5

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง
0	1748.86	7.44	4.29	0.00	1679.60	9.61	5.55	0.00	1788.60	8.89	5.13	0.00	1862.14	12.39	7.15	0.00
7	369.33	8.06	4.65	78.88	381.41	3.65	2.10	77.29	386.98	3.88	2.24	78.36	375.70	8.76	5.06	79.82
8	371.65	4.84	2.79	78.75	345.86	5.96	3.44	79.41	370.93	4.58	2.64	79.26	357.78	7.38	4.26	80.79
9	320.73	0.73	0.42	81.66	272.70	5.60	3.23	83.76	352.11	0.38	0.22	80.31	348.60	0.62	0.36	81.28
10	322.72	2.60	1.50	81.55	282.28	8.01	4.63	83.19	340.66	1.12	0.65	80.95	373.36	4.28	2.47	79.95
11	322.11	3.32	1.92	81.58	286.70	1.67	0.97	82.92	343.37	9.58	5.53	80.80	344.68	5.50	3.18	81.49
12	324.28	3.91	2.26	81.46	283.00	2.98	1.72	83.15	347.50	3.09	1.79	80.57	345.95	6.41	3.70	81.42

ตารางที่ ๑-6 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร)															
	3				4				5				6			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/√n	%การ ลดลง
0	1565.81	4.69	2.71	0.00	1526.68	55.11	31.82	0.00	1708.68	4.83	2.79	0.00	1766.62	6.35	3.66	0.00
7	301.96	6.91	3.99	80.72	309.95	5.11	2.95	79.70	308.88	4.28	2.47	81.92	341.38	7.25	4.19	80.68
8	180.45	7.15	4.13	88.48	192.00	6.07	3.50	87.42	299.51	1.16	0.67	82.47	305.23	5.73	3.30	82.72
9	145.92	1.92	1.11	90.68	88.10	9.09	5.25	94.23	220.55	5.99	3.46	87.09	309.90	9.33	5.38	82.46
10	146.42	3.73	2.15	90.65	89.97	0.12	0.07	94.11	156.93	1.68	0.97	90.81	295.10	4.46	2.58	83.30
11	148.78	3.80	2.19	90.50	89.77	1.63	0.94	94.12	158.13	2.11	1.22	90.75	188.91	1.03	0.59	89.31
12	146.95	0.61	0.35	90.61	90.31	4.58	2.64	94.08	158.20	1.08	0.63	90.74	190.13	0.72	0.42	89.24

ตารางที่ ๗-7 ค่าที่โอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลต่อลิตร)											
	4 : 5			4 : 10			4 : 15			4 : 20		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0	1504.35	1502.10	1501.75	1487.85	1479.10	1477.15	1665.50	1670.15	1679.35	1708.90	1700.10	1702.50
7	5.45	4.80	4.80	1.13	2.05	1.15	5.10	5.50	6.01	7.80	9.67	7.75
8	5.50	5.00	5.15	2.10	2.15	2.50	6.10	6.50	6.85	8.80	8.60	8.60
9	5.35	5.25	5.60	1.95	2.10	2.40	6.20	6.20	6.55	9.25	9.10	9.05
10	5.40	5.35	5.35	2.05	2.20	2.40	6.90	6.85	6.85	9.08	9.05	10.00
11	5.40	6.00	6.00	2.20	2.35	2.35	6.75	7.10	7.00	9.25	9.02	9.35
12	5.10	5.55	5.80	2.00	2.05	2.15	6.70	6.90	6.95	9.20	9.00	9.60

ตารางที่ ๘-8 ค่าที่ไอซีของน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่พีเอช 13 ถึง 14

ชั่วโมง ที่	ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัมต่อลิตร) : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลต่อลิตร)															
	4 : 5				4 : 10				4 : 15				4 : 20			
	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง	Conc. เฉลี่ย (mg/L)	SD	SD/ \sqrt{n}	%การ ลดลง
0	1502.73	1.41	0.81	0.00	1481.37	5.43	3.14	0.00	1671.67	7.05	4.07	0.00	1703.83	4.55	2.63	0.00
7	5.02	0.38	0.22	99.66	1.44	0.53	0.31	99.90	5.54	0.46	0.27	99.67	8.41	1.09	0.63	99.51
8	5.22	0.27	0.16	99.65	2.25	0.22	0.13	99.85	6.48	0.38	0.22	99.61	8.67	0.12	0.07	99.49
9	5.40	0.18	0.10	99.64	2.15	0.23	0.13	99.85	6.32	0.20	0.12	99.62	9.13	0.10	0.06	99.46
10	5.37	0.03	0.02	99.64	2.22	0.18	0.10	99.85	6.87	0.03	0.02	99.60	9.38	0.54	0.31	99.45
11	5.80	0.35	0.20	99.61	2.30	0.09	0.05	99.84	6.95	0.18	0.10	99.58	9.21	0.17	0.10	99.46
12	5.48	0.35	0.20	99.64	2.07	0.08	0.05	99.86	6.85	0.13	0.08	99.59	9.27	0.31	0.18	99.46

ภาคผนวก ข

สูตรที่ใช้คำนวณ

ค่าเฉลี่ย (Mean)

$$\bar{x} = \frac{\sum x_1}{n}$$

\bar{x}	=	ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง
x_1	=	ผลที่ได้จากการทดลองแต่ละค่า
n	=	จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (The Sample Standard Deviation)

$$SD = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}{n - 1}$$

SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
------	---	---------------------

ระดับความเชื่อมั่น (Level of Confidence)

$$CL = \frac{SD}{\sqrt{n}}$$

CL	=	ค่าระดับความเชื่อมั่น
------	---	-----------------------

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percent removal)

$$\% \text{ความแตกต่าง} = \left| \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} \right| \times 100$$

x_1	=	ผลที่ได้จากการทดลองชั่วโมงที่ศูนย์
x_2	=	ผลที่ได้จากการทดลองแต่ละชั่วโมง

ที่มา : (อรุณี คงศักดิ์ไพไพศาล, 2552)