



รายงานโครงการวิจัย

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการออกซิเดชัน
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน

BIODIESEL WASTEWATER TREATMENT BY PHOTOCATALYTIC OXIDATION
VIA THERMAL-TREATED TiO_2 PHOTOCATALYST

โดย

นายชัยเกษม ศิริสุขพงศา

รหัสนิสิต 5832920823

นางสาวปิยพร โสเจยยะ

รหัสนิสิต 5832940823

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.แก้วลี พฤษภาทร

ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

โครงการการเรียนรู้และการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อและฉบับเต็มของงานวิจัยของนิสิตจาก รหัสนิสิตที่ส่งมาขอรับรางวัล (CUUR)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUUR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

CHULALONGKORN
UNIVERSITY
INTELLECTUAL
REPOSITORY



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน
BIODIESEL WASTEWATER TREATMENT BY PHOTOCATALYTIC OXIDATION
VIA THERMAL-TREATED TiO_2 PHOTOCATALYST

โดย

นายชัยเกษม ศิริสุขพงศา

รหัสนิสิต 5832920823

นางสาวปิยพร ไสเจยยะ

รหัสนิสิต 5832940823

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร

ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา 2306499 Senior Project
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

Title Biodiesel wastewater treatment by photocatalytic oxidation via thermal-treated TiO₂ photocatalyst

Student name Mr. Chaikasem Sirisukpongsa
Miss Piyaporn Sochoeiya

Advisor Assoc. Prof. Dr. Kejvalee Pruksathorn
Prof. Dr. Mali Hunsom

**Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Academic Year 2018**

ABSTRACT

This work aims to improve the visible light absorption property of titanium dioxide by thermal treatment process for treating biodiesel wastewater. The investigation parameters were treatment environment (H₂, N₂, and He) and treatment temperature (500 and 800 °C). It was found that the treatment temperature of 500 °C did not significantly affect the phase composition, band gap energy and crystallite size of titanium dioxide. However, the treatment temperature of 800 °C importantly affect its phase composition, band gap energy, crystallite size and visible light absorption property particularly in H₂ environment. The thermal-treated catalysts were then used to treat biodiesel wastewater. It was found that the properties of the thermal-treated catalysts affect the performance of photocatalysts for the biodiesel wastewater treatment. The titanium dioxide treated in H₂ at 800 °C (H₂-800) can achieve the highest COD reduction of 74.47%.

Keywords: TiO₂ photocatalyst; Biodiesel wastewater; Oxidation process; Heat treatment

Department of Chemical Technology Student's signature.....

Student's signature.....

Major: Chemical Engineering Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาท และศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แนวทางต่าง ๆ ข้อคิดเห็น และช่วยแก้ไขโครงการวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ในการทดลองวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนจนสำเร็จ การศึกษา รวมทั้งขอขอบพระคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือให้โครงการวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไบโอดีเซล.....	3
2.2 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล.....	3
2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	4
2.3.1 การนำมาใช้โดยตรงหรือนำมาผสม.....	4
2.3.2 ไมโครอิมัลชัน.....	5
2.3.3 ไพโรไลซิส.....	5
2.3.4 ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	5
2.4 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.4.1 การผลิตแบบกะ.....	6
2.4.2 การผลิตแบบต่อเนื่อง.....	6
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.5.1 กระบวนการทางเคมีฟิสิกส์.....	7
2.5.1.1 การดูดซับ.....	7
2.5.1.2 การปรับสภาพให้เป็นกรด.....	7
2.5.1.3 โคแอกกูเลชันหรือฟล็อกคูเลชัน.....	8
2.5.1.4 การลอยด้วยอากาศละลาย.....	8
2.5.2 กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า.....	8
2.5.2.1 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	8
2.5.2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฟฟ้า.....	8

2.5.3	กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	9
2.5.3.1	กระบวนการโอโซนชั้น.....	9
2.5.3.2	ปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน.....	9
2.5.4	กระบวนการทางชีวภาพ.....	9
2.6	ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	9
2.7	ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.7.1	โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.7.2	ข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
2.7.3	การลดข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	14
2.8	ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	14
2.8.1	การเจือด้วยธาตุโลหะและอโลหะ.....	14
2.8.2	ความเข้มแสง.....	14
2.8.3	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
2.8.4	ค่าความเป็นกรด-เบส.....	15
2.8.5	อุณหภูมิ.....	15
2.8.6	ตัวรับอิเล็กตรอน.....	15
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1	ตัวอย่างน้ำล้างไบโอดีเซลและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
3.2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
3.2.1	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	17
3.2.2	การวิเคราะห์หีสีโอดี.....	17
3.2.3	การวิเคราะห์หีบีโอดี.....	18
3.2.4	การวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน.....	18
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	18
3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.4.1	การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น.....	19
3.4.2	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	19
3.4.3	การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	20
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	21
4.1	สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	21
4.2	สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	25

4.3 การลดมลพิษด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	26
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	28
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	28
เอกสารอ้างอิง.....	29
ภาคผนวก.....	32
ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย.....	33
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย.....	34
ภาคผนวก ค มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	39

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติน้ำเสียของน้ำล้างไปโอดีเซล.....	7
2.2	ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของสารออกซิไดส์บางชนิด.....	10
4.1	สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และ X-T.....	23
4.2	สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไปโอดีเซล.....	25

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ประเภทวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล.....	4
2.2	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	5
2.3	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.4	กลไกของปฏิกิริยาเชิงแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	10
2.5	ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (a) โมเลกุลเกิดการแตกออก (b) กระบวนการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (c) การเปลี่ยนแปลงสภาพของสารอินทรีย์ที่สถานะกระตุ้น.....	11
2.6	โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคท์.....	12
2.7	การเปลี่ยนโครงสร้างจากอะนาเทสเป็นรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	13
3.1	ตัวอย่างน้ำล้างที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	17
3.2	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น.....	19
3.3	เครื่องปฏิกรณ์ฉายแสงยูวี.....	20
4.1	กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	21
4.2	ความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	24
4.3	กราฟความสัมพันธ์ Tauc ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์.....	25
4.4	ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี.....	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และการเติบโตของประชากรภายในประเทศ ในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งการขนส่งและคมนาคม การผลิตและการทำงานของเครื่องจักรล้วนต้องขับเคลื่อนได้ด้วยพลังงาน จากแนวโน้มความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นทำให้แหล่งพลังงานสำรองที่มีอยู่อาจไม่เพียงพอ จึงมีการมองหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานสำรองลง รวมถึงช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สพิษออกสู่บรรยากาศ ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีปริมาณการใช้มาก เนื่องจากไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะและเครื่องจักรที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล

อย่างไรก็ดีในการผลิตไบโอดีเซลจะก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลซึ่งจะต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอน การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า การบำบัดด้วยจุลินทรีย์ [1] แต่วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้เกิดกากตะกอนเป็นจำนวนมากและใช้เวลาในการบำบัดนาน อีกทั้งยังใช้พื้นที่ในการบำบัดมาก จึงต้องหากระบวนการบำบัดด้วยวิธีอื่น การบำบัดน้ำเสียอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบใช้แสง (Photooxidation) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ประหยัด ใช้พลังงานต่ำไม่เป็นพิษ และสามารถนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบใช้แสงที่ไม่มีพิษและมีความเสถียรสูง [2] แต่ข้อเสียของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์คือไม่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ได้ ทำให้ไม่สะดวกต่อการทำงาน โครงการวิจัยจึงสนใจศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สามารถทำงานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยการรีดิวซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไฮโดรเจน ไนโตรเจนและฮีเลียมที่อุณหภูมิสูง เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์
2. ศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงแสง

1.3 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเอกสาร ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. ศึกษาการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์
 - ตัวแปรต้น
 - ชนิดของตัวรีดิวซ์ คือ ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและฮีเลียม
 - อุณหภูมิในการรีดิวซ์ คือ 500-800 องศาเซลเซียส
 - ตัวแปรตาม
 - พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์
 - โครงสร้างผลึก
 - ความกว้างแถบพลังงาน
4. ศึกษาสัมมนตภาพของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
 - ตัวแปรต้น คือ ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน
 - ตัวแปรตาม คือ การลดลงของค่าบีโอดี ซีโอดี ไชมันและน้ำมัน
5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงานและเสนอผลงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์กรความรู้เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น
2. องค์กรความรู้เรื่องการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาความรู้ด้านอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

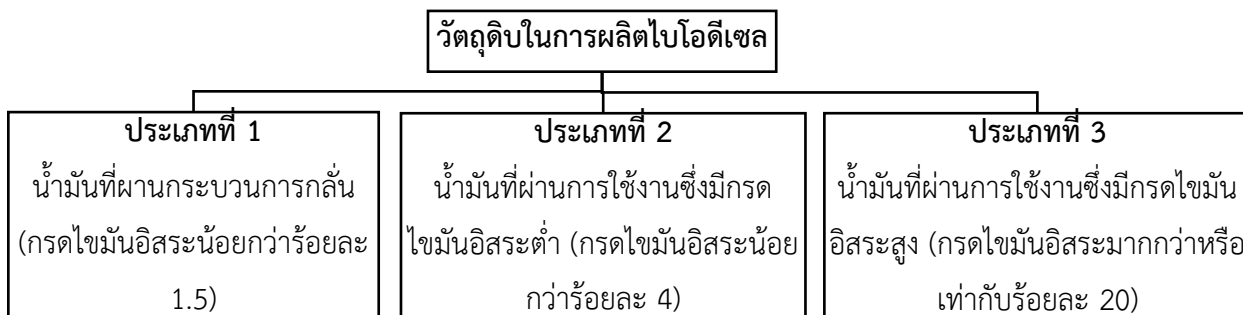
2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลจากธรรมชาติที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [3] กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ และให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์จำนวน 12 ราย มีกำลังการผลิตรวม 6.52 ล้านลิตรต่อวัน ซึ่งเน้นการผลิตเพื่อใช้ในประเทศเกือบทั้งหมด [4] ไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลมีความแตกต่างดังนี้ [5]

1. ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบทำให้ไอเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องยนต์ไม่ก่อให้เกิดฝนกรดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
2. ไบโอดีเซลไม่มีสารประกอบแอมโรมาติก แต่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลร้อยละ 10 – 12 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีองค์ประกอบเป็นสารแอมโรมาติกอยู่ร้อยละ 20 – 40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ไอเสียที่เกิดจากไบโอดีเซลมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กและมีควันดำต่ำกว่าการใช้้ำมันดีเซล
3. ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีความปลอดภัยในการเก็บรักษาและขนส่งมากกว่าน้ำมันดีเซล แต่จุดระเบิดในเครื่องยนต์ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล
4. ไบโอดีเซลมีพันธะคูในโครงสร้างโมเลกุล ขณะที่น้ำมันดีเซลไม่มี ทำให้ไบโอดีเซลไม่เสถียรเกิดออกซิเดชันได้เร็วกว่าน้ำมันดีเซล ไม่สามารถเก็บรักษาได้นาน
5. ไบโอดีเซลมีสมบัติในการหล่อลื่นดีกว่าน้ำมันดีเซล ช่วยลดการสึกหรอของเครื่องยนต์
6. ไบโอดีเซลมีค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10

2.2 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

น้ำมันพืชคือวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งชนิดของน้ำมันพืชจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเทศนั้น ๆ เช่น การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยกว่าร้อยละ 90 ใช้น้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ หรือประเทศสหรัฐอเมริกาใช้น้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันที่เหมาะสมสำหรับการบริโภค น้ำมันที่ไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภค และน้ำมันใช้แล้วหรือของเสีย ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ประเภทวัตถุประสงค์ตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล [6]

2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.3.1 การนำมาใช้โดยตรงหรือนำมาผสม

ในการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก น้ำมันพืช และแอลกอฮอล์ได้ถูกนำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการนำมาใช้โดยตรง หรือนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการใช้ น้ำมันพืชแทนน้ำมันดีเซลโดยตรงมีทั้งข้อดีและข้อเสียดังนี้ [7]

ข้อดี

1. น้ำมันพืชมีค่าความร้อนสูง ประมาณร้อยละ 80 ของค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล
2. น้ำมันพืชสามารถจัดหาได้ง่าย และเป็นทรัพยากรที่สามารถทดแทนใหม่ได้
3. น้ำมันพืชสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย

ข้อเสีย

1. น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ส่งผลให้เวลาพ่นละอองน้ำมันเข้าไปในห้องเครื่องได้ ละอองน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพในการเผาไหม้จึงลดลง
2. น้ำมันพืชสามารถระเหยเป็นไอได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล
3. น้ำมันพืชที่เผาไหม้ไม่หมดจะทำปฏิกิริยาต่อตัวกันเอง (Self-polymerization) ก่อตัวเป็นยางเหนียว เกิดอันตรายกับเครื่องยนต์ได้
4. น้ำมันพืชก่อให้เกิดโค้ก (Coke) มากเมื่อผ่านการเผาไหม้ ก่อให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด
5. น้ำมันพืชอาจไปปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จึงลดลง
6. น้ำมันพืชเสื่อมสภาพได้ง่าย และมักเกิดการปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete combustion)

2.3.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

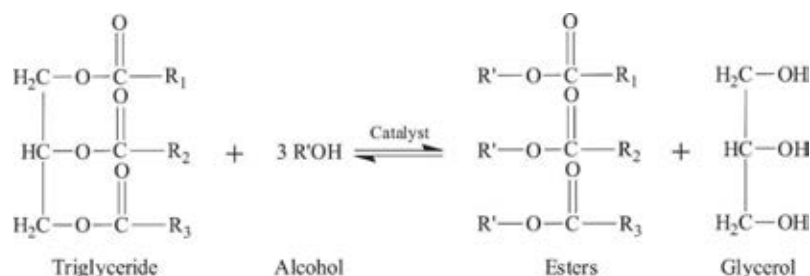
ไมโครอิมัลชันถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาน้ำมันพืชที่มีความหนืดสูง ทำโดยผสมน้ำมันพืชกับตัวทำละลายที่เหมาะสม ตัวทำละลายที่มีการศึกษาและนิยมใช้ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล และบิวทานอล ข้อเสียของวิธีการนี้คือเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และมีกากคาร์บอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก

2.3.3 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยใช้ความร้อนภายใต้ภาวะอับอากาศหรือออกซิเจน โดยอาจจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย ไบโอดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสแม้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม แต่มีค่าความร้อน และเสถียรภาพที่ต่ำกว่า นอกจากนี้อาจให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากกว่าดีเซลด้วย

2.3.4 ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์ ดังภาพที่ 2.2 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ สารประกอบเอสเทอร์ (Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) จึงใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณมากเกินพอเพื่อเลื่อนสมดุลไปทางผลิตภัณฑ์ [8]



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [9]

แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เมทานอล (Methanol) และเอทานอล (Ethanol) โดยเฉพาะเมทานอล เพราะมีราคาถูก ประกอบกับสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมี เมทานอลสามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้เร็ว และความสามารถในการละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในเมทานอลมีค่าสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ ได้แก่ เบส กรด หรือเอนไซม์ โดยนิยมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารประกอบคาร์บอเนต (Carbonate) และสารประกอบแอลคอกไซด์ (Alkoxide) ของโลหะโซเดียมหรือโพแทสเซียม ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) กรดซัลโฟนิก (RSO₃H) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

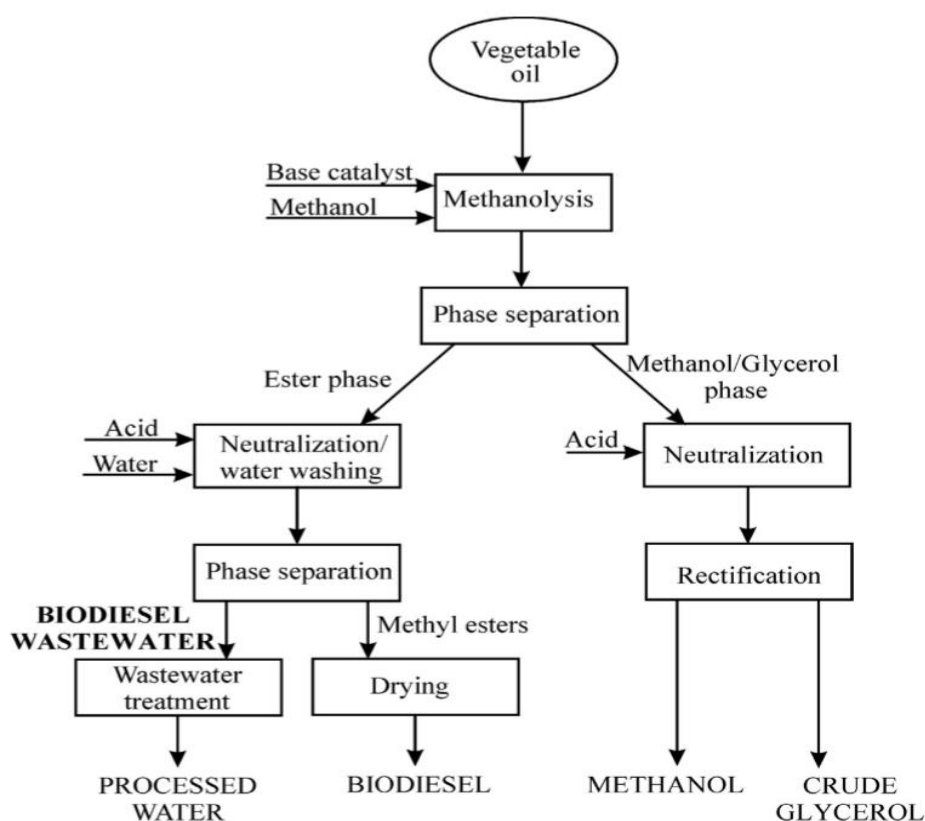
2.4 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

2.4.1 การผลิตแบบกะ (Batch process) เป็นกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง การผลิตแต่ละครั้งให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไม่มาก ซึ่งในการผลิตเชิงพาณิชย์ต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอทำได้ยาก ข้อดีของการผลิต คือใช้เงินลงทุนไม่มาก เหมาะกับการผลิตในปริมาณไม่มาก ข้อเสีย คือระบบการผลิตต้องใช้พื้นที่มาก และไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตแต่ละรอบมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

2.4.2 การผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตแบบกะ แล้วไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า ให้กำลังการผลิตมากกว่า แต่ใช้เงินลงทุนมากกว่า [10]

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นด่างมีขั้นตอน ดังภาพที่ 2.3 วิธีการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ แบบเปียก (Wet washing) และแบบแห้ง (Dry washing) โดยแบบเปียกเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารปนเปื้อน และสารเคมีที่หลงเหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล สารที่สามารถใช้ได้แก่ น้ำ กรดอินทรีย์ และตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนแบบแห้งจะใช้สารกรองเรซิน (Ion-exchange resin) หรือผงแมกนีเซียมซิลิเกต ในการกำจัดสารปนเปื้อน อย่างไรก็ตามเฉพาะการล้างแบบเปียกเท่านั้นที่จะก่อให้เกิดน้ำเสียซึ่งมีปริมาตร 0.2 ถึง 0.3 ลิตร ต่อไบโอดีเซล 1 ลิตร



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน [11]

น้ำล้างไบโอดีเซลมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีเหลืองใสขาวขุ่นคล้ายน้ำมันขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วยไขมันหรือน้ำมันที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา เกลือ สบู่ และสารอินทรีย์ เช่น กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) และกลีเซอรอล เป็นต้น น้ำล้างไบโอดีเซลเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหากปล่อยลงไปโดยไม่ได้รับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.1

กระบวนการบำบัดน้ำล้างไบโอดีเซลสามารถจำแนกได้เป็นหลายประเภท ได้แก่ กระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ (Physico-chemical process) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) กระบวนการทางเคมีและเคมีไฟฟ้า (Coupled chemical and electrochemical process) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation process) และกระบวนการทางชีวภาพ (Biological process)

ตารางที่ 2.1 สมบัติน้ำเสียของน้ำล้างไบโอดีเซล [12]

สมบัติน้ำเสียของน้ำล้างไบโอดีเซล	กรัมต่อลิตร
ความเป็นกรดเบส	3.3-11.2
ซีโอดี	11-590
บีโอดี	1.6-300
น้ำมันและไขมัน	0.4-22
สารอินทรีย์คาร์บอนรวม	1.7-40
ค่าของแข็งละลาย	0.3-8.9

2.5.1 กระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ [13]

2.5.1.1 การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการทางกายภาพเพื่อกักสารปนเปื้อนจำพวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของตัวดูดซับ (Absorbent) การดูดซับสามารถเกิดขึ้นระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้ง 3 สถานะ คือของเหลว แก๊ส และของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ในกรณีของการบำบัดน้ำล้างไบโอดีเซลการดูดซับจะเป็นแบบ ของเหลว-ของแข็ง และเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียด้วยการดูดซับจะใช้ควบคู่กับกระบวนการบำบัดอื่นเสมอ

2.5.1.2 การปรับสภาพให้เป็นกรด (Acidification) เป็นการปรับค่าความเป็นกรด-เบส โดยการเติมกรดหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ลงไปเพื่อทำลายเสถียรภาพของอิมัลชัน (Demulsification) ของน้ำมันในน้ำล้างเพื่อแยกน้ำมันที่ปนเปื้อน หรือกรดไขมันอิสระออกก่อนกระบวนการรวมตะกอน (Coagulation) การปรับสภาพน้ำล้างไบโอดีเซลให้เป็นกรดช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำมัน ส่งผลให้น้ำมันรวมตัวกันเป็นขนาดใหญ่ขึ้นได้ และเปลี่ยนโครงสร้างของสารในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังสลายสบู่ออกเป็นเกลือและกรดไขมันอิสระ

2.5.1.3 การรวมตะกอนหรือการจับกลุ่มตะกอน (Flocculation) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอิมัลชันโดยการเติมสารรวมตะกอน (Coagulant) เช่น เกลืออนินทรีย์หรือสารประกอบพอลิเมอร์อนินทรีย์ การตกตะกอนของน้ำล้างไบโอดีเซลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เมื่อเติมสารรวมตะกอนลงไป ไอออนของโลหะจะถูกไฮโดรไลซ์ หลังจากนั้นอนุภาคของเสียที่มีประจุตรงกันข้ามจะถูกดูดเข้าไปเกาะติดผิว ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้า เป็นการทำลายเสถียรภาพ
- น้ำล้างไบโอดีเซลจะถูกกวนส่งผลให้อนุภาคของเสียเคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อน

2.5.1.4 การลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved-air floatation) เป็นวิธีการเติมอากาศลงไปในน้ำล้างไบโอดีเซลที่ความดันประมาณ 2-3 บรรยากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะไปจับกับน้ำมันและของแข็งแล้วนำพาสิ่งเหล่านี้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นสารปนเปื้อนที่ลอยขึ้นจะถูกกวาดทิ้งออกไป

2.5.2 กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

2.5.2.1 การรวมตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrocoagulation) คือการให้กระแสไฟฟ้าตกร่วมบนเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) ทำให้ขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้อะลูมิเนียม (Al) ละลายออกมาเป็นไอออน และเกิดไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) ที่แคโทด (Cathode) ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ แอโนด:



แคโทด:



ไอออนของโลหะและไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์แขวนลอยอยู่ ดังสมการที่ (2.3) สารแขวนลอยนี้จะดูดซับสารประกอบอินทรีย์และคอลลอยด์ (Colloids) หลังจากนั้นถูกกำจัดด้วยการตกตะกอนหรือลอยตัวด้วยไฮโดรเจน (H₂) จากขั้วแคโทด

ปฏิกิริยารวม:



2.5.2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเคมีไฟฟ้า (Electro-oxidation) ดำเนินการโดยการทำอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) เพื่อให้น้ำสลายตัวเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH•) และไฮดรอกซิลเรดิคัลทำหน้าที่สลายสารอินทรีย์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับภาวะที่ดำเนินการและวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด (Electrode)

2.5.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

2.5.3.1 กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาโอโซนเนชันโดยตรง (Direct ozonation) และการเกิดปฏิกิริยาผ่านเรดิคัล (Radical type mechanism) ในแบบหลังโอโซนที่ละลายในน้ำจะเกิดการสลายตัวและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการที่ (2.4)



ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือโอโซน (O_3) มีความจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และมีเสถียรภาพต่ำ ในขณะที่การเกิดเรดิคัลสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลมีศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน (Oxidizing potential) สูงกว่าโอโซนและมีความจำเพาะเจาะจงต่ำกว่า

2.5.3.2 ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน (Photo-Fenton) คือปฏิกิริยาระหว่างเหล็กไอออน Fe^{2+} กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งจะสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (2.5)



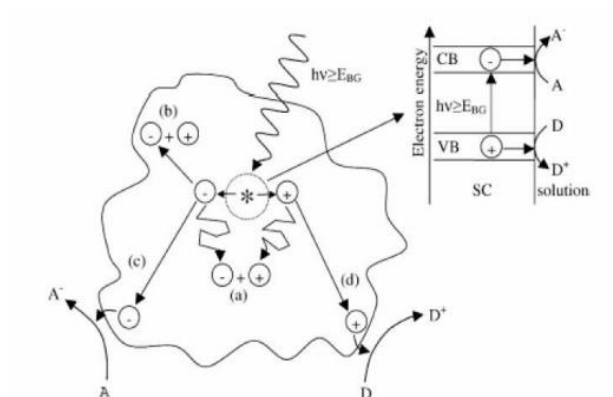
เหล็กไอออน Fe^{3+} จะถูกรีดิวซ์กลับเป็นไอออน Fe^{2+} ด้วยแสงยูวี (UV) พร้อมสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัลดังสมการที่ (2.6) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดจะไปออกซิไดซ์สลายสารอินทรีย์ในระบบ ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบจึงลดลง



2.5.4 กระบวนการทางชีวภาพ คือการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ ในการบำบัดน้ำล้างไปโอดีเซลด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จำเป็นต้องเติมหัวเชื้อเพื่อเลี้ยงจุลินทรีย์ เพราะน้ำล้างไปโอดีเซลมักจะมีค่าความกรด-เบสสูง และสารอาหารน้อย ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic digestion) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

2.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic oxidation) คือการใช้พลังงานแสงมากระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ให้เกิดปฏิกิริยาเคมี กลไกของปฏิกิริยาเชิงแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 2.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียขึ้นอยู่กับชนิดของตัวออกซิแดนท์ (Oxidizing agent) ที่เกิดขึ้น ศักย์ไฟฟ้าการเกิดออกซิเดชันของตัวออกซิไดส์บางชนิดถูกแสดงดังตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.4 กลไกของปฏิกิริยาเชิงแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ [14]

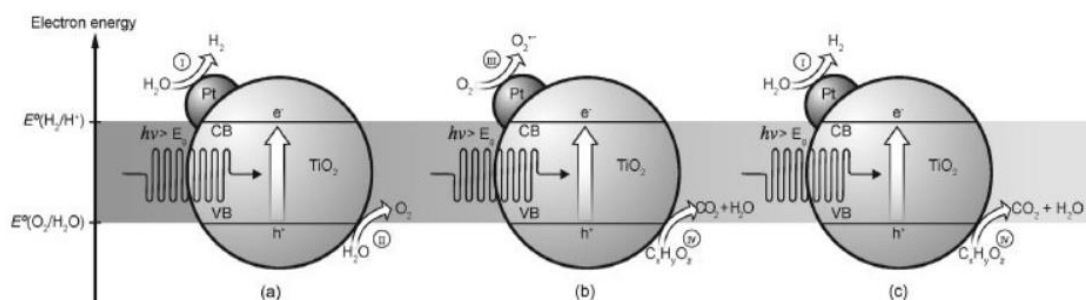
ตารางที่ 2.2 ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของสารออกซิไดส์บางชนิด [15]

ตัวออกซิเดนต์	ศักย์ไฟฟ้าการของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (อิเล็กตรอนโวลต์)
UV-generated, positively charged hole on titaniumdioxide, TiO_2^+	3.21
HO^\bullet	2.80
$\text{O}(^1\text{D})$	2.42
O_3	2.07
H_2O_2	1.77
Perhydroxy radical	1.70
Permanganate ion	1.67
Hypobromous acid	1.59
Hypochlorous acid	1.50
Chlorine	1.36
O_2	1.23

ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะเกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) หลังจากนั้นแสงจะถูกฉายไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา หากแสงมีช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ของตัวเร่งปฏิกิริยา อิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นนอกสุดในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะกระโดดไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ดังภาพที่ 2.5 เกิดเป็นอิเล็กตรอนและโฮล (h^+) ที่แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.7)



หลังจากนั้นโฮลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่มีกัมมันตภาพสูง ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)



ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (a) โมเลกุลเกิดการแตกออก (b) กระบวนการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ (c) การเปลี่ยนสภาพของสารอินทรีย์ที่สถานะกระตุ้น [16]

ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่แถบนำไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปหาตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) เช่น ออกซิเจน (O_2) ที่ชั้นดูดซับเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O_2^-) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลจะทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) เกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (HO_2^-) หลังจากนั้นไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และออกซิเจนดังสมการที่ (2.10) ถึง (2.12)



นอกจากนี้ไฮดรอกซิลเรดิคัลยังเกิดได้จากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (2.13)



กรณีที่เกิดกระบวนการดำเนินการภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ โปรตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามารับอิเล็กตรอนแทนเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล ดังสมการที่ (2.14)



สารอินทรีย์ที่ดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับโฮล ไฮดรอกไซด์เรดิคัล ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (O_2^-) และซิงเกิลตออกซิเจน (Singlet Oxygen, $^1\text{O}_2$) ดังสมการที่ (2.15) ถึง (2.18)





เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดหรือตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้รับพลังงานจากแสงแล้ว อิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการรวมตัวกัน และคายพลังงานออกมา ดังสมการที่ (2.19)

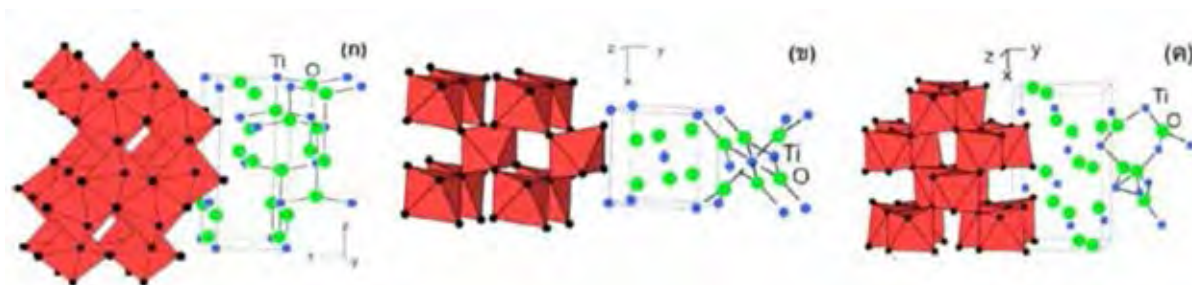


2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ซึ่งถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ รวมถึงการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถดูดซับแสงในช่วงแสงยูวีได้ดี สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี มีเสถียรภาพทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อน มีราคาค่อนข้างถูก และสามารถเตรียมในรูปแบบผลึกขนาดเล็กได้ง่าย [17]

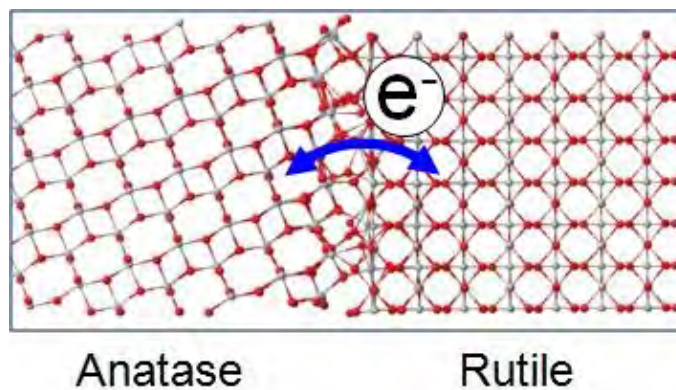
2.7.1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ อะนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) ดังภาพที่ 2.6 โดยเสถียรภาพของผลึกขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก สำหรับอนุภาคขนาดมากกว่า 35 นาโนเมตร โครงสร้างแบบรูไทล์เป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด สำหรับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 11 นาโนเมตร โครงสร้างแบบอะนาเทสเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด และสำหรับอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 11 ถึง 35 นาโนเมตร โครงสร้างแบบบรูคไคท์เป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ (ก) อะนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคท์ [18]

ถึงแม้โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายประเภทดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่โครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติโครงสร้างแบบอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.7 เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทั้งสองแล้วพบว่าโครงสร้างแบบอะนาเทสมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่ารูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างแบบอะนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ ประกอบกับอะนาเทสมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ารูไทล์จึงมีพื้นที่ผิวที่มากกว่าตาม อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายความว่าอะนาเทสจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่ารูไทล์ที่ขนาดอนุภาคอื่น ๆ



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนโครงสร้างแบบอะนาเทสเป็นรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [19]

ในบางกรณี การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างแบบอะนาเทสอย่างเดียว เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 มีองค์ประกอบเป็นโครงสร้างอะนาเทสประมาณร้อยละ 75 และโครงสร้างแบบรูไทล์ประมาณร้อยละ 25 ระหว่างกระบวนการอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอะนาเทส เป็นการลดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล

2.7.2 ข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถต่ำในการดูดซับแสงที่ตามองเห็น (Visible light) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำ เนื่องจากมีอัตราการกลับไปรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole recombination) สูง

2.7.3 การลดข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์

การปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความสามารถในการทำงานภายใต้แสงที่ตามองเห็นได้ดีขึ้นด้วยการลดขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface areas) เมื่ออนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กลง การกระจายตัวจะสูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย การเจือธาตุโลหะหรือธาตุอโลหะเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไอออนของสารที่เจือเข้าไปจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนส่งผลให้อิเล็กตรอนกลับไปรวมตัวกับโฮลได้ช้าลง ซึ่งเป็นการลดอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ หรือสารที่เจือเข้าไปนั้นอาจเข้าไปเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้รูปร่างหรือโครงสร้างเปลี่ยนไปโดยการแทรกหรือแทนที่ของอะตอมสารเจือทำให้ช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ลดลงจึงสามารถใช้พลังงานต่ำให้การกระตุ้นปฏิกิริยาได้

2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น การเจือด้วยโลหะและอโลหะ ความเข้มแสง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ และตัวรับอิเล็กตรอน เป็นต้น [20]

2.8.1 การเจือด้วยโลหะและอโลหะ

โลหะที่นำมาเจือเพื่อการแต่งผิวสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่ม เช่น กลุ่มโลหะทรานซิชัน ได้แก่ เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) วาเนเดียม (V) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น และกลุ่มอโลหะ ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) จุดประสงค์สำหรับการเจือตัวเร่งปฏิกิริยาก็คือเพื่อกระตุ้นแสงในช่วงแสงตามมองเห็นซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร ไอออนของโลหะและอโลหะสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทอิเล็กตรอนในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้อีกด้วย

2.8.2 ความเข้มแสง

แสงที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีความเข้มและความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดกลืนแสงในช่วงแสงยูวีดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตร ได้ดีและมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โครงสร้างแบบรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ได้ดีและมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์

2.8.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยปกติอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับภาวะการดำเนินปฏิกิริยาและรูปทรงของเครื่องปฏิกรณ์ หากมีมากเกินไปจะทึบแสงทำให้แสงส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจึงลดลงตามไปด้วย

2.8.4 ค่าความเป็นกรด-เบส

ค่าความเป็นกรด-เบสส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าความเป็นกรด-เบสที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH of point of zero charge, pH_{pzc}) จะอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 7 ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประจุเป็นลบและบวกตามลำดับดังสมการที่ (2.20) และ (2.21) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป



2.8.5 อุณหภูมิ

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาศัยแสงในการทำปฏิกิริยาจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยการให้ความร้อนเพราะพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) มีค่าต่ำมากในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา

2.8.6 ตัวรับอิเล็กตรอน

ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง นอกจากออกซิเจนยังสามารถใช้ตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นเพื่อลดการรวมตัวกลับกันของอิเล็กตรอนและโฮล เช่น ซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide ion radical) เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radical) และไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen radical) นอกจากนี้การเติมตัวรับอิเล็กตรอนลงไปยังส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลเพิ่มขึ้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elsellami และคณะ [21] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือโลหะเงิน (Ag) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณโลหะเงินที่ร้อยละ 1 – 4 โดยน้ำหนัก พบว่าการเจือโลหะเงินร้อยละ 1 ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต และสลายกรดฟอร์มิกได้ดีที่สุด

Dorraj และคณะ [22] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือโลหะชนิดต่างๆ และการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของสารที่เจือ ได้แก่ ทองแดง (Cu) ไอโอดีน (I) และโคบอลต์ (Co) และอุณหภูมิในการปรับปรุงสมบัติในช่วง 350-550 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะที่ศึกษาทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น การเจือโลหะมากกว่า 1 ชนิด ให้ผลที่ดีกว่าการเจือโลหะชนิดเดียวเนื่องจากความบกพร่องบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ และที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

Pekakis และคณะ [23] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยด้วยกระบวนการออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวแปรต้นที่ศึกษา คือ โครงสร้างและความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าระบบที่ศึกษาสามารถลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 40-90 โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตร

Alhaji และคณะ [24] ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการออกซิเดชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษา คือ ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี และ บีโอดี ได้มากขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างน้ำล้างไบโอดีเซลและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีลักษณะสีขาวอมเหลือง ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำล้างที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ P25, 99.5%) Sigma Aldrich
- แก๊สไนโตรเจน (N₂, 99.99%) Sigma Aldrich
- แก๊สไฮโดรเจน (H₂, 99.99%) Sigma Aldrich
- แก๊สฮีเลียม (He,)

3.2.2 การวิเคราะห์ซีไอดี

- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H₂SO₄, AR grade) Q rec
- ซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO₄, AR grade) Poch
- เมอร์คิวรีซัลเฟต (HgSO₄, AR grade) Q rec
- โปแตสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇, AR grade) Ajax
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator, 0.025 M) Merck
- เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O, AR grade) Ajax

3.2.3 การวิเคราะห์บีโอดี

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade) Carlo Erba
- โซเดียมไอโอดด์ (NaI, AR grade) Ajax
- โซเดียมเอไซด์ (NaN₃, AR grade) Ajax
- แมงกานีสซัลเฟต (MnSO₄·H₂O, AR grade) Ajax
- โซเดียมไธโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃·5H₂O, AR grade) Q rec
- น้ำแป้ง (Starch indicator)

3.2.4 การวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน

- เฮกเซน (n-C₆H₁₄, AR grade) Q rec
- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl, AR grade) Q rec

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ME204 Mettler Toledo
- เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ Vecstar furnace

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

- หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ขนาด 16x100 มิลลิเมตร Pyrex
- ปีกเกอร์ขนาด 50 100 250 และ 1000 มิลลิลิตร Pyrex
- ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร Pyrex
- กระบอกตวง ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร Witeg
- ขวดปรับปริมาตร ขนาด 50 100 250 และ 500 มิลลิลิตร Witeg
- ไมโครปิเปตขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร Witeg
- บิวเรตขนาด 10 และ 25 มิลลิลิตร Witeg
- ปิเปต ขนาด 2 5 และ 10 มิลลิลิตร HBG
- กรวยแยกสาร ขนาด 125 มิลลิลิตร Sci
- ขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร Wheaton
- กระดาษกรอง เบอร์ 42 Whatman
- เครื่องวัดความเข้มแสง
- ถ้วยกระเบื้องขนาด 50 มิลลิลิตร
- เครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- เครื่องกวนแม่เหล็ก
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส
- ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ
- ซ้อนตักสาร
- โถดูดความชื้น
- ตู้อบ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น (Pretreatment)

1. ปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ให้มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับหรือต่ำกว่า 2
2. ทิ้งไว้ให้แยกชั้น โดยชั้นบนจะเป็นชั้นของน้ำมัน และชั้นล่างเป็นชั้นของน้ำเสียที่ผ่านการ บำบัดขั้นต้น ดังภาพที่ 3.2
3. แยกชั้นน้ำออกโดยใช้กรวยแยก
4. เก็บชั้นน้ำไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้ต่อไป



น้ำล้างไบโอดีเซลก่อนบำบัดเบื้องต้น

น้ำล้างไบโอดีเซลก่อนบำบัดเบื้องต้น

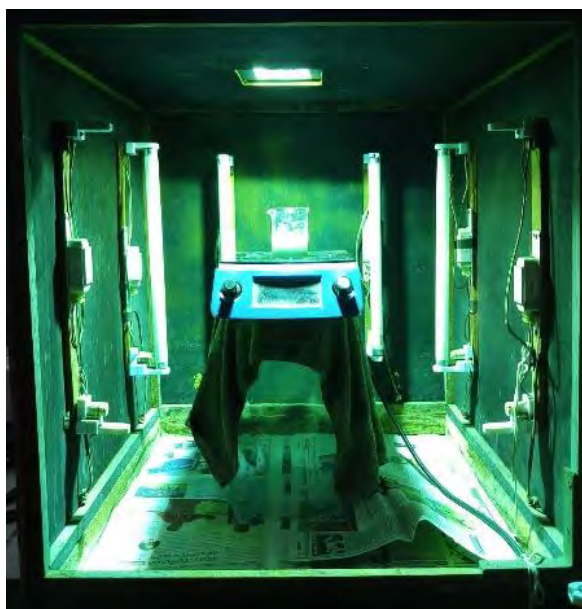
ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นของน้ำล้างไบโอดีเซล

3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

1. เผาตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 P25 0.5 กรัม ด้วยเตาเผาให้ความร้อนแบบท่อในบรรยากาศของ ไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
2. ทำซ้ำข้อ 1. โดยเปลี่ยนบรรยากาศการเผาเป็นบรรยากาศของไนโตรเจน และฮีเลียม ที่อุณหภูมิ 500 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.4.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

1. เจือจางน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยน้ำกลั่น 3.3 เท่า
2. บรรจุน้ำเสียที่ผ่านการเจือจางปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ปริมาณ 0.4 กรัม ลงในปิกเกอร์
4. นำปิกเกอร์บรรจุน้ำเสียที่เตรียมไว้วางบนเครื่องปั่นกวน ในตู้ปฏิบัติการ ดังภาพที่ 3.3
5. เปิดเครื่องปั่นกวน (Stirrer) ที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที
6. เปิดเครื่องปฏิบัติการฉายแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 100 - 600 นาโนเมตร โดยควบคุมความเข้มแสงที่ 5.93 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
7. เมื่อครบเวลานำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมากรองด้วยกระดาษกรอง
8. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ นำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าซีไออดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด



ภาพที่ 3.3 ตู้ปฏิบัติการฉายรังสียูวี

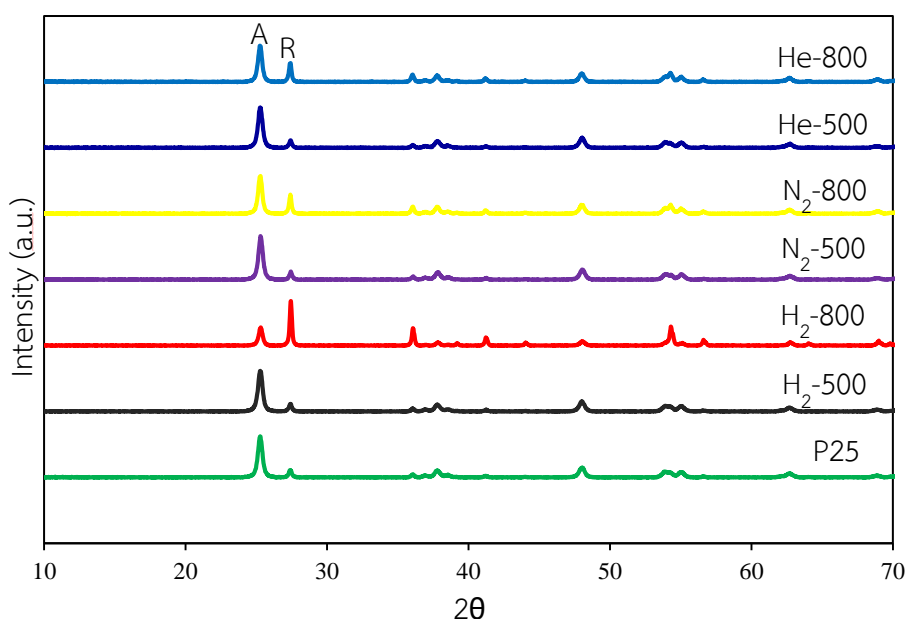
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่ 500 และ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และฮีเลียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า โดยดูจากร้อยละการลดลงของสารพิษในน้ำตัวอย่างที่นำมาบำบัด น้ำเสียที่นำมาใช้ทำการทดลองจะถูกบำบัดเบื้องต้นด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจนมีค่าความเป็นกรด-เบสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 จากนั้นใช้กรวยแยกเพื่อทำการแยกชั้นไขมันและน้ำมันไบโอดีเซลที่ยังตกค้างอยู่ในน้ำเสีย

4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

สัณฐานวิทยาและวัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (P25) และตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศที่แตกต่างกัน (X-T เมื่อ X และ T คือบรรยากาศ และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงด้วยความร้อน) ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา P25 เป็นวัฏภาคผสมระหว่างอะนาเทสและรูไทล์ โดยวัฏภาคอะนาเทสแสดงพีกที่ 2θ เท่ากับ 25.3 และวัฏภาครูไทล์แสดงพีกที่ 2θ เท่ากับ 27.5



ภาพที่ 4.1 กราฟ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (A และ R คือ อะนาเทสและรูไทล์)

สัดส่วนของวัฏภาคอะนาเทสและวัฏภาครูไทล์ของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการของ Spurr (สมการที่ 4.1) [25]

$$A = 1 - \frac{1}{1+0.8(I_A/I_R)} \quad (4.1)$$

เมื่อ A คือ สัดส่วนวัฏภาคอะนาเทส

I_A คือ พื้นที่ใต้พีกของวัฏภาคอะนาเทส

I_R คือ พื้นที่ใต้พีกของวัฏภาครูไทล์

สำหรับขนาดผลึก (Crystallite size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการ Debye-Scherrer (สมการ 4.2) [26]

$$D_p = \frac{0.94\lambda}{\beta_{1/2}\cos\theta} \quad (4.2)$$

เมื่อ D_p คือ ขนาดผลึก (อังสตรอม)

λ คือ ความยาวคลื่น (อังสตรอม)

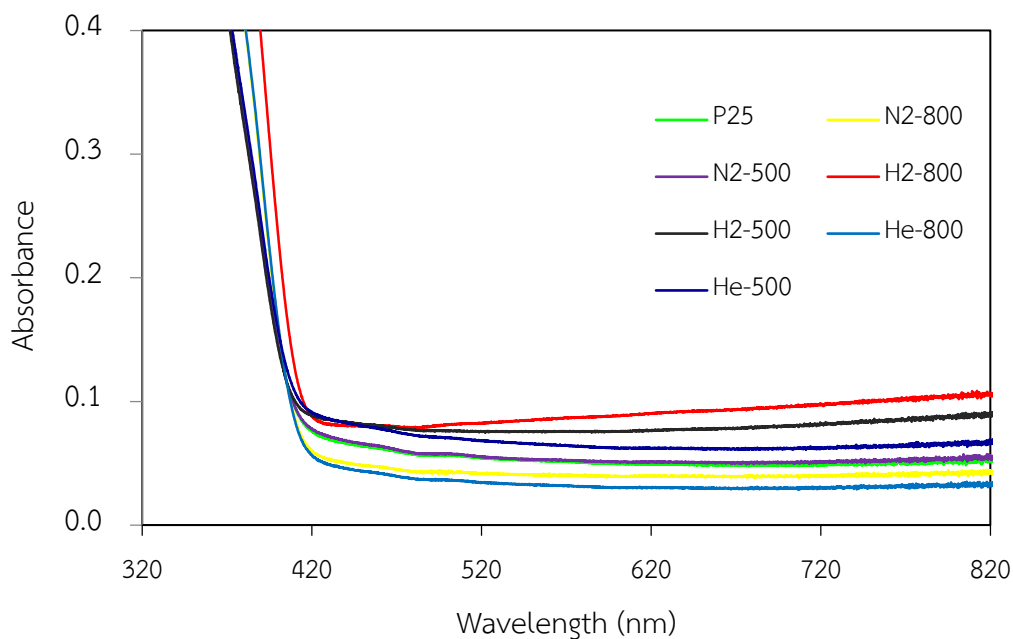
$B_{1/2}$ คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีกอะนาเทส

จากกราฟ XRD สังเกตว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวแสดงพีกหลักที่ 2θ เท่ากับ 25.3 และ 27.5 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนที่ภาวะต่างกันั้นยังคงมีทั้งวัฏภาคอะนาเทส และ วัฏภาครูไทล์ แต่พื้นที่ใต้พีกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนวัฏภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน ภายใต้ความดันต่างกัน ซึ่งคำนวณสัดส่วนวัฏภาคอะนาเทส ขนาดผลึก และแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ P25 และ X-T

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สัดส่วนวัฏภาค อะนาเทส	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	แถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
P25	85.2	24.08	3.30
H ₂ -500	85.2	24.32	3.30
H ₂ -800	36.31	38.56	3.10
N ₂ -500	85.69	25.51	3.30
N ₂ -800	69.82	29.51	3.23
He-500	85.17	23.99	3.30
He-800	67.61	28.81	3.23

ความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา P25 และ X-T วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ แสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร แต่ไม่สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวมากกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตามองเห็น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา P25 มีแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา X-T สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดูดกลืนแสงได้ดีขึ้น ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา H₂-500, N₂-500, He-500, และ H₂-800 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา N₂-800 และ He-800 ดูดกลืนแสงได้น้อยลง ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา N₂-800 และ He-800 มีสมบัติที่ใกล้เคียงกันทั้งสัดส่วนวัฏภาคอะนาเทส ขนาดผลึก และแถบช่องว่างพลังงาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวอาจทำให้เกิดความบกพร่องบนผลึก นอกจากนี้การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำลายความสมบูรณ์ของอนุภาค ทำให้เปราะ และสูญเสียสมบัติเชิงกลไป [27] ส่งผลให้การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



ภาพที่ 4.2 ความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

ค่าแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานโฟตอนและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดังแสดงโดยสมการ (4.3) [25]

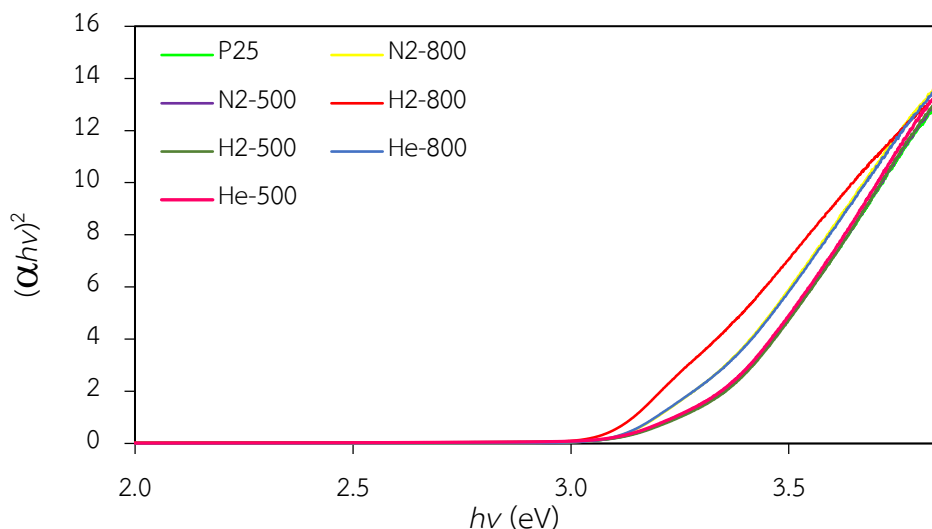
$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (4.3)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ (Proportional constant)

E_g คือ ค่าแถบช่องว่างพลังงาน

$B_{1/2}$ คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $1/2$ สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบ direct band gap

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha h\nu^2$ กับพลังงานโฟตอน ภาพที่ 4.3 แล้วลากเส้นตามแนวความชันของกราฟมาตัดที่แกน X จะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา P25 มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.30 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคจากอะนาเทสเป็นรูไทล์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส [28]



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ $Tauc$ ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

4.2 สมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีลักษณะสีขาวอมเหลือง ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 4.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีค่าซีไอดี ค่าน้ำมันและไขมัน ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าของแข็งละลายสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งถึง 191.47, 131.53, 9.72 และ 4.11 เท่าตามลำดับ ซึ่งจำเป็นต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ

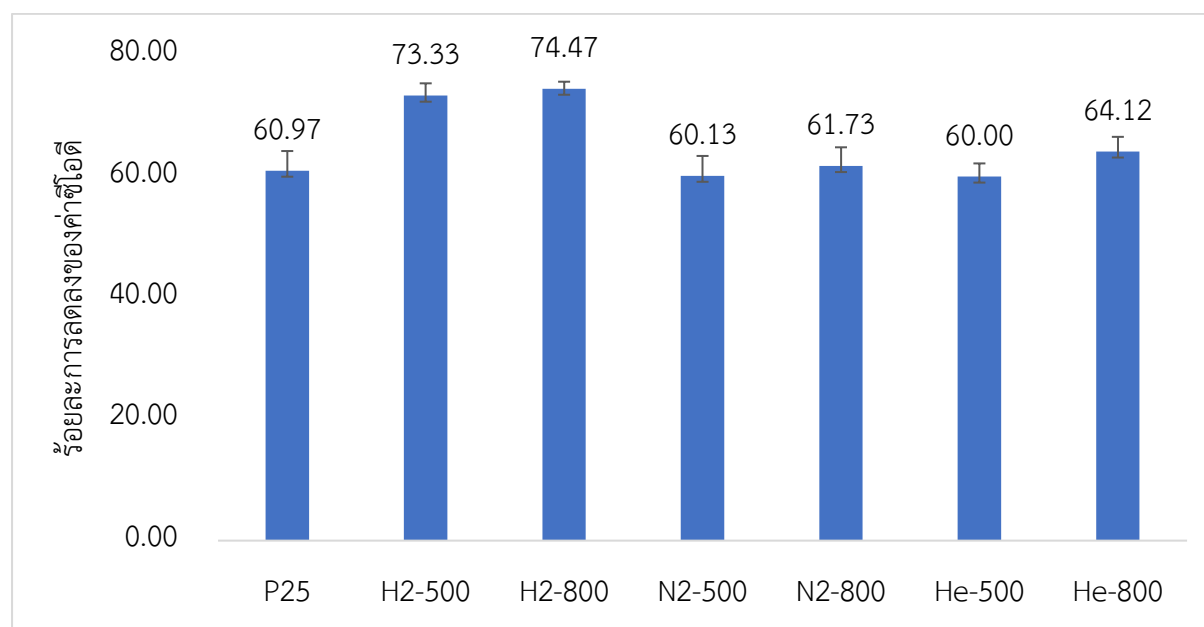
ตารางที่ 4.2 ตารางสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง	สมบัติน้ำเสีย	
		ก่อนการบำบัดเบื้องต้น	หลังการบำบัดเบื้องต้น
ค่าความเป็นกรด-เบส	5.5 – 9.0	4.20 ± 0.19	2.02 ± 0.06
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 400	$76,588 \pm 5700$	$44,290 \pm 1597$
น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 15	$1,973 \pm 574.97$	$1,160 \pm 308.98$
ค่าของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 150	$1,458 \pm 8.75$	74.44 ± 4.16
ค่าของแข็งละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 3,000	$12,345 \pm 964.78$	$40,603 \pm 622$

เมื่อนำน้ำเสียมาบำบัดเบื้องต้นด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรด พบว่าน้ำเสียจะแยกออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ส่วนชั้นล่างจะใส เนื่องจากโปรตอนจากกรดซัลฟิวริกเข้าไปแทนที่โซเดียมในโครงสร้างของเกลือของกรดไขมันกลายเป็นกรดไขมันซึ่งไม่ละลายในน้ำ และบางส่วนแยกตัวลอยขึ้นไปอยู่ชั้นบนของผิวน้ำ เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นชั้นล่างมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่าค่าพารามิเตอร์บางตัวมีค่าลดลง ได้แก่ ค่าซีไอดี ค่าน้ำมันและไขมัน และค่าของแข็งแขวนลอย แต่ก็ยังคงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งถึง 110.73, 77.33, และ 2.02 เท่าตามลำดับ

4.3 การลดมลพิษด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ค่าซีไอดีภายหลังการบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25 และ X-T แสดงร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดี

จากผลการทดลองพบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตโปติเซิลเมื่อถูกบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25 มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 60.97 และการบำบัดน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา N₂-500 และ He-500 มีการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 60.13 และ 60.00 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา P25 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนและฮีเลียมนั้นยังคงมีสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกับ P25 สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา N₂-800 และ He-800 มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 61.73 และ 64.12 ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าการบำบัดด้วย P25 เล็กน้อย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 800 องศา

เซลล์เสียชีวิตการเปลี่ยนวัฏภาคจากอะนาเทสเป็นวัฏภาครูไทล์มากขึ้น และมีค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดกลืนแสงได้ดีขึ้น จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การบำบัดน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 500 และ 800 องศาเซลเซียส มีร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีสูงถึง 73.33 และ 74.47 ตามลำดับ

เมื่อศึกษาผลของบรรยากาศในการปรับปรุงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า การปรับปรุงภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีที่สุด ตามมาด้วยการปรับปรุงด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมและไนโตรเจน เนื่องจากการเผาภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดช่องว่างออกซิเจนขึ้น (Oxygen vacancy) ซึ่งช่องว่างออกซิเจนจะทำให้หน้าที่เป็นตัวดักจับอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ทำให้การกลับไปรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดได้ยากขึ้น [29] ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการเผาภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมและไนโตรเจน ซึ่งผลการทดลองยังสอดคล้องกับความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา H₂-500 และ H₂-800 ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวที่ตามองเห็นได้มากขึ้นเช่นกัน สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนนั้นเนื่องจากขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา He-T เล็กกว่า N₂-T จึงมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากกว่า

ในการทดลองขั้นตอนการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดี เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กมากซึ่งอาจกรองไม่หมดอาจทำให้มีปัจจัยจากการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง การวิเคราะห์ปริมาตรช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติมอาจช่วยให้เข้าใจผลการทดลองมากขึ้น นอกจากนี้การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ในเบื้องต้นจะช่วยให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจริง ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน ทำการทดลองโดยการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจนมีค่าความเป็นกรด-เบสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นำน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพชั้นล่างมาวิเคราะห์ สมบัติทางกายภาพและเคมีที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ค่าน้ำมันและไขมัน ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าของแข็งละลาย พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีค่าลดลงโดยร้อยละของการลดลงของค่าซีไอดี ค่าน้ำมันและไขมัน และค่าของแข็งแขวนลอย มีค่าเท่ากับ 42.17, 41.21 และ 94.89 ตามลำดับ ส่วนค่าของแข็งละลายมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 228.90 เป็นเพราะกรดไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้นมาภายหลังการบำบัดเบื้องต้น

สำหรับการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยา P25 ด้วยความร้อน ตัวแปรที่ศึกษาคือ บรรยากาศของการบำบัด ได้แก่ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ฮีเลียม และอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดที่ 500 และ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวแปรดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา P25 ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ แต่บรรยากาศในการปรับปรุงด้วยความร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยการปรับปรุงด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสให้ผลการทดลองดีที่สุด ที่ร้อยละการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 74.47 จากผลการทดลองบอกได้ว่าสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของความเป็นกรด-เบส เวลาในการฉายแสง ความเข้มแสง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย
2. ควรมีการวิเคราะห์ค่าบีโอดีของน้ำเสียเพิ่มเติม
3. ใช้น้ำเสียสังเคราะห์แทนการใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจริง
4. วิเคราะห์ปริมาตรช่องว่างและอัตราการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

- [1] N.M. Daud, S.R.S. Abdullah, H.A. Hazan, and Z. yaakob. Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A Review. *Process Safety and Environment Protection* 94, (2015): 487-508.
- [2] ไทเทเนียมไดออกไซด์. [online]. Available from: <http://www.siamchemi.com/ไทเทเนียมไดออกไซด์/> (Accessed on February, 13, 2019)
- [3] ไบโอดีเซลคืออะไร. [online]. Available from: http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php?option%3Dcom_content%26task%3Dview%26id%3D7%26Itemid%3D12 (Accessed on February, 13, 2019)
- [4] อุตสาหกรรมไบโอดีเซล. [online]. Available from: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/9f400e98-f5be-4db9-b120-338e20d86ec4/IO_Biodiesel_201705_TH.aspx (Accessed on February, 13, 2019)
- [5] ไบโอดีเซล. [online]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ไบโอดีเซล> (Accessed on February, 13, 2019)
- [6] N.M. Daud, S.R. Abdullah, H.A. Hasan, Z. Yaakob. Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. *Process safety and environment protection* 94, (2015): 487-508.
- [7] ข้อดี-ข้อด้อยของไบโอดีเซล. [online]. Available from: http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv_disadv.php (Accessed on February, 13, 2019)
- [8] ไบโอดีเซลคืออะไร. [online]. Available from: <https://www.ku.ac.th/emagazine/mar53/agri/agri2.htm> (Accessed on February, 13, 2019)
- [9] กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [online]. Available from: <http://jeabnaruemol.blogspot.com/2016/02/2-1000-99.html> (Accessed on February, 13, 2019)
- [10] กระบวนการผลิตไบโอดีเซล [online]. Available from: <http://www.siambioenergy.com/bio65/index.php> (Accessed on February, 13, 2019)
- [11] B.V. Veljkovic, O.S. Stamenkovic, M.B. Tasic. The wastewater treatment in the biodiesel production with alkali-catalyzed transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Review* 32, (2014): 40-60.

- [12] สมบัติน้ำเสียของน้ำล้างไบโอดีเซล[online].
Available from: https://www.researchgate.net/figure/Biodiesel-wastewater-Characteristic_tbl1_281250987 (Accessed on February, 13, 2019)
- [13] กระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ [online]. Available from:
http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php%3Foption%3Dcom_content%26task%3Dview%26id%3D7%26Itemid%3D12 (Accessed on February, 13, 2019)
- [14] กลไกของปฏิกิริยาเชิงแสงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ [online].
Available from: <http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/enmis/doc/project/fullpaper/Auppatum58.pdf> (Accessed on February, 13, 2019)
- [15] ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันของสารออกไซด์ส์บางชนิด [online].
Available from: <http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/8065/posters/P-PR-01Entregis.pdf> (Accessed on February, 13, 2019)
- [16] ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [online].
Available from: <http://www.greenmillennium.com/photocatalytic-oxidation/> (Accessed on February, 13, 2019)
- [17] ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ [online].
Available from: http://www.doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/300020/49e11016f388cc7d09469cef16140b31?Resolve_DOI=10.14457/KKU.res.2013.48 (Accessed on February, 13, 2019)
- [18] โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ [online].
Available from: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn221A_p53-55.pdf (Accessed on February, 13, 2019)
- [19] การเปลี่ยนโครงสร้างจากอะนาเทสเป็นรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [online].
Available from: <http://www.aiche.org/conferences/aiche-annual-meeting/2012/proceeding/paper/267e-first-principles-modeling-tio2-rutileanatase-interfaces> (Accessed on February, 13, 2019)
- [20] ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง [online].
Available from: http://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/269_25-30.pdf (Accessed on February, 13, 2019)

- [21] L. Elsellami, F. Dappozze, A. Houas, and C. Guillard. Effect of Ag^+ reduction on the photocatalytic activity of Ag -doped TiO_2 . *Superlattices and Microstructures* 109, (2017): 511-518.
- [22] M. Dorraj, B.T. Goh, N.A. Sairi, P.M. Woi, W.J. Basirun. Improved visible-light photocatalytic activity of TiO_2 co-doped with copper and iodine. *Applied Surface Science* 439, (2018): 999-1009.
- [23] P. A. Pekakis, N. P. Xekoukoulotakis, D. Mantzavinos. Treatment of textile dyehouse wastewater by TiO_2 photocatalysis. *Water Research* 40, (2006): 1276-1286.
- [24] M. H. Alhaji, K. Sanullah, S. F. Lim, A. Khan, C. N. Hipolito, M. O. Abdullah, S. A. Bhawani, T. Jamil. Photocatalytic treatment technology for palm oil mill effluent (POME) A review. *Process Safety and Environmental Protection* 102, (2016): 673-686.
- [25] N.T. Nolan, M.K. Seery, S.C. Pillai, Spectroscopic investigation of the anatase-to-rutile transformation of sol-gel-synthesized TiO_2 Photocatalyst, *The Journal of Physical Chemistry C* 113, (2009) 16151-16157.
- [26] M. Bellardita, A. Di Paola, B. Megna, L. Palmisano, Determination of the crystallinity of TiO_2 Photocatalysts, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 367, (2018) 312-320.
- [27] C.T. Dervos, Ef. Thirios, J. Novacovich, P. Vassiliou, P. Skafidas. Permittivity properties of thermally treated TiO_2 , *Materials Letters* 58, (2004) 1502-1507.
- [28] H. Liu, H.T. Ma, X.Z. Li, W.Z. Li, M. Wu, X.H. Bao. The enhancement of TiO_2 photocatalytic activity by hydrogen thermal treatment, *Chemosphere* 50, (2003) 39-46.
- [29] M. Wu, K. Hsiao, Y. Chang, S. Chan. Photocatalytic hydrogen evolution of palladium nanoparticles decorated black TiO_2 calcined in argon atmosphere, *Applied surface Science* 430, (2018) 407-414.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์, 2543)

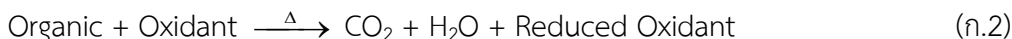
ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมียหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์สิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เป็นค่าที่แสดงถึงภาวะความเป็นกรดและเบส ซึ่งสิ่งที่ชี้บอกความเป็นกรดคือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ และสิ่งที่ชี้บอกความเป็นเบสคือความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน $[OH^-]$ เนื่องจากความเป็นกรด-เบสมีสเกลอยู่ในช่วง 0 ถึง 14 โดยสามารถแบ่งภาวะความเป็นกรด-เบส และกลางได้ดังนี้ กล่าวคือ เมื่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกลาง ถ้าค่าความเป็นกรด-เบสมีน้อยกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นกรด หรือ ค่าความเป็นกรด-เบสมีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสารละลายเป็นเบส โดยทั่วไปค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในสภาพปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 6-8 ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ค่าความเป็นกรด-เบสมีสสมการดังนี้

$$pH = -\log[H^+] \quad (ก.1)$$

2. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) หมายถึงปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถที่จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้ภาวะเป็นกรด ดังสมการ



ค่าซีโอดีจัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้เห็นว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

3. น้ำมันและไขมัน คือสารส่วนใหญ่ที่ได้มาจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหารและจากอุตสาหกรรม เช่น โรงฟอกย้อม โรงฆ่าสัตว์ บางส่วนได้มาจากน้ำมันและไขมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่ลอยน้ำได้ซึ่งขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนลงสู่ น้ำ ทำให้แหล่งรับน้ำเสียเกิดสภาพไม่น่าดูและทำให้น้ำเสียได้ง่าย

4. ค่าของแข็งแขวนลอย (Total suspended solids) หมายถึง ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่แขวนลอยอยู่ในน้ำ สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดรูกรองประมาณ 1.2 ไมโครเมตร แล้วนำของแข็งดังกล่าวที่ติดค้างบนกระดาษกรองไปผ่านการระเหยน้ำออกจนหมด ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

5. ค่าของแข็งละลาย (Total dissolved solids) หมายถึง ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ทำให้สามารถลอดผ่านกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดรูกรองประมาณ 1.2 ไมโครเมตร ประกอบด้วยอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่ารูกระดาษกรอง และโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

1. การวิเคราะห์ค่าซีไอดี

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต เตรียมโดยละลาย $K_2Cr_2O_7$ ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง น้ำหนัก 2.4565 กรัม ในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 83.5 มิลลิลิตร และเติม $HgSO_4$ 16.65 กรัม ทิ้งให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต เตรียมโดยละลาย $AgSO_4$ 4.4 กรัม ในซัลฟิวริกเข้มข้น 500 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ในละลาย 1-2 วัน
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล เตรียมโดยละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 9.8 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลายขนาด 16x100 มิลลิเมตร และฝาด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ทุกครั้งก่อนใช้งาน
2. เติมน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีซิลเวอร์ซัลเฟต 3.5 มิลลิลิตร ปิดฝา แก้วหลอดเบา ๆ
3. นำหลอดแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. เทสารละลายจากหลอดย่อยสลายลงขวดรูปชมพู่ ใช้น้ำกลั่นชะล้างหลอดย่อยสลาย
5. หยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ ไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 นอร์มัล จนเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง

การคำนวณ

$$COD \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

2. การวิเคราะห์ค่าบีโอดี

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย CaCl_2 2.75 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
2. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.025 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เตรียมโดยละลาย $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.25 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
4. น้ำแป้งอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยละลายแป้งมัน 0.3 กรัม ในน้ำ 50 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด แล้วทิ้งให้เย็นข้ามคืน แยกนำส่วนน้ำมาหยดโทลูอิน 2-3 หยด
5. สารละลายอัลคาไลน์ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ตามวิธีไฮไซด์ (Azide) เตรียมโดยละลาย NaOH 250 กรัม และ NaI 67.5 กรัม เจือจางให้ได้ 475 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น จากนั้นเติม NaN_3 ที่ละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
6. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต เตรียมโดยละลาย $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 182 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร
7. สารละลายมาร์ตฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต เข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 24.82 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มและทำให้เย็น เติมน้ำ NaOH 1 กรัม แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมน้ำเจือโดยนำน้ำกลั่นมาเติมสารอาหารเลี้ยงเชื้อประกอบด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร และเติมอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้ออกซิเจนที่ละลายน้ำอิ่มตัว
2. ใส่ตัวอย่างลงในขวดบีโอดี แล้วเติมน้ำเจือจางจากขั้นตอนที่ 1 ให้เต็มขวด พร้อมปิดจุก ตัวอย่างละ 2 ขวด สำหรับหาค่าดีไอ(0) และ ดีไอ(5) นำขวดดีไอ(5) เข้าตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
3. เติมน้ำสารละลายแมงกานีสซัลเฟต ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลายอัลคาไลน์ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตจุ่มลงใต้ผิวน้ำแล้วปิดจุกอย่าให้เกิดฟองอากาศ
4. เขย่าขวดโดยคว่ำขึ้น-ลง ให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนได้ส่วนใสมากกว่า 100 มิลลิลิตร
5. เติมน้ำกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ให้ไหลตามคอขวด ปิดจุกเขย่าคว่ำขึ้น-ลง จนตะกอนละลายหมด

6. เอาตัวอย่างออก 97 มิลลิลิตร แล้วนำน้ำตัวอย่างที่เหลือมาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล จนสารละลายเป็นสีเหลืองฟางข้าวแล้วจึงเติมน้ำแบ่ง 1-2 มิลลิลิตร ไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี
7. เมื่อครบ 5 วัน นำขวดดีโอ(5) มาทำตามขั้นตอน 3-6

การคำนวณ

$$DO_{ppm} = \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.025 \text{ นอร์มัล } Na_2S_2O_3 \text{ (มิลลิลิตร)} \times 0.2 \times 1000}{200}$$

$$BOD = \frac{DO_0 - DO_5}{P}$$

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำเมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จทันที

DO_5 = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำเมื่อบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 5 วัน

P = สัดส่วนการเจือจางน้ำ

3. การวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งขวดรูปชมพู่ และบันทึกน้ำหนักขวดเปล่า
2. บรรจุตัวอย่างลงในภาชนะและเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นประมาณ 0.5-1 มิลลิลิตร ให้น้ำตัวอย่างมี pH ประมาณ 2
3. เทสารตัวอย่างลงกรวยแยก ล้างภาชนะด้วยเฮกเซนลงในกรวยแยก ใช้ปริมาณเฮกเซน ต่อตัวอย่างประมาณ 2:1
4. ปิดฝากรวยและเขย่าเป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น โดยชั้นเฮกเซนจะอยู่ด้านบน ส่วนชั้นน้ำจะอยู่ด้านล่าง
5. ถ่ายชั้นน้ำเก็บไว้ในภาชนะ แล้วถ่ายชั้นเฮกเซนลงขวดรูปชมพู่ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว
6. นำน้ำที่ถ่ายเก็บไว้มาสกัดอีกครั้งด้วยวิธีเดิม
7. นำขวดรูปชมพู่ที่มีเฮกเซน น้ำมัน และไขมัน มาอบให้แห้ง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

การคำนวณ

$$\text{น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักขูดรูปชมพูเปล่า (กรัม)

B = น้ำหนักขูดรูปชมพูอบแห้งจากขั้นตอนที่ 7. (กรัม)

4. การหาค่าของแข็งแขวนลอย

วิธีการวิเคราะห์

1. อบกระดาศกรองใยแก้วที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
3. นำน้ำตัวอย่างประมาณ 15-20 มิลลิลิตร มากรองลดความดัน โดยผ่านกระดาศกรองใยแก้วที่ชั่งน้ำหนักไว้จากขั้นตอนที่ 2.
4. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 10 มิลลิลิตร
5. นำกระดาศกรองใยแก้วที่ผ่านการกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. นำกระดาศกรองใยแก้วออก ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักกระดาศกรองใยแก้วเปล่า (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาศกรองใยแก้วอบแห้งจากขั้นตอนที่ 6. (กรัม)

5. การหาค่าของแข็งที่ละลายน้ำ

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักถ้วยระเหย
2. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองสารแขวนลอยทั้งหมดใส่ถ้วยระเหยประมาณ 15-20 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส
3. นำถ้วยระเหยออก ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งที่ละลายทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยระเหยเปล่า (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยอบแห้งจากขั้นตอนที่ 3. (กรัม)

ภาคผนวก ค

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม
(กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าของแข็งละลายน้ำ (Total dissolved solids)	- ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเลค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าของแข็งละลายน้ำที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	ไทเทรต

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
7. ไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของ น้ำมันและไขมัน
9. พอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่ อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand: BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	Azide Modification ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16. โลหะหนัก		
(Heavy Metal)		
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	Plasma Emission Spectroscopy ชนิด
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	Inductively Coupled
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	Plasma : ICP
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique

