

การลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน

นางสาววิภาวัลย์ พิทักษ์พูลศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

REDUCTION OF POLLUTANTS IN WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION  
PLANT BY ADSORPTION WITH CHITOSAN

Miss Wipawan Pitukpoolsil

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science  
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดย

กระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน

โดย

นางสาววิภาวัลย์ พิทักษ์พูลศิลป์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนูนวม

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หนูนวม)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต)

วิภาวัลย์ พิทักษ์พูลศิลป์ : การลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน. (REDUCTION OF POLLUTANTS IN WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PLANT BY ADSORPTION WITH CHITOSAN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. มะลิ หนูสนม, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยไคโตซานในห้องปฏิบัติการ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (2-8) ปริมาณตัวดูดซับ (0.5-5.5 กรัมต่อลิตร) เวลา (0.5-5 ชั่วโมง) และอัตราเร็วในการเขย่า (120-350 รอบต่อนาที) พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการลดสารมลพิษในน้ำเสียกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยไคโตซาน คือความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับ 3.5 กรัมต่อลิตร เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราการเขย่า 350 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถลดค่าบีโอดี ซีโอดี และไขมันและน้ำมัน ร้อยละ 68 93 และ 84 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะยังมีปริมาณ บีโอดี และซีโอดี และไขมันและน้ำมันเท่ากับ 395 1,216 และ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานประมาณ 6 3 และ 7 เท่าตามลำดับ จึงนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้น มาบำบัดซ้ำอีก พบว่าน้ำเสียมีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อผ่านการบำบัด 5 ครั้ง กล่าวคือมีปริมาณไขมันและน้ำมัน บีโอดี และซีโอดี เท่ากับ 15 25 และ 183 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีร้อยละการลดลงของสารมลพิษเท่ากับ 97.1 96.5 และ 97.7 ตามลำดับ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับซ้ำนั้นสามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ การฟื้นฟูสภาพไคโตซานที่ผ่านการใช้งานด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ครั้งที่ 1 และ 2 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษใกล้เคียงกับไคโตซานที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ไอโซเทอมของการดูดซับจะสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
ปีการศึกษา 2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 5287268920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ADSORPTION / BIODIESEL MILL EFFLUENT / CHITOSAN /  
WASTEWATER BIODIESEL

WIPAWAN PITUKPOOLSIL: REDUCTION OF POLLUTANTS IN  
WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PLANT BY ADSORPTION  
WITH CHITOSAN. ADVISOR : ASSOC. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., 96 pp.

This research was carried out to reduce pollutants in wastewater from a biodiesel production plant by adsorption with chitosan. The investigated parameters were pH (2-8), dose of adsorbent (0.5-5.5 g/l), adsorption time (0.5-5 hr) and shaking rate (120-350 rpm). The results showed that the optimal conditions for reducing pollutants in biodiesel wastewater via chitosan were pH of wastewater of 4, dose of adsorbent of 3.5 g/l, adsorption time of 3 hr and shaking rate of 350 rpm. At this condition, greater than 68 93, and 84 % of BOD, COD and oil & grease were reduced, respectively. However, it still contained BOD, COD and oil & grease of around 395 1,216 and 105 mg/l respectively, which were better than the standard value of 6, 3 and 7-fold, respectively. The wastewater with accepted properties for discharging was obtained after 5 times of re-treatment. It contained oil & grease BOD, COD and of around 15, 25 and 183 mg/l or corresponding to 97.1, 96.5 and 97.7 % removal. The regeneration of chitosan with 0.1 M HNO<sub>3</sub> and NaOH for the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> time provided the chitosan having the adsorption efficiency close to the first chitosan. The adsorption isotherm of chitosan for biodiesel wastewater was the Langmuir isotherm.

Field of Study : Environmental Science..... Student's Signature .....

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิ นุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ ไชยิตานนท์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภูวสันต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานดา ว่องไวลิขิต ที่กรุณามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | ฎ    |
| สารบัญภาพ.....  | ฏ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                           | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                  | 3    |
| 1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....                              | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                        | 4    |
| 2.1 สภาพการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย.....                         | 4    |
| 2.2 ไบโอดีเซล.....  | 5    |
| 2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....                                   | 5    |
| 2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....                                      | 6    |
| 2.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....        | 7    |
| 2.3.3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล..... | 8    |
| 2.3.4 การนำเมทานอลกลับคืน.....                                    | 8    |
| 2.3.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์.....                                    | 9    |
| 2.3.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ.....                                | 9    |
| 2.3.7 การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์.....                             | 9    |
| 2.4 การจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....                | 10   |
| 2.4.1 การจัดการน้ำเสียโดยกระบวนการทางเคมี.....                    | 10   |
| 2.4.2 การจัดการน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.....                 | 11   |
| 2.4.2.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน.....                         | 11   |

|   |    |
|---|----|
| 1) ระบบไปรษณีย์.....  | 11 |
| 2) ระบบบึงประดิษฐ์.....   | 12 |
| 2.4.2.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....                                | 12 |
| 1) ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน.....   | 12 |
| 2.5 กระบวนการดูดซับ.....  | 13 |
| 2.5.1 ลักษณะของการดูดซับ.....   | 14 |
| 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....  | 15 |
| 2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....   | 16 |
| 2.5.3.1 สมการแลงเมียร์.....   | 17 |
| 2.5.3.2 สมการฟรุนดลิช.....  | 19 |
| 2.6 ตัวดูดซับ.....  | 19 |
| 2.7 ไคตินและไคโตซาน.....  | 20 |
| 2.7.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน.....                                   | 20 |
| 2.7.2 กระบวนการผลิตไคติน – ไคโตซาน.....                                     | 22 |
| 2.7.3 การประยุกต์ใช้ไคตินและไคโตซาน.....                                    | 23 |
| 1) ด้านการเกษตร.....  | 23 |
| 2) ด้านเส้นใยและสิ่งทอ.....   | 25 |
| 3) ด้านอาหาร.....   | 25 |
| 4) การใช้ประโยชน์จากไคโตซานทางการเกษตร อาหารเสริม สุขภาพ.....               | 25 |
| 5) การใช้ไคโตซานในวงการประมง.....   | 26 |
| 6) การใช้ไคโตซานในวงการแพทย์.....   | 26 |
| 7) ด้านการบำบัดน้ำเสีย.....   | 26 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 28 |
| 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยไคโตซาน.....               | 28 |
| 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล..... | 29 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 33 |
| 3.1. ตัวอย่างน้ำและวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย.....                            | 33 |
| 3.2. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....   | 34 |



|   |    |
|---|----|
| 3.2.1 การวิเคราะห์หี้ออดี.....  | 34 |
| 3.2.2 การวิเคราะห์หีบอดี.....   | 34 |
| 3.2.3 การวิเคราะห์น้ำมันและไขมัน.....   | 34 |
| 3.2.4 การฟื้นฟูสภาพโคโตซาน.....   | 35 |
| 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....   | 35 |
| 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....   | 35 |
| 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....   | 36 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....   | 38 |
| 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและ<br>น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น..... | 38 |
| 4.2 การลดมลพิษด้วยการดูดซับด้วยโคโตซาน.....   | 41 |
| 4.2.1 ผลของตัวแปรในการดูดซับ.....   | 41 |
| - ผลของเวลาในการดูดซับ.....   | 41 |
| - ผลของความเป็นกรด-เบส.....   | 41 |
| - ผลของปริมาณตัวดูดซับ.....   | 43 |
| - ผลของอัตราเร็วในการเขย่า.....   | 44 |
| 4.2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....   | 47 |
| 4.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับซ้ำ.....   | 51 |
| 4.4 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพโคโตซาน.....   | 54 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....   | 64 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....   | 64 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 65 |
| รายการอ้างอิง.....  | 66 |
| ภาคผนวก.....  | 70 |
| ภาคผนวก ก ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย.....   | 71 |
| ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย.....   | 73 |
| ภาคผนวก ค มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม  | 86 |
| ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณ.....   | 90 |

ญ

หน้า

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 96 |
|---------------------------------|----|

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....  | 15   |
| 2.2      | ปริมาณของโคตินที่พบในปฏู่ กุ้ง แมลง สัตว์ที่มีเปลือกแข็ง และสาหร่าย.....   | 24   |
| 4.1      | สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลก่อนและหลังบำบัดเบื้องต้น.....   | 39   |
| 4.2      | สรุปสมบัติของการบำบัดด้วยโคโตซานที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 4 เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที..... | 46   |
| 4.3      | ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิชของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยโคโตซาน.....   | 49   |
| ข.1      | การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี.....  | 75   |
| ข.2      | ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ซีโอดี.....   | 80   |
| ข.3      | ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....   | 80   |
| ง.1      | ผลของปริมาณน้ำมันและไขมัน.....   | 92   |
| ง.2      | ผลของปริมาณซีโอดี.....   | 93   |
| ง.3      | ผลของปริมาณบีโอดี.....   | 94   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1    | ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....   | 5    |
| 2.2    | กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....  | 7    |
| 2.3    | ระบบบำบัดแบบไปรยกรอง.....  | 11   |
| 2.4    | ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์.....   | 12   |
| 2.5    | ระบบบำบัดแบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน.....   | 13   |
| 2.6    | ลักษณะของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย..   | 14   |
| 2.7    | (ก) โครงสร้างของไคติน (ข) โครงสร้างของไคโตซาน (ค) โครงสร้างของ<br>เซลลูโลส.....  | 21   |
| 2.8    | ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการแยกไคตินและไคโตซาน.....   | 27   |
| 3.1    | ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล.....   | 33   |
| 3.2    | ไคโตซานผง.....   | 33   |
| 4.1    | พีคของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (ก) น้ำเสียจากกระบวนการ<br>ผลิตไบโอดีเซล และ (ข) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น.....  | 40   |
| 4.2    | ผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิต<br>ไบโอดีเซลที่เวลา 0-5 ชั่วโมง ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ปริมาณไคโต<br>ซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที.....                | 42   |
| 4.3    | ผลของความเป็นกรด-เบสต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจาก<br>กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ความเป็นกรด-เบส 2-8 เวลา 3 ชั่วโมง อัตราเร็ว<br>ในการเขย่า 350 รอบต่อนาที และปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร.....            | 43   |
| 4.4    | ผลของปริมาณไคโตซานต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจาก<br>กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ปริมาณไคโตซาน 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ความ<br>เป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบ<br>ต่อนาที..... | 44   |
| 4.5    | ผลของอัตราเร็วในการเขย่าต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสีย<br>จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราเร็วในการเขย่า 120-350<br>รอบต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และ                                  |      |

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร.....  | 45   |
| 4.6 พืชของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรีของน้ำเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที.....   | 47   |
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาทีและปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดี.....  | 48   |
| 4.8 ไอโซเทอมแลงเมียร์ของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดี.....  | 50   |
| 4.9 ไอโซเทอมฟรุนดลิชของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดี.....   | 52   |
| 4.10 (ก) การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันและน้ำมัน บีโอดี และซีโอดี และ (ข) ร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีที่รอบของการดูดซับต่างๆ ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที.....   | 53   |
| 4.11 ร้อยละการลดลงของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดีในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร.....  | 56   |
| 4.12 ร้อยละการลดลงของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดีในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร.....  | 57   |
| 4.13 ร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วย (ก) กรดไนตริก และ (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....  | 59   |
| 4.14 ภาพ SEM ของ (ก) ไคโตซานเชิงพาณิชย์ (ข) ไคโตซานที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1 (ค) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ง) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ (จ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ฉ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 |      |

| ภาพที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
|        | ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....   | 60   |
| 4.15   | IR สเปกตรัมของ (ก) โคโตซานเชิงพาณิชย์ (ข) โคโตซานที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1 (ค) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ง) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (จ) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ฉ) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร..... | 62   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่สามารถผลิตได้จากทรัพยากรหมุนเวียน ได้แก่ น้ำมันพืช และน้ำมันสัตว์ เช่น ปาล์ม ถั่วเหลือง มะพร้าว เมล็ดเรพ ทานตะวัน สบู่ดำ หรือ น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ ทั้งที่ผ่านการใช้งานแล้วและยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยนำน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ดังกล่าวมา ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอลหรือเมทานอล โดยใช้กรด หรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ไบโอดีเซลมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ไม่มีสารประกอบกำมะถันและ แอโรแมติกเป็นองค์ประกอบ มีจุดวาบไฟและค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล รวมถึงมีสมบัติการหล่อลื่นในเครื่องยนต์ดีกว่าน้ำมันดีเซลจึงช่วยลดการสึกกร่อนของเครื่องยนต์ได้ดี ข้อดีเหล่านี้ส่งผลให้ การใช้ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนได้รับการยอมรับและสนับสนุนจากรัฐบาลให้เป็นพลังงาน ทดแทนน้ำมันดีเซลเพื่อเพิ่มการพึ่งพาตนเองและลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจาก ต่างประเทศ การผลิตไบโอดีเซลประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลักคือ การเตรียมวัสดุและน้ำมันพืช การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล การนำเมทานอลกลับคืน การแยก ส่วนผลิตภัณฑ์ การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และการทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์ ซึ่งในขั้นตอนการล้าง ไบโอดีเซลเป็นการนำไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไปล้างน้ำหรือ กรดอ่อนเพื่อกำจัดกลีเซอรอลและสารปนเปื้อนอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้ ในการผลิตไบโอดีเซล 100 ลิตร จะก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 20 ลิตร (Jaruwat และคณะ, 2010) โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมี สีขาวขุ่น มีค่าความเป็นกรด-เบสสูง องค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเกลือของกรดไขมัน (เกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียม) เช่น สบู่ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน นอกจากนี้ยังมีสารเจือปนอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกลีเซอรอล เนื่องจากส่วนผสมของสารตั้งต้น แอลกอฮอล์ และน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่เกิดจากการล้างไบโอดีเซลจะขัดขวางกระบวนการย่อยสลาย น้ำเสียตามธรรมชาติ ส่งผลให้น้ำเสียดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมสูง จึง ต้องมีการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดทางเคมี กระบวนการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ แต่วิธีการดังกล่าวนั้นยังมี

ข้อบกพร่องอยู่ เช่น เกิดกากตะกอนเป็นจำนวนมาก ใช้เวลาในการบำบัดนาน ใช้พื้นที่จำนวนมาก ในการบำบัด เป็นต้น (Jaruwat และคณะ, 2010) การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ด้วยตัวดูดซับที่มีความพรุน เนื่องจากกระบวนการดูดซับมีข้อดีคือ สามารถแยกโมเลกุลบางชนิดออกดีได้กับตัวดูดซับนั้น เมื่อดูดซับจนอิ่มตัวแล้วก็สามารถนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ดูดซับไว้ออกไปโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น เปลี่ยนอุณหภูมิหรือความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและนำไปดูดซับอีก นอกจากนี้กระบวนการดูดซับยังเป็นกระบวนการแยกสารที่ไม่ยุ่งยาก สะดวก และรวดเร็ว จึงได้รับความนิยมนำไปใช้งานต่างๆ อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมน้ำมัน (ปรารภนา โป่งฟ้า, 2551)

สำหรับตัวดูดซับนั้นมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ เบนโทไนต์ ซิลิกา รวมถึงโคโตซานซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ซึ่งภาพที่มีประจุบวก (Cationic polymer) โคโตซานผลิตจากการนำอนุพันธ์ของโคตินมาตัดหมู่แอสีติลของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปและสามารถผลิตได้จากของเหลือทิ้งจากธรรมชาติ เช่น เปลือกกุ้ง แคนปลาหมึก จึงสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่าง ๆ รวมทั้งปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย

โคโตซานมีสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือสมบัติในการเป็นสารก่อการจับก้อน (Coagulant) และสมบัติในการดูดซับจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะ อนุภาคคอลลอยด์ และสารแขวนลอยได้ การจับสารมลพิษของโคโตซานจะเกิดขึ้นที่หมู่อะมิโนโดยอาศัยหลักการการสะเทินประจุ (Charge neutralization) โดยหมู่อะมิโนสามารถจับกับสารประกอบที่มีประจุลบ เช่น กรดไขมันอิสระ สีย้อม และน้ำมันได้ ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกจะจับกับอิเล็กตรอนของไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของโคโตซานเกิดเป็นพันธะเชิงซ้อน (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2553)

จุดเด่นอีกประการของโคโตซานคือโคโตซานที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้โดยการทำปฏิกิริยาและการชะด้วยสารเคมีเหล่านี้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไฮโดรคลอริก (HCl) ไนตริก (HNO<sub>3</sub>) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสีติก (EDTA) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl<sub>2</sub>) และสารละลายออร์แกนิก เช่น เมทานอล และเอทานอล เป็นต้น (Wan Ngah และคณะ, 2008)



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองของการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยไคโตซาน

## 1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาพารามิเตอร์ของคุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน
3. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพไคโตซานที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยกรดและเบส
4. ศึกษาแบบจำลองของการดูดซับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน
2. ทราบกลไกและแบบจำลองการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยไคโตซานและสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการขยายขนาดเพื่อการประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สภาวะการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย

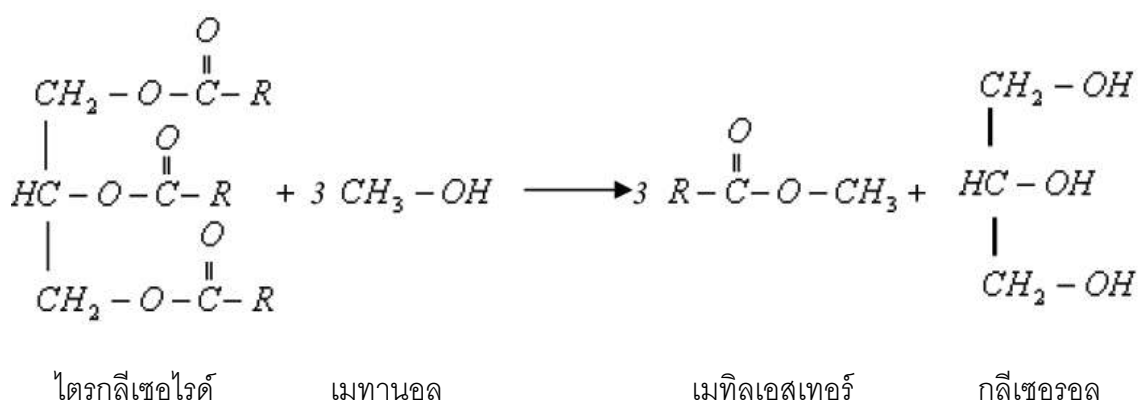
ปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาวิกฤตด้านพลังงานเช่นเดียวกับหลายๆ ประเทศที่พึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเนื่องจากราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและในขณะเดียวกันก็ประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม เช่น ปัญหาภาวะโลกร้อน และปัญหามลพิษทางอากาศ โดยการนำเข้าพลังงานของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยนำเข้าน้ำมันดิบวันละ 70,562 พันตัน หรือคิดเป็นมูลค่า 1,684 ล้านดอลลาร์บาท ถึงแม้ว่ามีการนำเข้าน้ำมันลดลงก็ตาม จากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้นมูลค่าการนำเข้าสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อดุลการค้าของประเทศอย่างมาก ทำให้ประเทศไทยต้องจัดหาพลังงานทดแทนเพื่อใช้ทดแทนน้ำมัน ซึ่งภาครัฐมีมาตรการและนโยบายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใช้พลังงานทดแทนที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2554 พบว่าการใช้พลังงานทดแทนทั้งสิ้น 8,537 พันตัน เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2553 ร้อยละ 19.4 เมื่อเปรียบเทียบมูลค่าการนำเข้าพลังงานและการส่งออกในปี พ.ศ. 2553 (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550)

ปัญหาวิกฤตพลังงานในปัจจุบันของประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากการใช้พลังงานปิโตรเลียมที่สูง ด้านการขนส่งและการคมนาคม ด้านอุตสาหกรรม ด้านธุรกิจและครัวเรือน และด้านเกษตรกรรม พลังงานที่ผลิตได้จึงไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงจำเป็นต้องอาศัยการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ทำให้สูญเสียเงินตราไปกับการนำเข้าพลังงาน ขาดความสามารถในการแข่งขันกับตลาดต่างประเทศ ทั้งยังเป็นปัญหาด้านความมั่นคงในการจัดหาพลังงานในอนาคต กระทรวงพลังงานได้มีการจัดทำแผนยุทธศาสตร์ของพลังงานทดแทนขึ้นในปี พ.ศ. 2547 เพื่อสร้างความมั่นคงด้านพลังงานในประเทศและเพิ่มขีดความสามารถด้านการแข่งขันกับต่างประเทศ ซึ่งทางรัฐบาลได้ให้ความเห็นชอบในแผนยุทธศาสตร์ด้านพลังงานทดแทนโดยกำหนดเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนของไทยเป็นร้อยละ 8 ของการใช้พลังงานทั้งหมด หรือ 6,540 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ ภายในปี พ.ศ. 2554 โดยพลังงานไบโอดีเซล (Biodiesel) ได้ถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายพลังงานทดแทนด้วย ซึ่งกระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนปฏิบัติการพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซลเป็น 2 ระดับคือ ไบโอดีเซลระดับชุมชน และไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ โดยในระหว่างปี พ.ศ. 2548-2549 เป็นการส่งเสริมพลังงานไบโอดีเซลระดับชุมชนไปพร้อมๆ กับการกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศโดยส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลผสมในน้ำมันดีเซล

ร้อยละ 5 (B5) ส่วนไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์กำหนดให้เริ่มทำการผลิตตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 และมีเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 10 (B10) ทั่วประเทศ โดยคาดว่าจะมีความต้องการไบโอดีเซล 8.5 ล้านลิตรต่อวันในปี พ.ศ. 2555

## 2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารประเภทเอสเทอร์โดยสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ทั้งที่ผ่านการใช้งานแล้ว และยังไม่ผ่านการใช้งาน กับเมทานอลหรือเอทานอล ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นเรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (สภาผู้แทนราษฎร คณะกรรมาธิการพลังงาน, 2545) โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลจะให้สารเมทิลเอสเทอร์ซึ่งก็คือไบโอดีเซลและได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

## 2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมอาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ ส่วนใหญ่มักใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ความดันต่ำและใช้เวลาที่สั้นกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลต้องคำนึงถึงการทำให้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์เพื่อให้ได้ผลผลิตร้อยละสูงสุดและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่

- ความบริสุทธิ์ของน้ำมันซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต
- อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ในการผลิตไบโอดีเซล

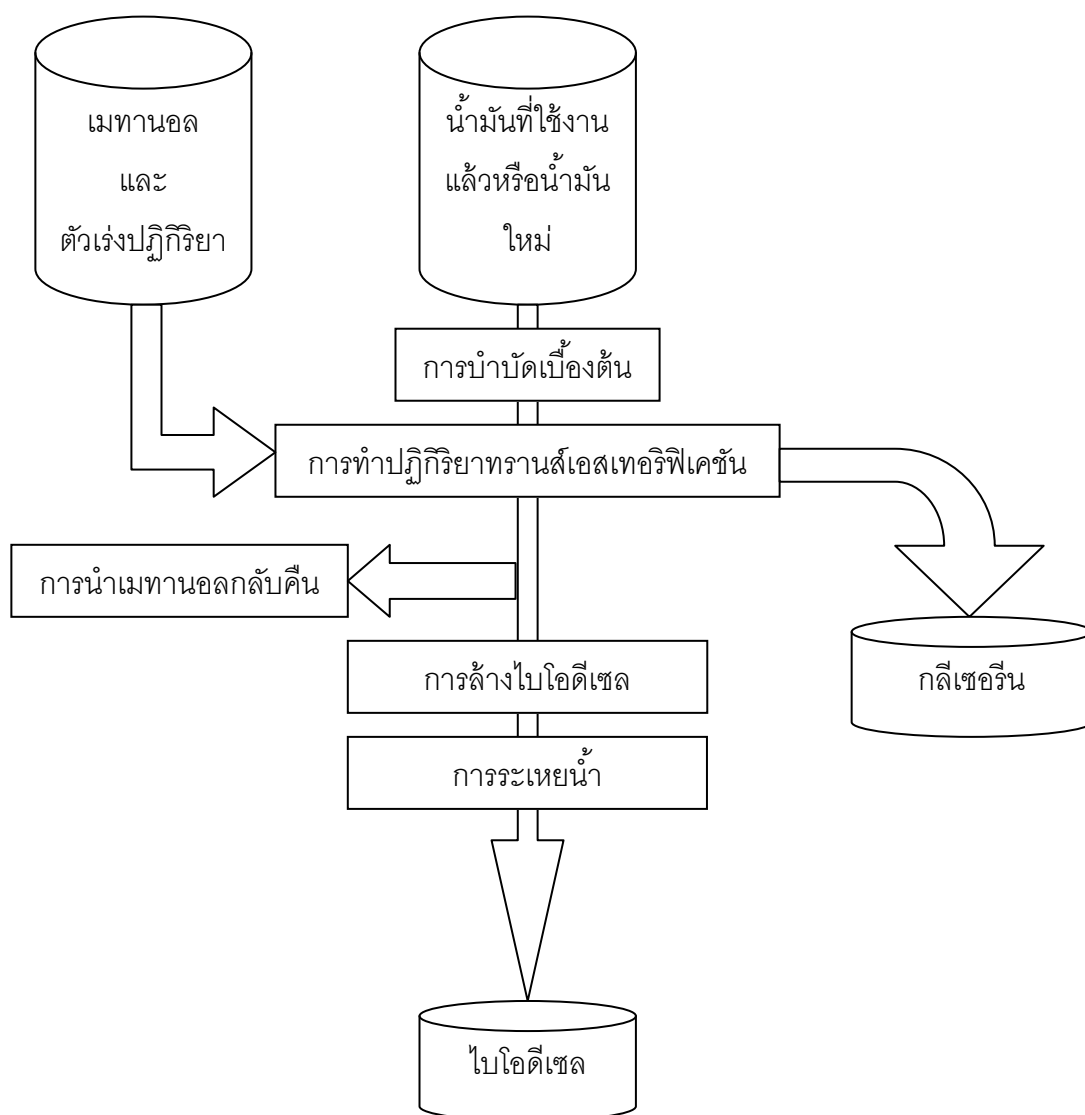
- การผสมสารตั้งต้น
  - ความเข้มข้นและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล
  - อุณหภูมิและความดันในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
- ขั้นตอนในการผลิตไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและกระบวนการผลิต ซึ่งขั้นตอนหลักในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 2.2 กล่าวคือ

1. การเตรียมวัตถุดิบ
2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
3. การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล
4. การนำเมทานอลกลับคืน
5. การแยกส่วนผลิตภัณฑ์
6. การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ
7. การทำกลีเซอรินให้บริสุทธิ์

### 2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ก่อนการผลิตไบโอดีเซลจะต้องมีการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระเพื่อให้ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการแยกยางเหนียวและลดกรดให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักก่อน ส่วนน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกนำมากำจัดโปรตีน วัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 1 จะถูกนำไปกำจัดน้ำออกโดยการให้ความร้อน จากนั้นจึงป้อนน้ำมันเข้าถังเก็บวัตถุดิบและควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เพื่อรอการใช้งาน

การใช้แอลกอฮอล์ที่แตกต่างกันในการผลิตไบโอดีเซลไม่ได้มีความแตกต่างกันในทางเคมี แต่ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาชนิดของแอลกอฮอล์ที่จะนำมาใช้ ได้แก่ ราคาแอลกอฮอล์ ปริมาณที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้แอลกอฮอล์บางชนิดต้องใช้เทคนิคบางอย่างที่แตกต่างกันไปในการทำปฏิกิริยา เช่น การใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (เร็วหรือนาน) หรืออัตราเร็วรอบในการทำปฏิกิริยา โดยในการทำปฏิกิริยาต้องใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากช่วยให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (ได้ไบโอดีเซลประมาณร้อยละ 99.7) และกลีเซอรอลที่มีคุณภาพมาตรฐาน พบว่าการใช้เมทานอลจะดีกว่าการใช้เอทานอล เพราะสามารถนำเมทานอลกลับคืนได้ง่ายกว่าเอทานอล



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2552)

เนื่องจากเอทานอลที่มากเกินไปจะฟอร์มตัวเกิดเป็นสารผสมแอสีไอโทรป (Azeotrope) กับน้ำ ซึ่งกระบวนการกำจัดน้ำออกจากเอทานอลมีราคาสูงและกำจัดยาก ในขณะที่เมทานอลที่มากเกินไปจะไม่มีฟอร์มตัวเกิดเป็นสารผสมจึงสามารถนำกลับคืนได้ง่ายกว่า

### 2.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิด เช่น กรด ด่าง หรือเอนไซม์ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่มีคุณภาพดีหรือมีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำมีค่าต่ำนิยมใช้

ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่เกิดไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงกว่าร้อยละ 1 จะต้องมีการเตรียมวัตถุดิบโดยการลดกรดไขมันอิสระ หรือเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นเอสเทอร์ ก่อนการทำปฏิกิริยา ไม่เช่นนั้นต่างจะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ และกลายเป็นสบู่กับน้ำอย่างรวดเร็วก่อนจะเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพราะมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ในการผลิตไบโอดีเซล ต้องมีการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดที่ใช้ในปฏิกิริยา การเตรียมสารละลายกระทำโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 - 5 ส่วนมาละลายในเมทานอล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งจะได้สารใหม่ที่เรียกว่า โซเดียมเมทอกไซด์ ( $\text{NaOCH}_3$ ) ในการผสมนั้นจะต้องระวังไม่ให้มีน้ำปะปนลงไป เพราะจะไปลดความว่องไวของเมทอกไซด์ไอออน ( $\text{CH}_3\text{O}^-$ ) ในการเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

### 2.3.3 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์จะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพ น้ำมันที่ผ่านการกำจัดน้ำแล้วถูกทำให้มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์ลงไปอย่างช้าๆ ทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง อุณหภูมิขณะนี้จะลดลงเหลือประมาณ 65 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดการกวนเพื่อแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออก เมื่อหยุดการกวน กลีเซอรอลซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแยกชั้นออกจากชั้นเมทิลเอสเทอร์ โดยแยกตัวตกลงมาที่ก้นถัง ดังนั้นในชั้นเมทิลเอสเทอร์จะเหลือกลีเซอรอลอยู่น้อย ปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์จะสามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และเมื่อทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง น้ำมันจะทำปฏิกิริยามากกว่าร้อยละ 95

### 2.3.4 การนำเมทานอลกลับคืน

การผลิตไบโอดีเซลมักใช้เมทานอลในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ หลังการทำปฏิกิริยาจะมีเมทานอลเหลืออยู่ ซึ่งควรแยกกลับมาใช้ใหม่ โดยอาจทำการกลั่นเมทานอลกลับคืนก่อนหรือหลังการแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลออกจากกันแล้ว ในการนำเมทานอลกลับคืนจะต้องระวังไม่ให้มีน้ำปะปนในเมทานอลที่กลั่นได้ เพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.3.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์

หลังจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแล้วจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ สารเอสเทอร์และกลีเซอรอล ซึ่งสาร 2 ชนิดนี้มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยสารเอสเทอร์และกลีเซอรอลมีความหนาแน่นประมาณ 880 และ 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ทำให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดนี้สามารถแยกชั้นได้ดี การแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์สามารถทำได้โดยการถ่ายกลีเซอรอลออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ในขณะที่ยังร้อนอยู่เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็นขึ้นกลีเซอรอลจะกลายเป็นของแข็ง นอกจากนี้การแยกกลีเซอรอลออกจากเอสเทอร์อาจทำได้โดยการทิ้งชั้นเมทิลเอสเทอร์และชั้นกลีเซอรอลในภาชนะไว้ให้เย็นประมาณ 12 ชั่วโมง ชั้นกลีเซอรอลจะแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับความเย็น ส่วนชั้นเมทิลเอสเทอร์จะยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ทำให้สามารถแยกชั้นเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลได้

### 2.3.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะถูกปนเปื้อนด้วยสารต่างๆ เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟและกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน กลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซดาไฟ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้นจึงต้องทำการกำจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆ ครั้ง ซึ่งการล้างครั้งแรกจะกระทำโดยการพ่นละอองน้ำลงในด้านบนของถังปฏิกรณ์ เพื่อให้หยดน้ำพาล้างปนเปื้อนออก โดยเฉพาะสบู่ที่ตกลงด้านล่างของถัง ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างแต่ละครั้งประมาณ 1/4 ของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ในการล้างครั้งแรกๆ จะไม่มีการกวน เพราะสบู่เป็นตัวประสานให้อนุภาคของเหลวสองชนิดที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันรวมกันได้ (Emulsifier) ทำให้เมทิลเอสเทอร์สามารถรวมตัวกับน้ำเป็นคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยของเหลวอย่างน้อย 2 ชนิดซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกันในลักษณะที่ผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Emulsion) ซึ่งจะรวมเป็นเนื้อเดียวกันและแยกจากกันได้ยาก การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่นจะทำประมาณ 4-5 ครั้ง และเพิ่มการกวนในการล้างครั้งหลังๆ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสารปนเปื้อนเหลืออยู่ ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างน้ำจะมีน้ำปนเปื้อนอยู่เล็กน้อยซึ่งสามารถกำจัดออกได้โดยการระเหย

### 2.3.7 การทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์

กลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีน้ำผสมอยู่ ดังนั้นชั้นของกลีเซอรอลที่แยกออกมาจึงเรียกว่า กลีเซอริน ซึ่งหมายถึงกลีเซอรอลผสมน้ำ กลีเซอรอลดิบ

ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลมักมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 60 เนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากปฏิกิริยา และสบู่ที่เกิดจากปฏิกิริยา สaponification การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับกลีเซอรอลดิบสามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยากับกรด ซึ่งในปฏิกิริยานั้นสบู่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันและเกลือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กรดไขมันจะแยกชั้นออกจากกลีเซอรอล ทำให้ได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

## 2.4 การจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะทำให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล โดยสารประกอบของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแต่ละแหล่งอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ และกระบวนการในการผลิต โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกลีเซอรอลร้อยละ 33-81 น้ำร้อยละ 1-8 แอลกอฮอล์ร้อยละ 8-20.8 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3-9 (Zhang และคณะ, 2003; Jude และคณะ, 2010) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไนโตรเจนในปริมาณต่ำ ทำให้ย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อน้ำเสียถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดปัญหาน้ำเน่าเสียตามมา ปัจจุบันจึงมีการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

### 2.4.1 การจัดการน้ำเสียโดยกระบวนการทางเคมี

การกำจัดสารมลพิษที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากรน้ำเสียสามารถทำได้ง่ายกว่าการกำจัดสารมลพิษที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือ อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีขนาด  $10^{-6}$  มิลลิเมตร ถึง  $10^{-3}$  มิลลิเมตร อนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองภายในเวลาจำกัด จึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) แล้วตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำโดยใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้สารเคมีเรียกว่า กระบวนการจับก้อน (Coagulation process) และสารเคมีที่ใช้เรียกว่าสารก่อการจับก้อน (Coagulant) เมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพเคลื่อนที่มาสัมผัสและรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการก่อการจับกลุ่ม (Flocculation process) โดยฟล็อกที่เกิดขึ้นจะสามารถทำให้ตกตะกอนได้ง่าย

สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการจับก้อนในปัจจุบันมีหลายประเภท เช่น สารส้ม และปูนขาว วิธีนี้สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์เพื่อลดค่าซีโอดีบี (COD) ของแข็งแขวนลอยได้ด้วย นอกจากนี้ยังมีสารเคมีกลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เช่น



พอลิอะลูมิเนียม คลอไรด์ (PAC) ซึ่งเป็นสารตัวใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานมีประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนและรวมตัวตะกอนสูง ตกตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม ใช้เวลาในการกวนน้อย และละลายน้ำได้ดีแต่ราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดค่าซีโอดีควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการเลือกใช้สารเคมีเพื่อลดต้นทุน และก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (สวีณา เกตุสุวรรณ, 2543)

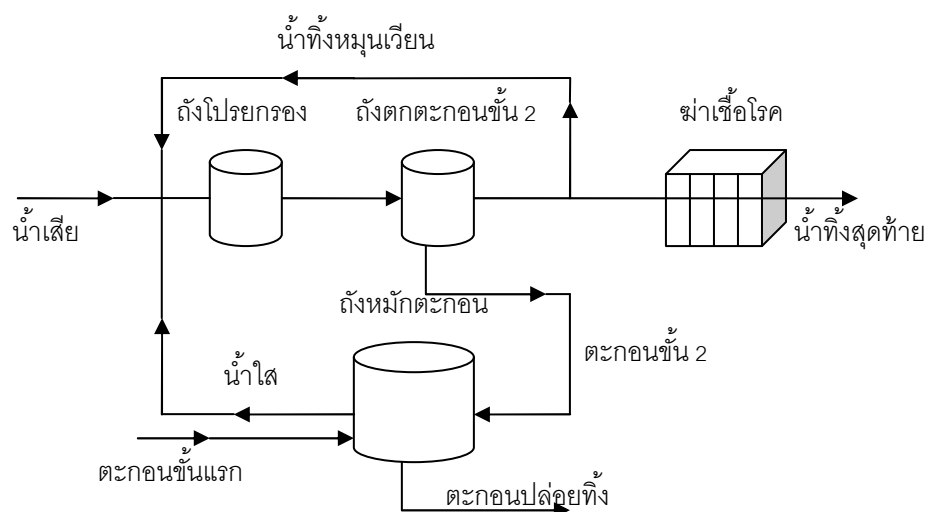
ประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการได้แก่ ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เวลา และความแรงของการผสม ความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการตกตะกอน ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน และปริมาณของสารที่ช่วยให้ตกตะกอน

**2.4.2 การจัดการน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ** กระบวนการทางชีวภาพที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่พบส่วนใหญ่ ได้แก่

#### 2.4.2.1 กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน

##### 1) ระบบโปรยกรอง

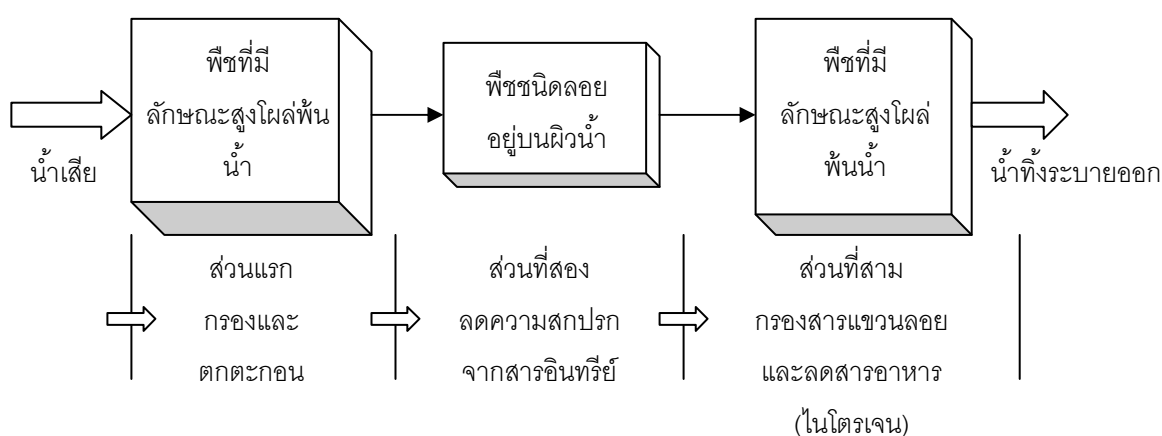
ระบบโปรยกรองประกอบด้วยถังที่บรรจุตัวกลาง (Medium) ที่มีไบโอฟิล์ม (Biofilm) เคลือบอยู่และพร้อมที่จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย การบำบัดจะเริ่มจากการปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ถังโปรยกรองดังภาพที่ 2.3 การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียไหลผ่านตัวกลางโดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะแพร่ไปยังชั้นไบโอฟิล์มที่มีออกซิเจนหรือชั้นฟิล์มที่ไม่มีออกซิเจน และเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นตะกอนรวมทั้งเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) น้ำ และแก๊สอื่น ๆ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะถูกปล่อยไปที่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนออก และนำไปฆ่าเชื้อต่อไป



ภาพที่ 2.3 ระบบบำบัดแบบโปรยกรอง (เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์, 2549)

## 2) ระบบบึงประดิษฐ์

ระบบบึงประดิษฐ์ (Construction wetland) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติโดยการใช้พืชที่มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสีย โดยพืชจะนำเอาสารปนเปื้อนในน้ำเสียบางชนิดมาใช้เป็นสารอาหารและเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้น้ำเสียดังกล่าวที่ 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์นี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีราคาถูกไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง ประหยัดพลังงานและดูแลรักษาง่าย นอกจากนี้วิธีนี้ยังผลิตกากตะกอนในปริมาณต่ำอีกด้วย

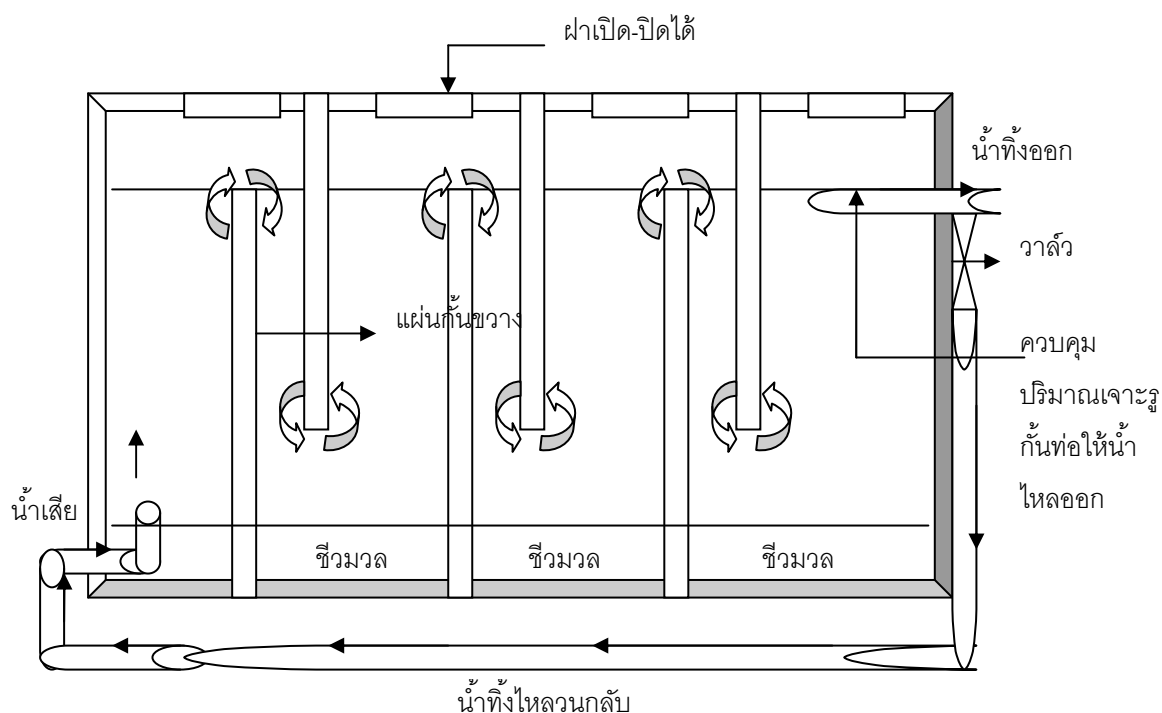


ภาพที่ 2.4 ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ (ณัฐพงศ์ วรรณจิตร และสุรีย์ บุญญานุกพงศ์, 2551)

### 2.4.2.2 กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

#### 1) ระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจน (Anaerobic baffled reactor) มีลักษณะเป็นถังหรือบ่อดินที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ น้ำเสียจะไหลขึ้นลงสลับกันผ่านเข้าที่ละห้องซึ่งแต่ละห้องจะบรรจุชีวมวล (Biomass) เอาไว้ภายใน จุลินทรีย์ที่อยู่บนชีวมวลจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อัตราเร็วของการไหลขึ้นลงประมาณ 0.2-0.4 เมตรต่อชั่วโมง ความหนาแน่นของชีวมวลจะมากในห้องช่วงต้นของบ่อ และจะลดลงในช่วงท้ายบ่อทำให้สามารถแยกชีวมวลออกจากน้ำที่จะผ่านออกจากบ่อได้ง่าย หากมีชีวมวลหลุดออกจากห้องช่วงต้นก็ยังมีห้องถัดไปเพื่อกักชีวมวลได้อีกดังภาพที่ 2.5 นอกจากนี้คุณสมบัติอีกประการของระบบนี้คือ ถังหมักมีลักษณะการไหลของน้ำที่สวนทางกับชีวมวล ทำให้จุลินทรีย์และน้ำเสียมีโอกาสสัมผัสกันดีเป็นอย่างดี โดยไม่ต้องมีการเครื่องกลหรือพลังงานใดๆ



ภาพที่ 2.5 ระบบบำบัดแบบแผ่นกันรั่วออกซิเจน (Agriculture and Consumer Protection, 2009)

ในการทำให้เกิดการกวนผสม แต่ระบบนี้มีข้อเสียคือ มีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้พื้นที่ทำงานเป็นจำนวนมาก

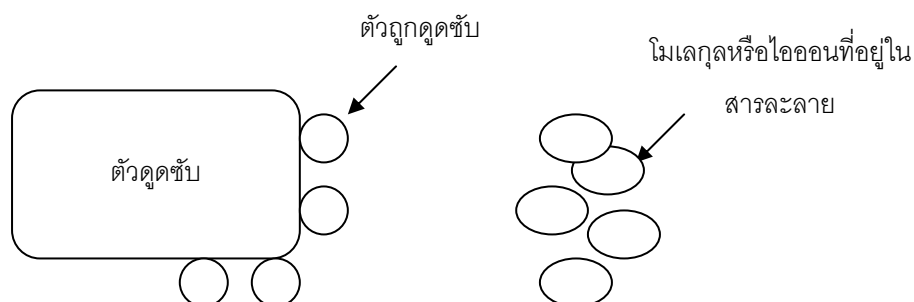
## 2.5 กระบวนการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เป็นการทำให้ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) เกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับดังแสดงในภาพที่ 2.6 ชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวของตัวดูดซับเนื่องจากแรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกันดังนี้

ระยะที่ 1 : โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 : โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่ (Diffusion) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 : เกิดการดูดติดผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งอาจจะดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย (ENSC 4734 Topic V ION EXCHANGE, 2009)

### 2.5.1 ลักษณะของการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

ลักษณะของการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

(ก) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หรือการดูดซับแบบวานเดอร์วาลส์ (Van der wal's adsorption) เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ดังนั้นตัวถูกดูดซับจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือแก๊สที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ และคายความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันหรืออุณหภูมิของระบบลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการนี้ซึ่งเรียกว่า การคายการดูดซับ (Desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ระหว่างการดูดซับทางกายภาพ สารถูกดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี แรงดึงดูดของการดูดซับทางกายภาพประกอบด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der wal's force) และแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ส่งผลให้การคายซับและการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับสามารถดำเนินการได้ง่าย

(ข) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption) เป็นการดูดซับที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูง เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง พันธะที่เกิดขึ้นในการดูดซับลักษณะนี้ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) หรือพันธะไอออนิก (Ionic bond) ความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการดูดซับนั้นจะสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพมาก คืออยู่ในช่วง -40 ถึง -1000 กิโลจูลต่อโมล

ระหว่างการดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเท่านั้น ปฏิกิริยานี้จึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและภาวะแวดล้อม โดยที่อุณหภูมิปกติสารประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

**ตารางที่ 2.1** ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (Alley, 2000: Kenneth, 1992)

| การดูดซับทางกายภาพ  | การดูดซับทางเคมี   |
|---|--|
| 1. ความร้อนของการดูดซับต่ำ (<2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)                                | 1. ความร้อนของการดูดซับสูง (>2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)                       |
| 2. ไม่มีควมจำเพาะเจาะจง   | 2. มีความจำเพาะเจาะจงสูง   |
| 3. เป็นการดูดซับได้ทั้งชั้นเดียวหรือหลายชั้น  | 3. เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว   |
| 4. ไม่มีการแตกตัวของสารที่ถูกดูดซับ   | 4. อาจเกี่ยวข้องกับการแตกตัว   |
| 5. มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่ำเท่านั้น   | 5. เกิดขึ้นได้ในอุณหภูมิสูง  |
| 6. เกิดอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการกระตุ้นและผันกลับได้  | 6. เกิดการกระตุ้น อาจเกิดได้ช้า และผันกลับไม่ได้   |
| 7. ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทั้งในโมเลกุลของตัวถูกดูดซับหรือที่ผิวหน้า | 7. เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้า |

### 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

(ก) ธรรมชาติของสารดูดซับ ได้แก่พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถ

เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ

(ข) ธรรมชาติของตัวดูดซับ ได้แก่ ความสามารถในการละลาย น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล และความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity) ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อยเพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

(ค) สภาพแวดล้อมหรือภาวะในการทำงาน ผลของอุณหภูมิของสารละลายความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน (Exothermic reaction) การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่เป็นการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อการดูดซับ

### 2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

การดูดซับของเหลวด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปจะมีการคายซับเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ในที่สุดจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายซับจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆจะเป็นสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล ( $C_e$ ) ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับคือสมการแลงเมียร์ (Langmuir equation) และสมการฟรุนดลิช (Freundlich equation)

### 2.5.3.1 สมการแลงเมียร์

สมการของแลงเมียร์ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1918 เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิว และถูกประยุกต์ใช้ครั้งแรกกับระบบที่ใช้ดินเป็นตัวดูดซับโดย Fride และ Shapiro ในปี ค.ศ. 1956 และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ. 1957 เพื่ออธิบายการดูดซับฟอสเฟตบนดิน ต่อมาจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ สมการแลงเมียร์ใช้ได้ดีเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นต่ำเช่นเดียวกับสมการของฟรุนดลิช สมมุติฐานของสมการแลงเมียร์คือ

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน
2. การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)
3. ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆพื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมมุติฐานเหล่านี้ไม่สามารถอธิบายการดูดซับของตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นสารเนื้อผสม เช่น ดิน เพราะสมมุติฐานของสมการแลงเมียร์จะใช้ได้ดีกับการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็นสารเนื้อเดียว สมการแลงเมียร์ (2.1) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{K_L X_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.1)$$

|       |       |     |   |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | $q_e$ | คือ | ปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|       | $X$   | คือ | ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)                       |
|       | $m$   | คือ | ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)                                |
|       | $C_e$ | คือ | ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)               |
|       | $X_m$ | คือ | ปริมาณการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน)                     |
|       | $K_L$ | คือ | ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ  |

คำนวณลักษณะของการดูดซับ ( $R_L$ )

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o} \quad (2.2)$$

|               |     |   |
|---------------|-----|---|
| $C_o$         | คือ | ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| $R_L > 1$     | คือ | การดูดซับไม่ดี (Unfavorable)                      |
| $R_L = 1$     | คือ | การดูดซับคงที่เป็นเส้นตรง (Linear)                |
| $0 < R_L < 1$ | คือ | การดูดซับดี (Favorable)                           |
| $R_L = 0$     | คือ | ผันกลับไม่ได้ (Irreversible)                      |

สมการของแลงเมียร์สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง (2.3) ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{K_L X_m} \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e$  และ  $C_e/q_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีค่าความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/K_L X_m$



### 2.5.3.2 สมการฟรอนดลิช

สมการฟรอนดลิชถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับแก๊สและตัวถูกละลายในสารละลาย ซึ่งจะอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกละลายในรูปของลอการิทึม (Logarithmic) ดังสมการ (2.4)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.4)$$

|       |       |     |   |
|-------|-------|-----|---|
| เมื่อ | $q_e$ | คือ | ปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|       | $K_F$ | คือ | ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ  |
|       | $n$   | คือ | ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ                                      |

สมการของฟรอนดลิชสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง (2.5) ได้ดังนี้

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$

## 2.6 ตัวดูดซับ

ปัจจุบันตัวดูดซับมีหลายชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) นิยมใช้เพื่อดูดซับแก๊สหรือของเหลวได้ มีความจำเพาะในการดูดซับสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผงหรือเป็นเม็ดก็ได้ เบนโทไนต์ (Bentonite) เป็นดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) เบนโทไนต์มีประจุลบและมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นตัวดูดซับที่ดีหาได้ง่าย และมีปริมาณมากในแถบภาคเหนือของประเทศไทย ซิลิกาเจล (Silica gel) สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยากำจัดน้ำออกจากกรดซิลิกอิก (Silicic acid) ในทางการค้ามี 2 แบบ คือแบบ A มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 650 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2-3 อังสตรอม และแบบ B มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 450 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 7 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากแก๊สต่างๆ รวมถึงไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งเป็นสารที่สามารถผลิตได้จากของเหลือทิ้งตามธรรมชาติ เช่น เปลือกกุ้ง

แกนปลาหมึก จึงสามารถย่อยสลายได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่าง ๆ และไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นสารตกตะกอนชีวภาพ (Bioflocculant) ในการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงเป็นตัวดูดซับที่ดีเนื่องจากไคโตซานมีประจุบวกสามารถดูดซับสารมลพิษประเภทไขมันได้ดี นอกจากนี้การพัฒนาไคโตซานจากของเหลือทิ้งดังกล่าวจะเป็นการเพิ่มมูลค่าจากของเหลือทิ้งและเป็นการลดปริมาณขยะอุตสาหกรรมอีกด้วย (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2547)

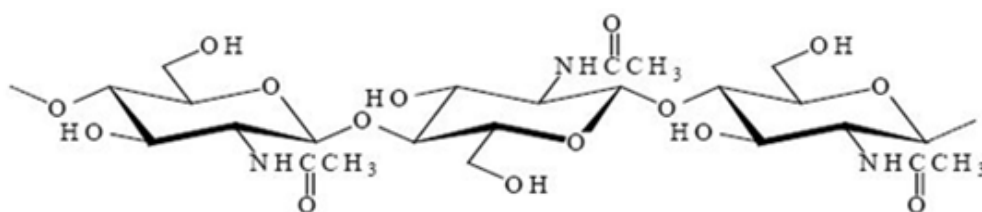
## 2.7 ไคตินและไคโตซาน

### 2.7.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน

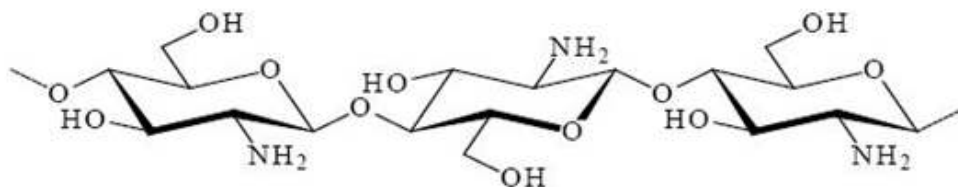
ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตซึ่งได้รับการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1811 โดย Braconnot ในราวปี ค.ศ. 1823 พอลิเมอร์ ชนิดนี้ถูกเรียกว่า “ไคติน” ในภาษากรีกไคตินมีความหมายว่า เกราะหุ้ม ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พอลิเมอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกัน และสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยไคตินจะพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสาหร่าย องค์กรประกอบของเปลือกแข็งที่หุ้มเซลล์ของรา ยีสต์ และจุลินทรีย์หลายชนิด รวมถึงสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจำพวกกุ้ง ปู ปลาหมึก และแมลง โดยจะพบในรูปแบบของสารประกอบที่ปนอยู่กับสารอื่น เช่น เปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู หรือบางครั้งอาจจะอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆ ข้างต้นจะพบในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ปัจจุบันไคตินผลิตจากเปลือกกุ้งและเปลือกปู ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล โดยพบว่าจะมีไคตินปริมาณร้อยละ 14-27 โดยน้ำหนัก เมื่อคิดเป็นปริมาณต่อปีของสิ่งเหลือทิ้งจากการผลิตและแปรรูปกุ้งและปูทั้งโลกหรือสามารถผลิตไคตินได้ถึง 150 ล้านกิโลกรัมต่อปี ไคตินละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิกที่ปราศจากน้ำ แต่ไคตินไม่ละลายในด่างเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ โครงสร้างทางเคมีของไคตินแสดงในภาพที่ 2.7(ก) เมื่อทำการกำจัดหมู่แอซิติล (Deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้นทำให้โครงสร้างของหมู่อะซีตามิโน ( $-NHCOCH_3$ ) ของไคตินเปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของทุกหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ของสารพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.7(ข) เป็นที่น่าสังเกตว่าไคโตซานมีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส (Cellulose) ภาพที่ 2.7(ค) ต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส และหมู่อะมิโนของไคโตซาน (ประภัสสร สุวัฒน์วารวณ, 2540)

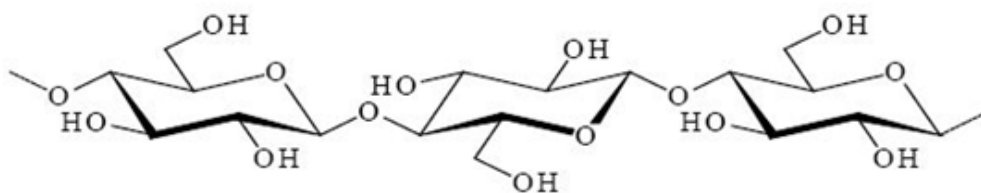
ความแตกต่างระหว่างไคตินและไคโตซานคือระดับการกำจัดหมู่แอสिटิล (Degree of deacetylation) หรือร้อยละของหมู่อะมิโนอิสระที่มีอยู่ในสายพอลิแซคคาไรด์ โดยทั่วไปไคโตซานมีระดับการกำจัดหมู่แอสिटิลอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 70-95 ส่วนไคตินมักจะมีระดับการกำจัดหมู่แอสिटิลที่ต่ำกว่าร้อยละ 30 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน เช่น ความหนืดและความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างที่สำคัญสองประการ คือระดับการกำจัดหมู่แอสिटิล และมวลโมเลกุล โดยทั่วไปไคโตซานมักละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์ เช่น กรดแอสिटิกเข้มข้นร้อยละ 1 ในขณะที่ไคตินจะไม่ละลายในน้ำหรือกรดและความหนืดของสารละลายไคโตซานจะเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547)



(ก) โครงสร้างของไคติน



(ข) โครงสร้างของไคโตซาน



(ค) โครงสร้างของเซลลูโลส

ภาพที่ 2.7 (ก) โครงสร้างของไคติน (ข) โครงสร้างของไคโตซาน (ค) โครงสร้างของเซลลูโลส (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2553)

## 2.7.2 กระบวนการผลิตไคติน - ไคโตซาน

การผลิตไคตินมีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการแยกโปรตีน (Deproteinization) ขั้นตอนการแยกแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนการแยกเม็ดสี (Decoloration) ซึ่งขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองสามารถสลับลำดับก่อนหลังได้ การผลิตไคโตซานจากไคตินสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ แต่วิธีทางชีวภาพโดยการใช้เอ็นไซม์ในการดึงหมู่แอสซิทิลออกจากไคตินนั้นยังอยู่ระหว่างการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ส่วนวิธีทางเคมีเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของไคตินและไคโตซาน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีชีวภาพเข้ามาผสมผสานกับกระบวนการทางเคมีมาใช้ในการผลิตไคตินและไคโตซาน เพื่อผลิตไคตินและไคโตซานที่มีคุณสมบัติตามต้องการ และเหมาะสมกับการนำไปใช้ สมบัติที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของไคติน-ไคโตซาน ได้แก่ ลักษณะวัตถุดิบ ความชื้น เถ้า โปรตีน ระดับการกำจัดหมู่แอสซิทิล ความหนืด กากที่เหลือหลังการละลาย สารหนู (As) ตะกั่ว (Pb) ความเป็นกรด-ด่าง และกลิ่น ไคตินและไคโตซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหาร ยา และวัสดุ การแพทย์ เครื่องสำอาง การเกษตร การบำบัดน้ำเสีย บรรจุภัณฑ์ เส้นใยสังเคราะห์ และกระดาษ (พูนทรัพย์ วิชัยพงษ์, 2553)

รูปแบบของไคโตซานที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในขณะนี้ มี 4 รูปแบบ ได้แก่

1. ไคโตซานที่เป็นเกล็ดหรือแผ่นบางเล็กๆ (Flake)
2. ไคโตซานที่เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง (Micromilled powder)
3. ไคโตซานในรูปแบบสารละลายเป็นของเหลวหนืดซึ่งความเข้มข้นอาจจะแตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้สั่ง
4. ไคโตซานที่อยู่ในรูปเม็ดขนาดประมาณ 300-500 ไมโครเมตร (Bead)

ไคโตซานในรูปแบบต่างๆ นั้นหากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีความชื้นต่ำคือไม่เกินร้อยละ 5-10 หากความชื้นสูงเกินกว่านี้ก็อาจจะทำให้เกิดเชื้อราหรือมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เข้าไปปะปนอยู่ทำให้คุณภาพลดลงหรืออาจจะเกิดความเป็นพิษ

กระบวนการผลิตไคโตซานมีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียวคือขั้นตอนการกำจัดหมู่แอสซิทิลในไคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้น สำหรับขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการผลิตไคโตซานแสดงในภาพที่ 2.8

จากขั้นตอนการเตรียมไคโตซานที่แสดงไว้ข้างต้นพบว่าคุณภาพของไคโตซานจะขึ้นอยู่กับ

- ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอซิติลจากโคตินซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความหนืดของสารละลายโคโตซานต่างกัน เมื่อใช้สารละลายต่างชนิดกัน ขณะเดียวกันความเข้มข้นของสารละลายต่างจะมีผลต่อคุณสมบัติการละลายของโคโตซาน
- อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอซิติลหากใช้อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอซิติลที่สูงเกินไปจะทำให้โคโตซานเสียสภาพ (Degradation)
- คุณภาพของโคตินที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโคโตซานซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งและวัตถุดิบที่นำมาแยกโคตินและวิธีการที่ใช้แยกโคติน

### การพิสูจน์ความบริสุทธิ์ของโคโตซานอย่างง่าย

**ประการแรก** คุณลักษณะของสารโคโตซาน โดยโคโตซานแท้หรือบริสุทธิ์จะใสเมื่อนำมาละลายเป็นสารละลายต้องไม่เหนียวเกินไป และเมื่อเวลาเปิดขวดหรือภาชนะที่บรรจุโคโตซานจะไม่มีอากาศออกมาเพราะหากมีอากาศออกมาก็คือการเน่าบูดของสารบางชนิด หรือกระบวนการสกัดโคโตซานไม่บริสุทธิ์ ถ้านำไปบ่มบัตจะทำให้ในบ่มบัตเกิดการเน่าเสียเร็วขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้

**ประการที่สอง** ทดสอบด้วยน้ำยาล้างจาน โดยการหยดน้ำยาล้างจานลงในโคโตซานในปริมาณที่เท่ากัน หากเป็นโคโตซานที่บริสุทธิ์อนุภาคโคโตซานจะจับตัวกันเหมือนไขขาวแต่ถ้าเป็นโคโตซานไม่บริสุทธิ์จะไม่จับตัวกัน

### 2.7.3 การประยุกต์ใช้โคตินและโคโตซาน

ปัจจุบันมีการค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวางในการนำโคตินและโคโตซานไปใช้ในด้านต่างๆ เช่น การเกษตร อาหาร เส้นใยและสิ่งทอ ตลอดจนการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียดังนี้

#### 1) ด้านการเกษตร

โคตินและโคโตซานถูกนำมาใช้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตรทั้งพืชและสัตว์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากการใช้โคตินและโคโตซานให้ผลดีในแง่ของการช่วยลดความเสี่ยงของเกษตรกรและผู้บริโภคต่อการได้รับสารพิษจากปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืช รวมทั้งสามารถช่วยเพิ่มผลผลิต ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตร และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้และปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อม การใช้ประโยชน์จากโคตินและโคโตซานทางการเกษตรสามารถทำได้เกือบครบวงจร ดังตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานดังนี้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของไคตินที่พบในปู กุ้ง แมลง สัตว์ที่มีเปลือกแข็ง และสาหร่าย (Knorr, 1984)

| ชนิด                     | ร้อยละไคติน          | ชนิด                       | ร้อยละไคติน       |
|--------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|
| <u>Crustacea</u>         |                      | <u>Insects</u>             |                   |
| Cancer (crab)            | 72.1 <sup>c</sup>    | May beetle                 | 16 <sup>b</sup>   |
| Carcinus (crab)          | 0.4-3.3 <sup>a</sup> | Diptera (true fly)         | 54.8 <sup>c</sup> |
|                          | 8.29 <sup>b</sup>    | Pieris (sulfur butterfly)  | 64 <sup>c</sup>   |
| Paralithodes (King crab) | 35 <sup>b</sup>      | Grasshopper                | 2-4 <sup>a</sup>  |
| Callinectes (blue crab)  | 14 <sup>a</sup>      |                            | 20 <sup>c</sup>   |
| Pleuroncodes (red crab)  | 1.3-1.8 <sup>b</sup> | <u>Molluscan organs</u>    |                   |
|                          | 5.8 <sup>b</sup>     | Clamshell                  | 6.1 <sup>b</sup>  |
| Crangon (shrimp)         | 69.1 <sup>c</sup>    | Oyster shell               | 3.6 <sup>a</sup>  |
|                          | 28 <sup>d</sup>      | Krill shell, deproteinized | 40.2 <sup>c</sup> |
| Alaskan shrimp           |                      | <u>Fungi</u>               |                   |
| <u>Insects</u>           | 2.0 <sup>b</sup>     | <i>Aspergillus niger</i>   | 42.0 <sup>e</sup> |
| Periplaneta (cockroach)  | 18.4 <sup>c</sup>    | <i>Penicilium notatum</i>  | 18.5 <sup>e</sup> |
| Blatella (cockroach)     | 10 <sup>b</sup>      | <i>Penicillium</i>         | 20.1 <sup>e</sup> |
|                          | 35 <sup>c</sup>      | <i>chrysogenium</i>        | 2.9 <sup>e</sup>  |
|                          | 5-15 <sup>b</sup>    | <i>Saccharomyces</i>       | 44.5 <sup>e</sup> |
| Colcoptera (beetle)      | 2.1 <sup>a</sup>     | <i>cerevisiae</i>          | 19.0 <sup>e</sup> |
| Tenebrio (beetle)        | 27-35 <sup>c</sup>   | <i>Mucor rouxii</i>        |                   |
|                          | 4.9 <sup>b</sup>     | <i>Lactarius vellereus</i> |                   |
|                          | 31.3 <sup>c</sup>    |                            |                   |

<sup>a</sup>Wet body weight

<sup>b</sup>Dry body weight

<sup>c</sup>Organ weight of cuticle

<sup>d</sup>Total dry weight of cuticle

<sup>e</sup>Dry weight of the cell wall

1.1 ใช้ปรับสภาพดินสำหรับเพาะปลูก โดยสามารถนำไคตินหรือไคโตซานที่เป็นผงหรือสารละลายมาผสมกับดินสำหรับเพาะปลูก และใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อได้ สำหรับการที่ใช้ไคโตซานผสมในปุ๋ยจะทำให้สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวดินได้ดี ป้องกันการระเหยของน้ำ และเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารและแร่ธาตุให้กับพืชด้วย

1.2 การประยุกต์ใช้กับสัตว์ พบว่าไคโตซานสามารถเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของสุกรได้ส่งผลให้สุกรมีสุขภาพแข็งแรง ลดอาการป่วยของสุกรภายในฟาร์ม รวมทั้งต้นทุนการผลิตลงได้ นอกจากนี้ยังมีการทดลองผสมไคโตซานในอาหารสำหรับไก่เนื้อ (ปิยะบุตร วาณิชพงษ์ พันธุ์ และสุวดี จันทรกระจ่าง, 2545) ซึ่งมีผลทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตดี มีสุขภาพแข็งแรง สมบูรณ์กว่ากลุ่มที่ไม่ได้ใช้ไคโตซาน

## 2) ด้านเส้นใยและสิ่งทอ

ปัจจุบันได้มีการใช้ไคโตซานผสมในเส้นใยเสื้อผ้าและสิ่งทอ เนื่องจากสามารถป้องกัน ต้านทานพวกแบคทีเรียและเชื้อราได้ สามารถนำมาเคลือบเส้นใยผ้าเพื่อลดกลิ่นอับชื้นได้ ทั้งยังพบว่าไคโตซานมีคุณสมบัติโดดเด่นในการเสริมสร้างความเหนียว และความแข็งแรงให้กับเส้นใย ทำให้ได้เส้นใยที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย

## 3) ด้านอาหาร

ไคโตซานถูกนำมาใช้เป็นอาหารเสริมเพื่อลดน้ำหนัก โดยการผสมกับอาหารชนิดอื่นๆ เพื่อดักจับไขมันส่วนเกิน ลดคอเลสเตอรอลในเลือด และดักจับสารพิษในร่างกายนอกทางการขับถ่าย รวมถึงเป็นสารที่ใช้เติมในอาหารและยาได้ จึงใช้เป็นสารกันบูด สารปรุงแต่งเพื่อคงรูปและคงสีในอาหาร และเป็นสารเคลือบอาหารเพื่อการเก็บรักษาอาหารให้ยาวนานยิ่งขึ้น

## 4) การใช้ประโยชน์จากไคโตซานทางการเกษตร อาหารเสริม สุขภาพ

ด้านเกษตรกรรมมีการนำไคโตซานมาใช้เป็นอาหารเสริมให้แก่พืชเพื่อช่วยควบคุมการทำงานของพืช ผลไม้ และต้นไม้ให้เจริญเติบโตดีโดยการเพิ่มปุ๋ยพิเศษให้แก่พืชผักผลไม้ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการป้องกันโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์ และเชื้อราบางชนิด ช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่ต้นพืช ผัก ผลไม้ และไม้ดอกไม้ประดับ โดยสร้างภูมิคุ้มกันให้แก่เมล็ดพืชที่จะนำไปเพาะขยายพันธุ์ทำให้มีอัตราการขยายพันธุ์เพิ่มขึ้น

### 5) การใช้ไคโตซานในการประมง

การประมงมีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการยืดอายุการรักษาหรือเก็บถนอมอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ นอกจากนี้ได้มีการสกัดโปรตีนจากหัวกุ้งด้วยเพื่อนำโปรตีนมาใช้เป็นสารเสริมคุณค่าทางอาหารที่ทำจากสัตว์น้ำ การปรุงแต่งรสและกลิ่นในอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากสัตว์น้ำ เป็นต้น ทั้งยังนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น การเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำ วิธีการนั้นมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การผสมกับอาหารเม็ดในอัตราส่วนต่างๆกันเพื่อให้กุ้งกิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการไปกระตุ้นภูมิคุ้มกันในตัวกุ้ง กระตุ้นการย่อยอาหาร และการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำ

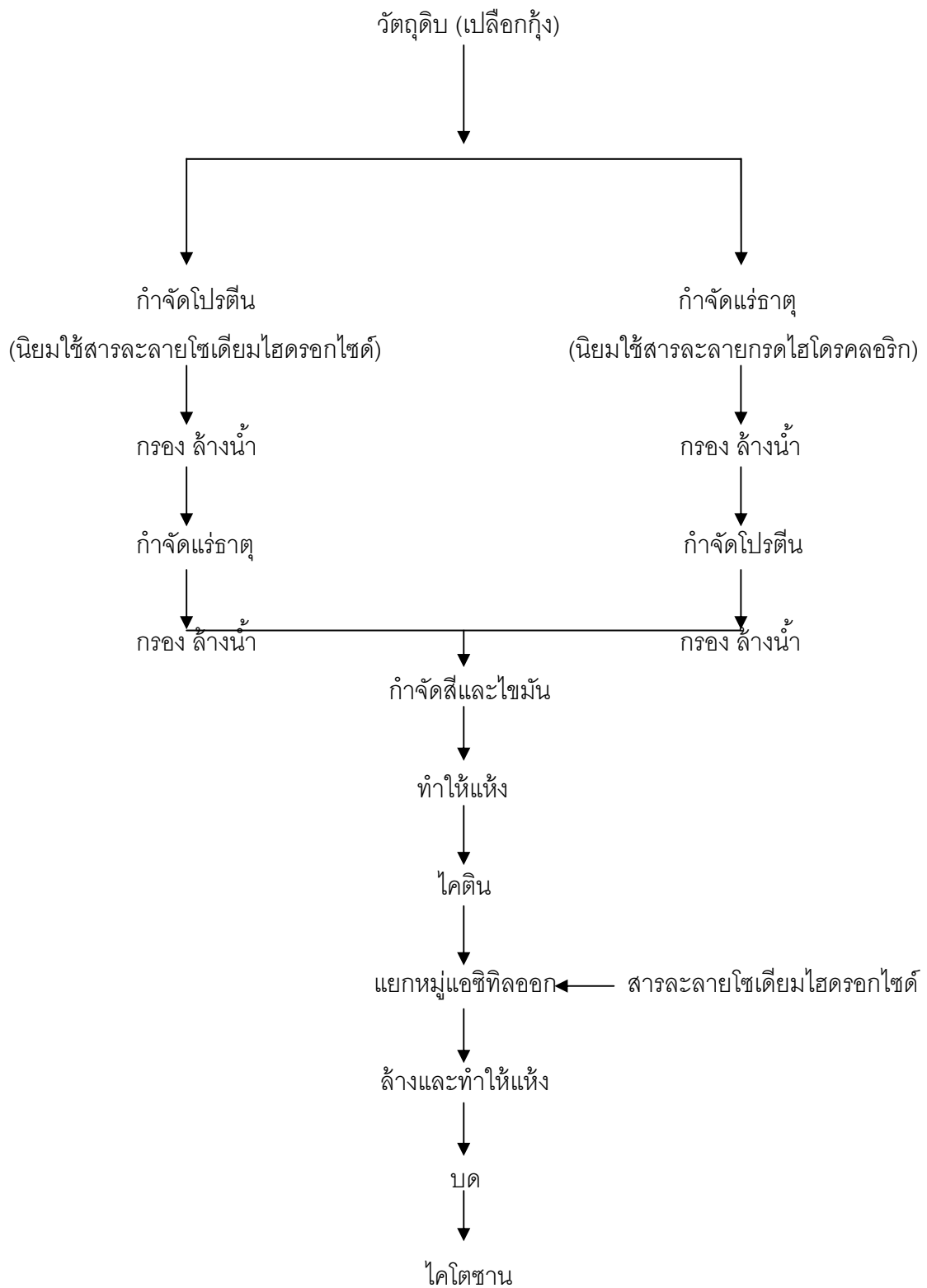
### 6) การใช้ไคโตซานในการแพทย์

ไคโตซานถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการนำมาประกอบอาหารเพื่อลดน้ำหนัก ทำผลิตภัณฑ์เสริมความงาม เช่น ครีมทาผิว ทำเป็นแผ่นไคโตซานเพื่อปิดปากแผลที่เกิดจากการผ่าตัดเฉพาะที่ พบว่าแผ่นไคโตซานจะช่วยให้คนป่วยเกิดความเจ็บปวดน้อยกว่าการใช้ผ้าก๊อชชุบน้ำมันวาสลินมาปิดแผลเหมือนที่เคยปฏิบัติมาในสมัยก่อน นอกจากนี้เวลาที่แผลปิดดีแล้วและมีการลอกแผ่นไคโตซานออกสะดวกและง่ายกว่าการลอกแถบผ้าก๊อช เพราะจะไม่มีอาการสูญเสียเลือดที่เกิดจากการลอกแผ่นปิดแผลออกทำให้ผู้ป่วยไม่เจ็บปวดเท่ากับการใช้แถบผ้าก๊อชปิดแผล นอกจากนี้ยังใช้ไคโตซานเป็นส่วนผสมของยาหลายประเภท เช่น ยาที่ใช้พ่นทางจมูกเพื่อบรรเทาอาการโรคทางเดินหายใจ เป็นต้น

### 7) ด้านการบำบัดน้ำเสีย

ไคโตซานมีสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์หรือความมีขั้วไฟฟ้า และสมบัติในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักทำให้สามารถดักจับกับโลหะหนัก และสารอื่นๆในน้ำ เช่น มีสารแขวนลอยสูง โดยประจุบวกของไคโตซาน สามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในกระบวนการกำจัดของเสียออกจากน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท ประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียออกจากน้ำโดยใช้ไคโตซานนั้นสูงถึงร้อยละ 99





ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการสกัดไคตินและไคโตซาน (บุศรากรณ์ มหาโยธี, 2537)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยไคโตซาน

โกวิทป์ ปิยะมังคลา (2551) ศึกษาความสามารถในการดูดซับและจลศาสตร์ของการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรซิน พบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม เกิดขึ้นที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 โดยใช้ไคโตซานปริมาณ 47.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียจะเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order reaction) โดยไอโซเทอมของการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

Wan Ngah และคณะ (2008) ศึกษากระบวนการดูดซับกรดฮิวมิกในน้ำด้วยไคโตซานครอสลิงค์อีพิคลอโรไฮดริน (Crosslinked chitosan-epichlorohydrin, chitosan-ECH) พบว่าปฏิกิริยาการดูดซับกรดฮิวมิกจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งไม่แท้ (Pseudo-first order reaction) การดูดซับกรดฮิวมิกจะสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich) โดยมีค่าความจุของการดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 44.84 มิลลิกรัมต่อกรัม ภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับกรดฮิวมิกที่ดีที่สุดคือที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 อัตราเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่เวลา 50 นาที นอกจากนี้ไคโตซาน-ECH ที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึงร้อยละ 60 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 1.0 โมลต่อลิตร

Kyzas และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอดทีฟ (Remazol Yellow Gelb 3RS) และสีเบสิก (Basic Yellow 37) ด้วยกระบวนการดูดซับของไคโตซานเชื่อมขวางทั้งแบบผงและเม็ด ปิดโดยการดัดแปรหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอไมด์ ตัวแปรที่ศึกษาคือค่าความเป็นกรด-เบสของการทดลอง รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่าไคโตซานผงมีความจุในการดูดซับสูงกว่าไคโตซานแบบเม็ดปิด ไคโตซานที่ดัดแปรหมู่เอไมด์จะดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ขณะที่ไคโตซานที่ดัดแปรหมู่คาร์บอกซิลจะดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 และภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อใช้ตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร แบบจำลองของการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์และเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Hena (2010) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม ( $Cr^{6+}$ ) ในน้ำของไคโตซานที่ผ่านดัดแปรด้วย Poly 3-methyl thiophene โดยตัวแปรที่ศึกษาคือเวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ พบว่าไคโตซานดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีในบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนอยู่ โดยภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมคือที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 กลไกการดูดซับจะสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ นอกจากนี้สามารถ

นำไคโตซานที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์

Emara และคณะ (2011) ศึกษาการดูดซับโลหะด้วยไคโตซานพอลิเมอร์ดัดแปร 2 ชนิด คือ ไคโตซิน (ChitoCin) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไคโตซานกับซิงกานาโมอิด และไคโตไทโอซิน (ChitoThioCin) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไคโตซานกับซิงกานาโมอิดไอโซไทโอไซยาเนท พบว่าความจุของการดูดซับด้วยไคโตไทโอซินสูงกว่าไคโตซิน โดยไคโตซิน (ChitoCin) และไคโตไทโอซิน (ChitoThioCin) มีความจุในการดูดซับไอออนของทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) สูงกว่าไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) โครเมียม ( $\text{Cr}^{3+}$ ) โคบอลต์ ( $\text{Co}^{2+}$ ) และนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) โดยสามารถดูดซับไอออนของทองแดงได้ 0.461-0.572 มิลลิโมลต่อกรัม และสามารถดูดซับเหล็ก โครเมียม โคบอลต์ และนิกเกิลได้ 0.235-0.341 0.078-0.099 0.046-0.057 และ 0.041-0.053 มิลลิโมลต่อกรัมตามลำดับ โดยแบบจำลองการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช

Nesic และคณะ (2012) ศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะของเมมเบรนไคโตซาน/มอนต์มอริลโลไนต์ในการดูดซับสีย้อม Bezactiv Orange V-3R โดยมีอัตราส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ในการสังเคราะห์แตกต่างกันที่ร้อยละ 10-50 ของเมมเบรน โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 30 50 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความจุในการดูดซับสีย้อมของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับที่ความเป็นกรด-เบสที่ 6 แบบจำลองของการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการฟรุนดลิชและเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Kim และคณะ (2012) ศึกษาการดูดซับของสีย้อม Reactive Black 5 (RB 5) โดยเม็ดไคโตซานครอสลิงค์ด้วยอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยมีความจุในการดูดซับสูงสุดที่ 2.06 โมลต่อกิโลกรัม ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 และอุณหภูมิ 308 เคลวิน แบบจำลองการดูดซับจะสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

## 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Ahmad และคณะ (2003) ศึกษาการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและไขมันในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี การสกัดด้วยตัวทำละลาย การดูดซับ และการแยกโดยใช้เมมเบรน พบว่าภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนที่ปริมาตร 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กวน 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยร้อยละ 93 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยตัวทำละลาย 8 คือ

นอร์มัลเฮกเซนโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อน้ำเสีย 6:10 สามารถลดปริมาณน้ำมันได้ถึงร้อยละ 95 กระบวนการดูดซับนั้นจะลดปริมาณน้ำมันได้ร้อยละ 88 และกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรนโดยใช้เมมเบรนชนิด GH และ CE(GH) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9 และความดัน 1,000 กิโลปาสคาล สามารถลดของแข็งแขวนลอยและน้ำมันได้ร้อยละ 63 และร้อยละ 43 ตามลำดับ

Ahmad และคณะ (2005a) ศึกษาการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและไขมันในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิดได้แก่ ไคโตซาน ถ่านกัมมันต์ และเบนโทไนท์ พบว่าไคโตซานเป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น โดยไคโตซานสามารถดูดซับไขมันในน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 99 และพบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยมีปริมาณลดน้อยลงเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยภาวะที่เหมาะสมคือที่เวลา 30 นาที เขย่าด้วยอัตราเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ตกตะกอนที่ 30 นาที และค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4-5 สำหรับ ถ่านกัมมันต์และเบนโทไนท์นั้น สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้เพียงเท่านั้น ที่ปริมาตร 35 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Ahmad และคณะ (2005b) ศึกษาการดูดซับน้ำเสียจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ไคโตซานผงและเกล็ด ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ค่าความเข้มข้น เวลา รวมถึงค่าความเป็นกรด-เบสที่ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบไคโตซานแบบผงและแบบเกล็ด พบว่าไคโตซานแบบผงสามารถดูดซับน้ำเสียจากน้ำมันปาล์มได้ร้อยละ 99 โดยการดูดซับน้ำเสียจากน้ำมันปาล์มจะสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช จลนศาสตร์ของการดูดซับจะสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่สอง

ปัทมัทธ เจริญสาคร (2549) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการบำบัดทางเคมีคือค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสีย ชนิด ปริมาณสารจับก้อน และสารช่วยก่อการจับก้อน พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 4 ร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ประจุบวก 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถกำจัดไขมันได้สูงถึงร้อยละ 98 และกำจัดค่าซีโอดี ค่าบีโอดี กลีเซอรอล และเมทานอลเท่ากับร้อยละ 38-41 29-41 16-23 และ 25-33 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนซึ่งปรับเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือที่ซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการบำบัดซีโอดีได้ตามมาตรฐานเป็นเวลา 4 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 93 96 และ 99 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนพบว่า

ภาวะที่เหมาะสมควรมีค่าซีโอดีเริ่มต้นน้อยกว่า 5,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้เวลาในการกำจัดค่าซีโอดีได้ตามมาตรฐานเป็นเวลา 13 วัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ซีโอดีกรอง และเมทานอลร้อยละ 98.99 และ 98 ตามลำดับ

Chavalparit และคณะ (2009) ศึกษาถึงการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการตอบสนองของพื้นผิว (Response surface) ตัวแปรที่ศึกษาคือค่าความเป็นกรด-เบส ค่าศักย์ไฟฟ้า และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อการกำจัดค่าซีโอดี ค่าน้ำมันไขมัน และค่าของแข็งแขวนลอย พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการลดสารมลพิษคือที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.06 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 18.2 โวลต์ และที่เวลา 23.5 นาที ซึ่งสามารถลดค่าซีโอดี ค่าน้ำมันไขมัน และค่าของแข็งแขวนลอยที่ร้อยละ 55.43 98.42 และ 96.59 ตามลำดับ

Jaruwat และคณะ (2010) ศึกษาการจัดการน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือการนำกลับไบโอดีเซลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นและการบำบัดทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้ว  $Ti/RuO_2$  เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับไบโอดีเซลด้วยกรดซัลฟิวริกที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 สามารถนำกลับไบโอดีเซลได้ร้อยละ 7 โดยปริมาตร ภายหลังจากกระบวนการนำกลับพบว่าสามารถลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และไขมันได้มากกว่าร้อยละ 13-24 40-74 และ 87-98 ตามลำดับ กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 และความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 0.061 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดค่าซีโอดี และไขมันได้สำเร็จ และกำจัดค่าบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 94.5 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของสารมลพิษผ่านมาตรฐาน กรณีของกระบวนการบำบัดในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีค่าบีโอดี ค่าซีโอดี และไขมันสูงกว่ามาตรฐาน 84 500 และ 9.33 เท่าตามลำดับ

Kumjadpai และคณะ (2011) ศึกษาการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการนำกลับทางเคมีและการตกตะกอน โดยกระบวนการแรกจะเป็นการนำกลับไบโอดีเซล และกรดไขมันอิสระโดยการสกัดด้วยกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก โดยตัวแปรที่ศึกษาคือค่าความเป็นกรด-เบสที่ 1.0-8.0 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการนำกลับทางเคมีด้วยกรดซัลฟิวริกที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1-2.5

เวลา 7 นาที โดยสามารถนำกลับไปโอดีเซล และไขมันอิสระได้ประมาณ 15-30 มิลลิลิตรต่อลิตร ส่วนการบำบัดขั้นที่สองจะเป็นการบำบัดน้ำเสียที่เหลืออยู่โดยใช้การตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต  $[Al_2(SO_4)_3]$  ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.5-10 และพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.5-7.0 พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนร่วมโดยอะลูมิเนียมซัลเฟต  $[Al_2(SO_4)_3]$  ที่ปริมาตร 2 กรัมต่อลิตร จะกำจัดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าน้ำมันและไขมันได้ถึงร้อยละ 98.3 97.7 และ 99.2 ตามลำดับ ส่วนพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ปริมาตร 1 กรัมต่อลิตร จะกำจัดค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าน้ำมันและไขมันได้ถึงร้อยละ 98.2 96.5 และ 98.6 ตามลำดับ

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานโดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.1. ตัวอย่างน้ำและวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) โดยเป็นน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล ซึ่งมีลักษณะสีขาวขุ่นคล้ายน้ำสบู่ (ภาพที่ 3.1) สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียที่ทำการวิเคราะห์คือ ความเป็นกรด-เบส ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี ค่าน้ำมันและไขมัน ค่าของแข็งละลายได้ และค่าของแข็งแขวนลอย



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล

ไคโตซานผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้จากบริษัท ต้าหมิงเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด โดยเป็นไคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้ง มีลักษณะเป็นผงสีขาวเหลือง (ภาพที่ 3.2) มีน้ำหนักเบา ไม่มีกลิ่น ระดับการกำจัดหมู่แอซิติลร้อยละ 93 เมื่อละลายด้วยกรดแอสติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) จะได้สารละลายที่มีความหนืด 5 – 2000 เซนติพอยส์



ภาพที่ 3.2 ไคโตซานผง

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย (สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็น Analytical reagent, AR grade)

#### 3.2.1 การวิเคราะห์ซีไอดี

- กรดซัลฟิวริก (Conc.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98 % ของ Mallinckrodt Chemicala)
- ซิลเวอร์ซัลเฟต (AgSO<sub>4</sub> ของ UNIVAR)
- โปแตสเซียมไฮโดรเจนพทาเรต (KHP ของ UNIVAR)
- โพแทสเซียมไดโครเมต (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ของ QReC)
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator ของ Mallinckrodt Chemicala)
- ไอร์รอน (II) แอมโมเนียซัลเฟต (Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O ของ UNIVAR)

#### 3.2.2 การวิเคราะห์บีไอดี

- โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ของ UNILAB)
- ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> ของ UNILAB)
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH<sub>4</sub>Cl ของ UNIVAR)
- แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O ของ UNIVAR)
- ไดโซเดียมฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต (Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O ของ CARLO ERBA)
- แคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous CaCl<sub>2</sub> ของ UNIVAR)
- แมงกานีสซัลเฟตมอนอไฮเดรต (MgSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O ของ QReC)
- เฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ของ UNILAB)
- โซเดียมไอโอไดด์ (NaI ของ UNILAB)
- โซเดียมเอไซด์ (NaN<sub>3</sub> ของ CARLO ERBA)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH ของ RANKEM)
- โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O ของ UNIVAR)

#### 3.2.3 การวิเคราะห์น้ำมันและไขมัน

- เฮกเซน (n-Haxane 99% ของ QReC)
- โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำ (Anhydrous Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ของ UNILAB)



### 3.2.4 การฟื้นฟูสภาพโคโคซาน

- กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$  69-70% ของ J.T.Baker)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$  ของ RANKEM)

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- เครื่องอังไอน้ำ ยี่ห้อ Memmert
- ชุดกลั่น (Distillation apparatus) ยี่ห้อ TOKYO RIKAKIKAI
- ขวด BOD ขนาด 250-330 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด ยี่ห้อ WHEATON
- เครื่องฟั่นอากาศ ยี่ห้อ TWIN Magic 6600
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส ยี่ห้อ CONTHERM POLAR 1000C
- หลอดย่อยยมีฝาสลักเกลียว (Digestion vessels) ขนาด  $20 \times 150$  มิลลิเมตร ยี่ห้อ PYREX MEXICO
- กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 41 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 70 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
- ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
- เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ Sartorius และ METTLER TOLEDO
- เครื่องกวนแม่เหล็ก ยี่ห้อ ARE Heating Magnetic Stirrer
- เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ SevenEasy pH METTLER TOLEDO
- เครื่องเขย่า ยี่ห้อ CTL รุ่น Orbital Shaker Model SK3 SSeriker II

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry FT-IR 1760)
- สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope SEM JEOL JSM-5410LV JAPAN)
- แก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry GC 6890 MS 5975A Agilent technologies USA)

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น (Pretreatment) จะดำเนินการตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Jaruwat และคณะ, 2010) เพื่อแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระที่ตกค้างในน้ำเสียโดยนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 1,000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริกและนำไปเขย่าด้วยอัตราเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จะสังเกตเห็นน้ำตัวอย่างแยกเป็น 2 ส่วน โดยแยกส่วนบนออกและนำส่วนล่างไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าของแข็งละลายได้ และค่าของแข็งแขวนลอย

3.5.2 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระแล้วด้วยตัวดูดซับโคโคซาน โดยแยกส่วนล่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นแล้ว ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร มาปรับค่าความเป็นกรด-เบส ในช่วง 2-8 ด้วยกรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร จากนั้นเติมปริมาณของตัวดูดซับโคโคซานลงในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำเสียอยู่ ปริมาณโคโคซาน 0.5-5 กรัมต่อลิตร ที่อัตราเร็วในการเขย่าที่ 120-350 รอบต่อนาที ที่เวลา 0-5 ชั่วโมง กรองแยกโคโคซานด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นนำน้ำเสียที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติตามมาตรฐาน คือค่าซีโอดี ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method) ค่าบีโอดี ด้วยวิธี Dilution Method ค่าน้ำมันและไขมัน ด้วยวิธีการสกัดด้วย n-Hexane ค่าของแข็งละลายได้ ด้วยวิธีระเหยแห้ง (Dried) และค่าของแข็งแขวนลอย ด้วยวิธีกราวิเมตริก (Gravimetric) และนำน้ำเสียตัวอย่างก่อนและหลังการบำบัดไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)

3.5.3 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยการนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นตามอัตราส่วนน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (มิลลิลิตร) ต่อ น้ำกลั่น (มิลลิลิตร) ดังนี้ 50:0 40:10 30:20 20:30 10:40 และ 5:45 แล้วนำมาดูดซับด้วยโคโคซานที่ภาวะที่เหมาะสม จากนั้นกรองแยกโคโคซานด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำน้ำเสียที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติตามมาตรฐานทั้งก่อนและหลังการดูดซับคือค่าน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี

3.5.4 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับซ้ำ โดยนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการดูดซับด้วยโคโคซานในครั้งที่ 1 ที่ภาวะที่เหมาะสมมาใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติมโคโคซานเขย่าที่อัตราเร็วรอบและเวลาที่ภาวะที่เหมาะสม หลังจากนั้นกรองแยกโคโคซานออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดไปวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และ

ค่าซีไอดี และนำน้ำเสียส่วนหนึ่งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากข้างต้น ไปทำการบำบัดซ้ำในลักษณะเดิมจำนวน 6 ครั้ง ด้วยโคโตซานใหม่ โดยในแต่ละครั้งจะใช้ปริมาณน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร

3.5.5 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพโคโตซานด้วยสารละลายกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โดยนำโคโตซานที่ผ่านการใช้งานไปแช่ด้วยสารละลายกรดไนตริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าที่อัตราเร็วรอบที่ 130 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยกโคโตซานด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำโคโตซานที่แยกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด แล้วอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจากนั้นนำโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้วไปทำการดูดซับซ้ำที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที และนำน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับด้วยโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพไปวิเคราะห์ค่าน้ำมันและไขมัน ค่าบีไอดี และค่าซีไอดี

3.5.6 นำโคโตซานก่อนและหลังการใช้งานไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) และไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยไคโตซาน ก่อนการทำงานน้ำเสียจะถูกบำบัดเบื้องต้นโดยการปรับความเป็นกรด-เบสด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 เพื่อแยกน้ำมันไบโอดีเซลและกรดไขมันอิสระที่ตกค้างในน้ำเสีย และนำไปเขย่าด้วยอัตราเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ตามงานวิจัยของ Jaruwat และคณะ (2010) จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน

สมบัติของน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการดูดซับจะถูกวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-เบส (2-8) ปริมาณไคโตซาน (0.5-5.5 กรัมต่อลิตร) เวลา (0.5-5 ชั่วโมง) และอัตราเร็วในการเขย่า (120-350 รอบต่อนาที) เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแล้วจะมีการศึกษาการบำบัดซ้ำและการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ รวมถึงแบบจำลองของการดูดซับ

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

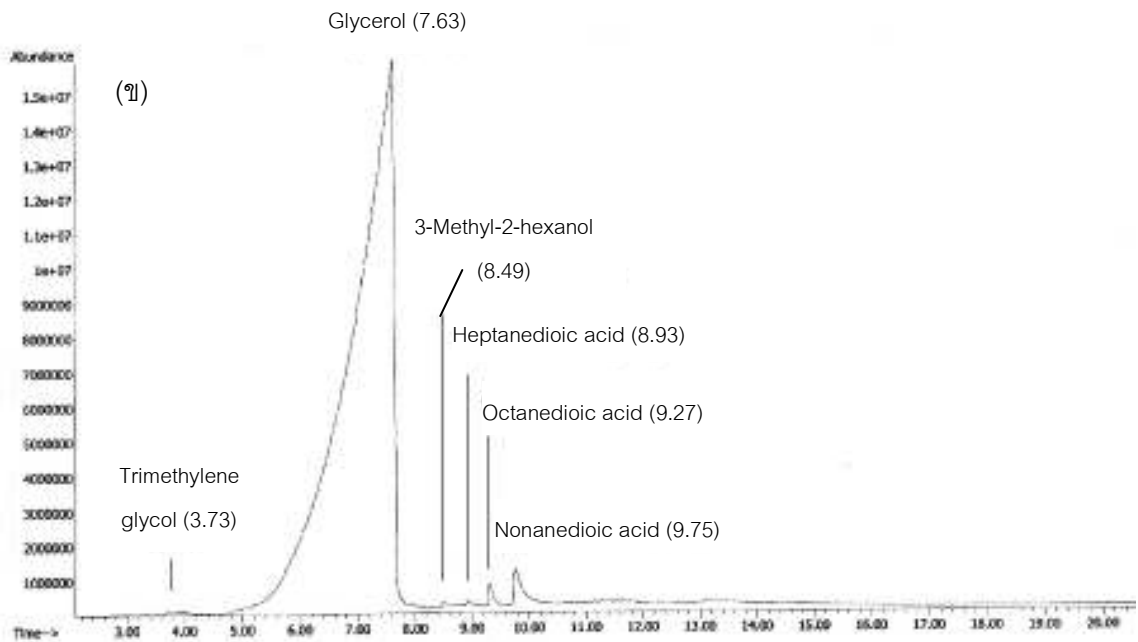
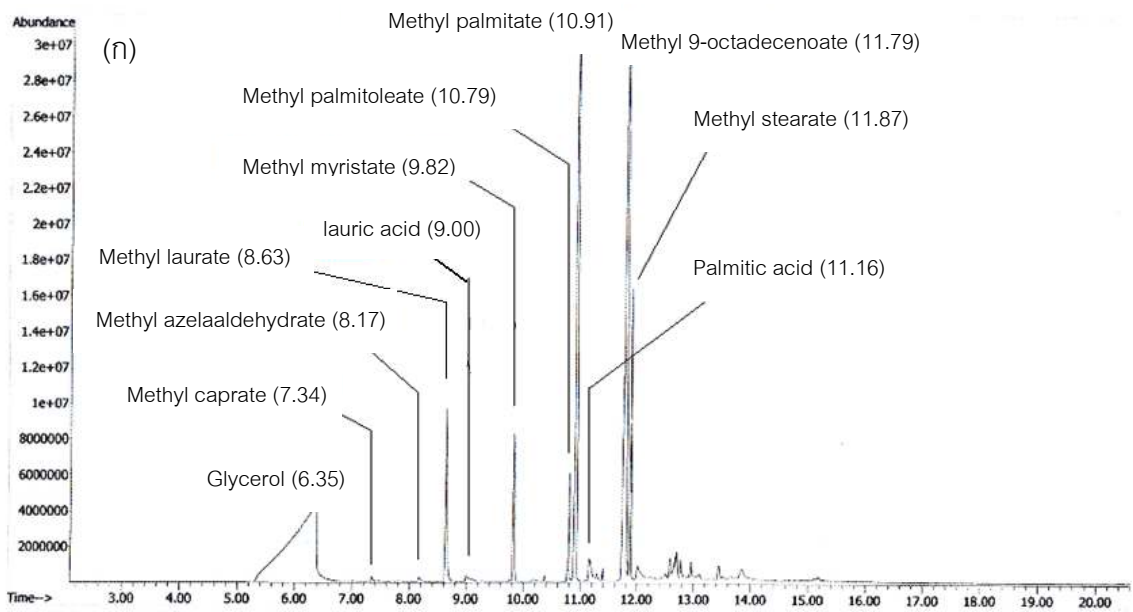
น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นวัตถุดิบจะมีสีขุ่นคล้ายสบู่เหลวและมีกลิ่นคล้ายน้ำมัน มีความเป็นกรด-เบสสูงและเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐาน 69-75 เท่า บีโอดีสูงกว่ามาตรฐาน 25-34 เท่า ซีโอดีสูงกว่ามาตรฐาน 75-100 เท่า ของแข็งละลายได้สูงกว่ามาตรฐานกว่า 1.78-1.80 เท่า และของแข็งแขวนลอยสูงกว่ามาตรฐานกว่า 4.5-4.6 เท่า เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (ภาพที่ 4.1(ก)) พบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลประกอบด้วยกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและกรดไขมันซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตคือกรดไขมันชนิดอิ่มตัว ได้แก่ เมทิลแคปเรท (Methyl caprate) เมทิลลอเรท (Methyl laurate) กรดลอริก (Lauric acid) เมทิลไมริสเทท (Methyl myristate) เมทิลปาล์มิเตต (Methyl palmitate) กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) และเมทิลสเตียเรท (Methyl stearate) และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว

**ตารางที่ 4.1** สมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลก่อนและหลังการบำบัดเบื้องต้น

| พารามิเตอร์                                | มาตรฐานน้ำทิ้ง<br>(กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี<br>และสิ่งแวดล้อม, 2539) | สมบัติของน้ำเสีย |                           |
|--|---|------------------|---------------------------|
|  |   | ก่อนบำบัด        | หลังการบำบัด<br>เบื้องต้น |
| ค่าความเป็นกรด-เบส                         | 5.5 – 9.0   | 9.6-10.26        | 2.00-2.40                 |
| ปริมาณน้ำมันและไขมัน<br>(มิลลิกรัมต่อลิตร) | < 15  | 1,045-1,125      | 690-875                   |
| บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)                  | < 60  | 1,502-2,060      | 1,320-1,792               |
| ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)                  | < 400   | 29,990-41,200    | 21,427-23,454             |
| ของแข็งละลายได้<br>(มิลลิกรัมต่อลิตร)      | < 3,000   | 5,340-5,400      | 4,530-4,560               |
| ของแข็งแขวนลอย<br>(มิลลิกรัมต่อลิตร)       | < 150   | 670-690          | 220-230                   |

ได้แก่ เมทิลอะเซลาแอลดีไฮเดรต (Methyl azelaaldehyde) เมทิลปาล์มิโตเลท (Methyl palmitoleate) เมทิล 9-ออกตะเดเซโนเอท (Methyl 9-octadecenoate)

เมื่อนำน้ำเสียไปบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าน้ำจะแยกเป็น 2 ชั้น ชั้นบนมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มคล้ายน้ำมัน ซึ่งเป็นชั้นของกรดไขมันที่ละลายอยู่ในไบโอดีเซล (Jaruwat และคณะ, 2010) ส่วนชั้นล่างจะใสขึ้น เนื่องจากโปรตอนที่แตกตัวจากกรดจะเข้าไปแทนที่ไฮเดียมในโครงสร้างของสบู่เปลี่ยนสบู่เป็นกรดไขมัน ซึ่งกรดไขมันจะไม่ละลายน้ำจึงแยกชั้นลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำ เมื่อนำน้ำเสียชั้นล่างมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีพบว่าค่าพารามิเตอร์มีค่าลดลงแต่ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ (ตารางที่ 4.1) โดยค่าความเป็นกรด-เบสลดลงเหลือประมาณ 2-2.4 เท่า ปริมาณน้ำมันและไขมันลดลงประมาณ 1.2-1.6 เท่า แต่ยังสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ 46-58 เท่า บีโอดีลดลงประมาณ 1.13-1.56 เท่า แต่ยังสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ 22-29 เท่า ซีโอดีลดลงประมาณ 1.27-1.92 เท่า แต่ยังสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ 53-58 เท่า ของแข็งละลายได้ลดลงกว่า 1.18 เท่า และของแข็งแขวนลอยลดลงกว่า 3 เท่า แต่ยังสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมอยู่



ภาพที่ 4.1 โครมาโตแกรมของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีของ (ก) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และ (ข) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

กว่า 1.5 และ 1.47 เท่าตามลำดับ ซึ่งยังไม่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี (ภาพที่ 4.1(ข)) พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นจะมีองค์ประกอบหลักคือ กลีเซอรอล ส่วนกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทุกชนิดที่พบในองค์ประกอบของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นจะไม่พบในองค์ประกอบของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น เนื่องมาจากการเติมกรดเข้าไปและเปลี่ยนเป็นโครงสร้างของกรดไขมัน นอกจากนี้จะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกิดขึ้นหลายชนิดได้แก่ กรดเฮปแทนไดโอยิก (Heptanedioic acid) กรดอ็อกเทนไดโอยิก (Octanedioic acid) กรดโนนาไดโอยิก (Nonanedioic acid) และสารประเภทแอลกอฮอล์ ได้แก่ ไตรเมทิลีนไกลคอล (Trimethylene glycol) และ 3-เมทิล-2-เฮกซะนอล (3-Methyl-2-hexanol) ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น

## 4.2 การลดมลพิษด้วยการดูดซับด้วยไคโตซาน

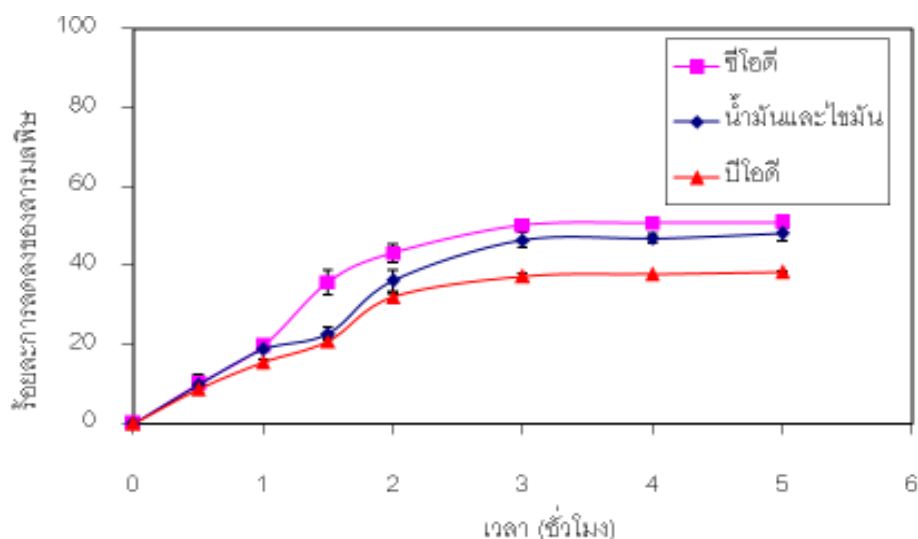
### 4.2.1 ผลของตัวแปรในการดูดซับ

#### - ผลของเวลาในการดูดซับ

ภาพที่ 4.2 แสดงผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานในช่วง 0 – 5 ชั่วโมง เมื่อใช้น้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที พบว่าเวลาที่มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษด้วยไคโตซาน การลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก กล่าวคือค่าน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี ลดลงร้อยละ 46 37 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการสร้างพันธะระหว่างสารมลพิษกับพื้นผิวของไคโตซานจะเพิ่มขึ้นการลดลงของสารมลพิษจึงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของสารมลพิษจะช้าลงและมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 3 ชั่วโมง อาจเนื่องมาจากไคโตซานดูดซับสารมลพิษจนอิ่มตัวและคงที่

#### - ผลของความเป็นกรด-เบส

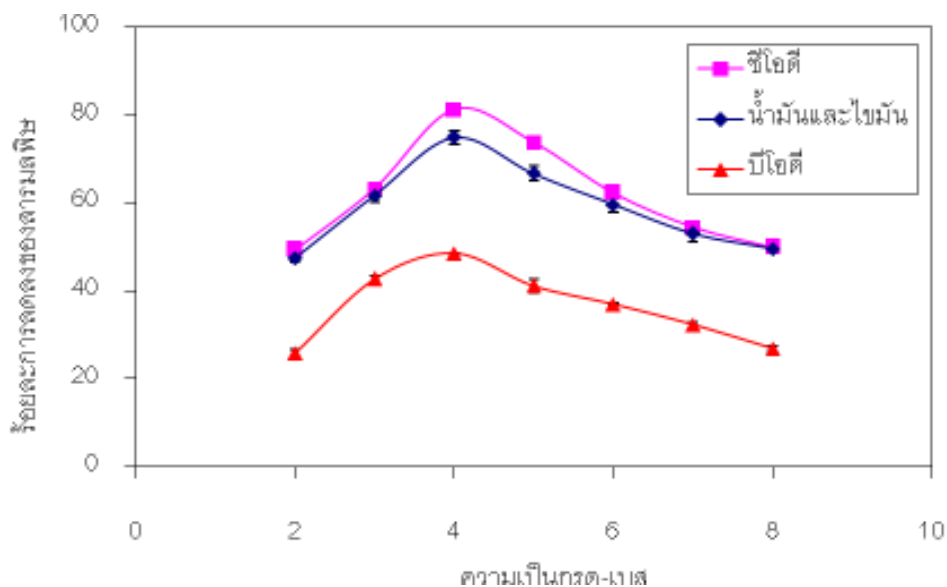
ความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่แตกต่างกันจะมีอิทธิพลต่อประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับและมีผลต่อความเป็นอิมัลชันของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ภาพที่ 4.3 แสดงผลของความเป็นกรด-เบสต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการ



**ภาพที่ 4.2** ผลของเวลาต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่เวลา 0–5 ชั่วโมง ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 ปริมาณโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตรและอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

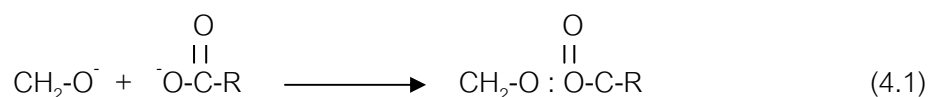
ผลิตไบโอดีเซลในช่วงความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2-8 เวลา 3 ชั่วโมง อัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที ปริมาณโคโคซานที่ 3.5 กรัมต่อลิตรของสารละลาย พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียจะส่งผลต่อร้อยละการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีไอดี และซีไอดีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบสจาก 2 ไป 4 โดยการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 47 ไปเป็นร้อยละ 75 ส่วนค่าบีไอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26 ไปเป็นร้อยละ 48 และค่าซีไอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49 ไปเป็นร้อยละ 81 แม้ในภาวะที่เป็นกรดโปรตอน ( $H^+$ ) ที่แตกตัวจากกรดจะเข้าไปจับกับหมู่เอมีน ( $-NH_2$ ) เป็น  $-NH_3^+$  (Momenzadeh และคณะ, 2011) ซึ่งสามารถสร้างพันธะกับประจุลบของสารในน้ำเสียได้ แต่ในภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสต่ำ (ภาวะกรดสูง) โคโคซานจะเกิดการบวมตัว (Wan Ngah และคณะ, 2008) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลง เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสจาก 4 ไป 8 พบว่าการลดลงของน้ำมันและไขมันจะลดลงจากร้อยละ 75 ไปเป็นร้อยละ 50 ส่วนค่าบีไอดีจะลดลงจากร้อยละ 48 ไปเป็นร้อยละ 27 และค่าซีไอดีจะลดลงจากร้อยละ 81 ไปเป็นร้อยละ 50 เนื่องจากในภาวะเบสจะเกิดการหลุดออกของโปรตอน (De-protonation) จากหมู่ไฮดรอกซิลของโคโคซานแตกตัวเป็นไอออนลบไปเป็นไฮดรอกซีไอออน ( $O^-$ ) ซึ่งสามารถ





ภาพที่ 4.3 ผลของความเป็นกรด-เบสต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ความเป็นกรด-เบส 2-8 เวลา 3 ชั่วโมง อัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที และปริมาณโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตร

สร้างพันธะกับประจุลบของสารในน้ำเสียได้ โดยใช้อิเล็คตรอนคู่โดดเดี่ยวร่วมกัน ดังสมการ (4.1)

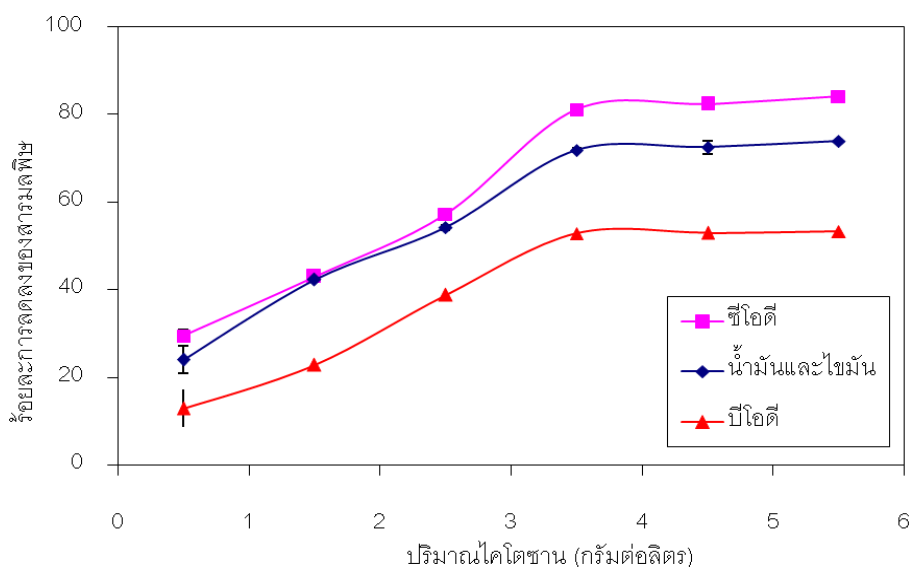


R คือ หมู่อัลคิล

ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kyzas และคณะ (2009) จึงกล่าวได้ว่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ซึ่งสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน บีไอดี และซีไอดีได้ร้อยละ 75 48 และ 81 ตามลำดับ

#### - ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ภาพที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณโคโคซานต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วง 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3

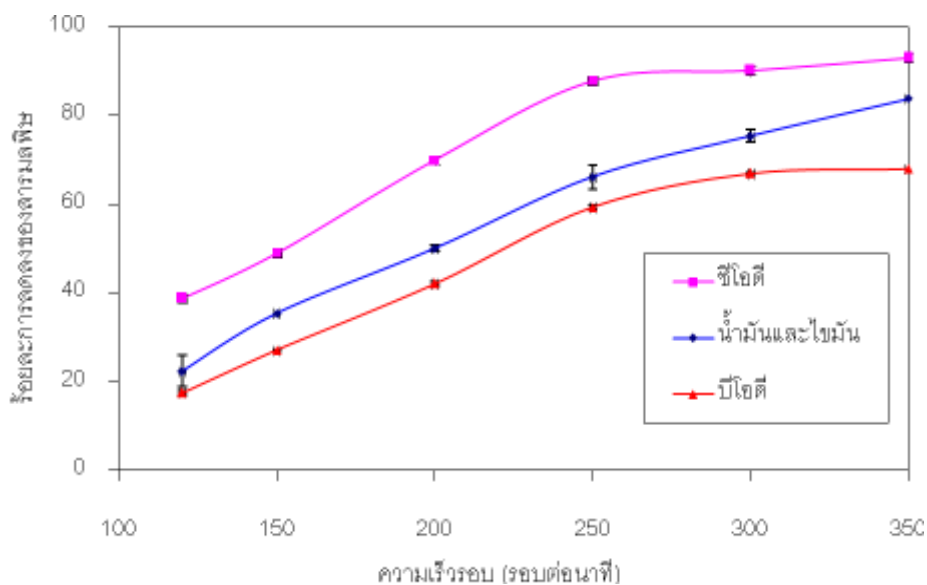


**ภาพที่ 4.4** ผลของปริมาณโคโคซานต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ปริมาณโคโคซาน 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

ชั่วโมง อัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้โคโคซาน 0.5-3.5 กรัมต่อลิตร โดยการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 24 ไปเป็นร้อยละ 72 ส่วนค่าปีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13 ไปเป็นร้อยละ 53 และค่าชีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29 ไปเป็นร้อยละ 81 เมื่อเพิ่มปริมาณโคโคซานจาก 0.5 กรัมต่อลิตรเป็น 3.5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวดูดซับในระบบเพิ่มมากขึ้นพื้นที่ผิวในการดูดซับก็จะมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะสูงขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณโคโคซานมากกว่า 3.5 กรัมต่อลิตร พบว่าร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน ปีโอดี และชีโอดีมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากระบบอาจถูกควบคุมด้วยการถ่ายโอนมวลของสารมลพิษมาที่พื้นผิวโคโคซาน (Ahmad และคณะ, 2003) จึงสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยโคโคซานคือ 3.5 กรัมต่อลิตร

#### - ผลของอัตราเร็วในการเขย่า

ภาพที่ 4.5 แสดงผลของอัตราเร็วในการเขย่าต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในช่วง 120-350 รอบต่อนาที ที่ความเป็นกรด-



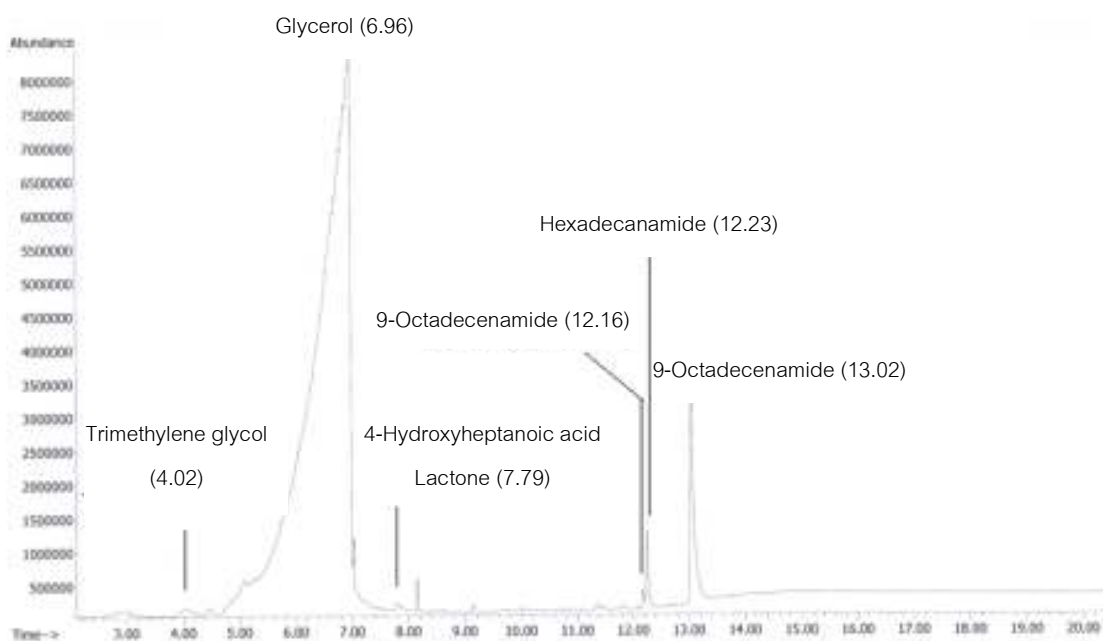
**ภาพที่ 4.5** ผลของอัตราเร็วในการเขย่าต่อการลดลงของสารมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่อัตราเร็วในการเขย่า 120-350 รอบต่อนาที ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และปริมาณโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตร

เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณตัวดูดซับ 3.5 กรัมต่อลิตร พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการเขย่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเขย่าจาก 120 รอบต่อนาทีไป 250 รอบต่อนาที การลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22 ไปเป็นร้อยละ 66 ส่วนค่าบีไอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17 ไปเป็นร้อยละ 59 และค่าซีไอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 39 ไปเป็นร้อยละ 88 เนื่องจากการเพิ่มอัตราเร็วในการเขย่าจะทำให้ความหนาของชั้นการแพร่ (Diffusion layer) ที่โอบล้อมอนุภาคของตัวดูดซับลดลง ทำให้โมเลกุลของสารมลพิษในน้ำเสียสามารถแทรกเข้าไปในตัวดูดซับได้ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmad และคณะ (2005b) แต่เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเขย่ามากกว่า 250 รอบต่อนาที พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษมีแนวโน้มคงที่เนื่องจากโคโคซานอาจเกิดการอิ่มตัว ปริมาณน้ำมันและไขมันมีร้อยละการลดลงของสารมลพิษที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซีไอดี และบีไอดีนั้น พบว่าร้อยละการลดลงของสารมลพิษมีแนวโน้มคงที่ โดยที่อัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที สามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน บีไอดี และซีไอดีได้สูงสุดถึงร้อยละ 84 68 และ 93 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.2** สรุปสมบัติของน้ำทิ้งโดยการบำบัดด้วยโคโตซานที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

| พารามิเตอร์                             | มาตรฐานน้ำทิ้ง<br>(กระทรวงวิทยาศาสตร์<br>เทคโนโลยีและ<br>สิ่งแวดล้อม, 2539) | สมบัติของน้ำเสีย |                           |                                   |
|---|---|------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|   |   | ก่อนบำบัด        | หลังการบำบัด<br>เบื้องต้น | หลังการ<br>บำบัดด้วย<br>การดูดซับ |
| ค่าความเป็นกรด-เบส                      | 5.5 – 9.0   | 9.6-10.26        | 2.00-2.40                 | 4.32-4.62                         |
| ปริมาณน้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร) | < 15  | 1,045-1,125      | 690-875                   | 105                               |
| บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)               | < 60  | 1,502-2,060      | 1,320-1,792               | 395                               |
| ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)               | < 400   | 29,990-41,200    | 21,427-23,454             | 1,216                             |
| ของแข็งละลายได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)      | < 3,000   | 5,340-5,400      | 4,530-4,560               | 830                               |
| ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)       | < 150   | 670-690          | 220-230                   | 50                                |

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยโคโตซานคือความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีได้ร้อยละ 84 68 และ 93 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 105 395 และ 1,216 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐานประมาณ 7 6 และ 3 เท่าตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4.32-4.62 ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อยดังตารางที่ 4.2

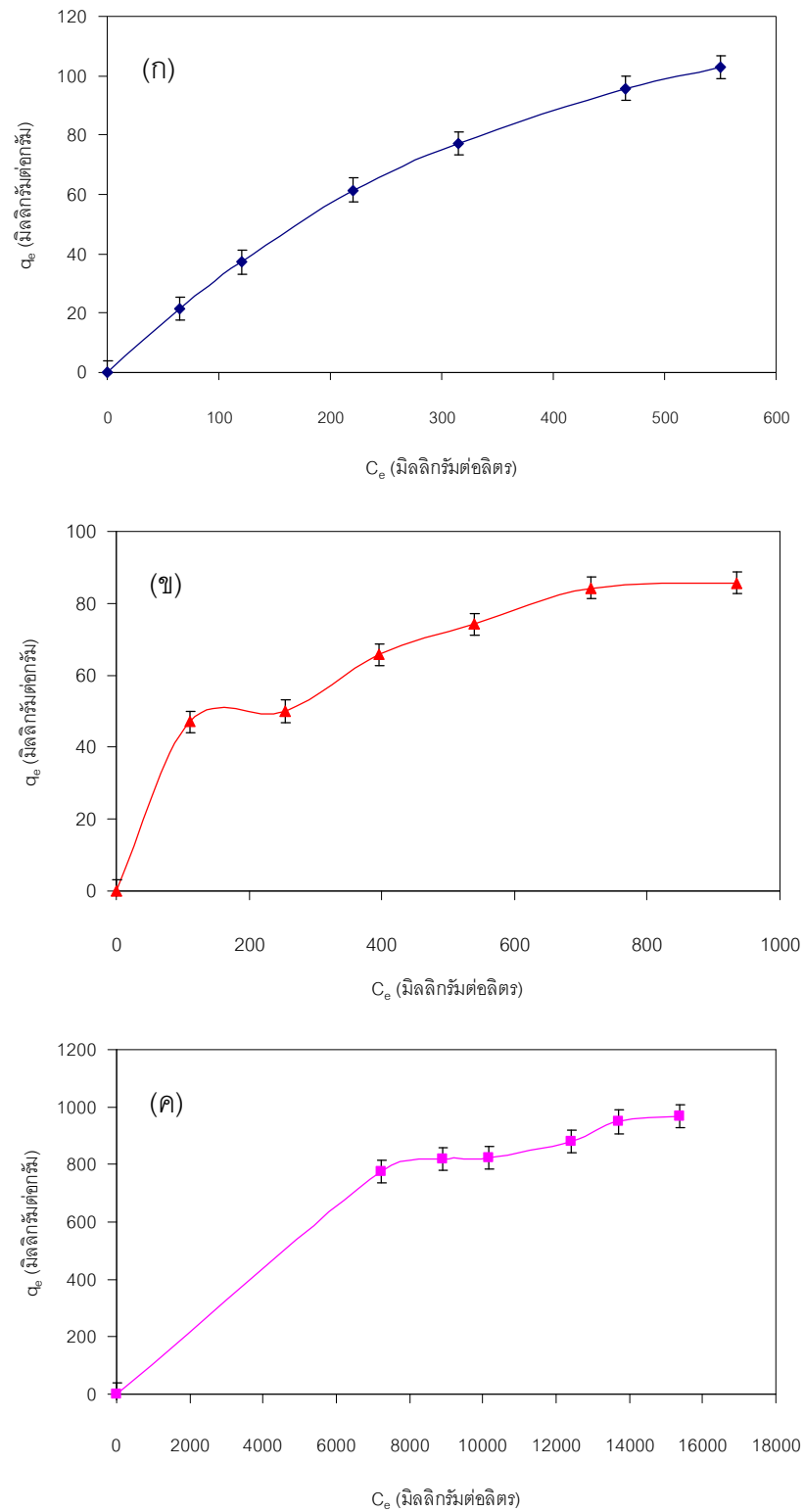


**ภาพที่ 4.6** โครมาโตแกรมของแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

เมื่อศึกษาองค์ประกอบในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซานที่ภาวะที่เหมาะสม (ภาพที่ 4.6) พบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้วยังคงมีสารปนเปื้อนหลักคือกลีเซอรอล และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกิดขึ้นหลายชนิด ได้แก่ 4-ไฮดรอกซีเฮปทานอิกกรดแลคโตน (4-Hydroxyheptanoic acid lactone) ไตรเมทิลีนไกลคอล (Trimethylene glycol) และประกอบด้วย 9-ออกตะเดซีนามีด์ (9-Octadecenamide) และเฮกซะเดซีนามีด์ (Hexadecenamide) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ แสดงว่าอาจจะมีการหลุดหรือสลายตัวของไคโตซานภายหลังการทำงาน

#### 4.2.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับด้วยไคโตซานจะดำเนินการที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษที่ภาวะสมดุลและ



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาทีและปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) บีโอดี และ (ค) ซีโอดี

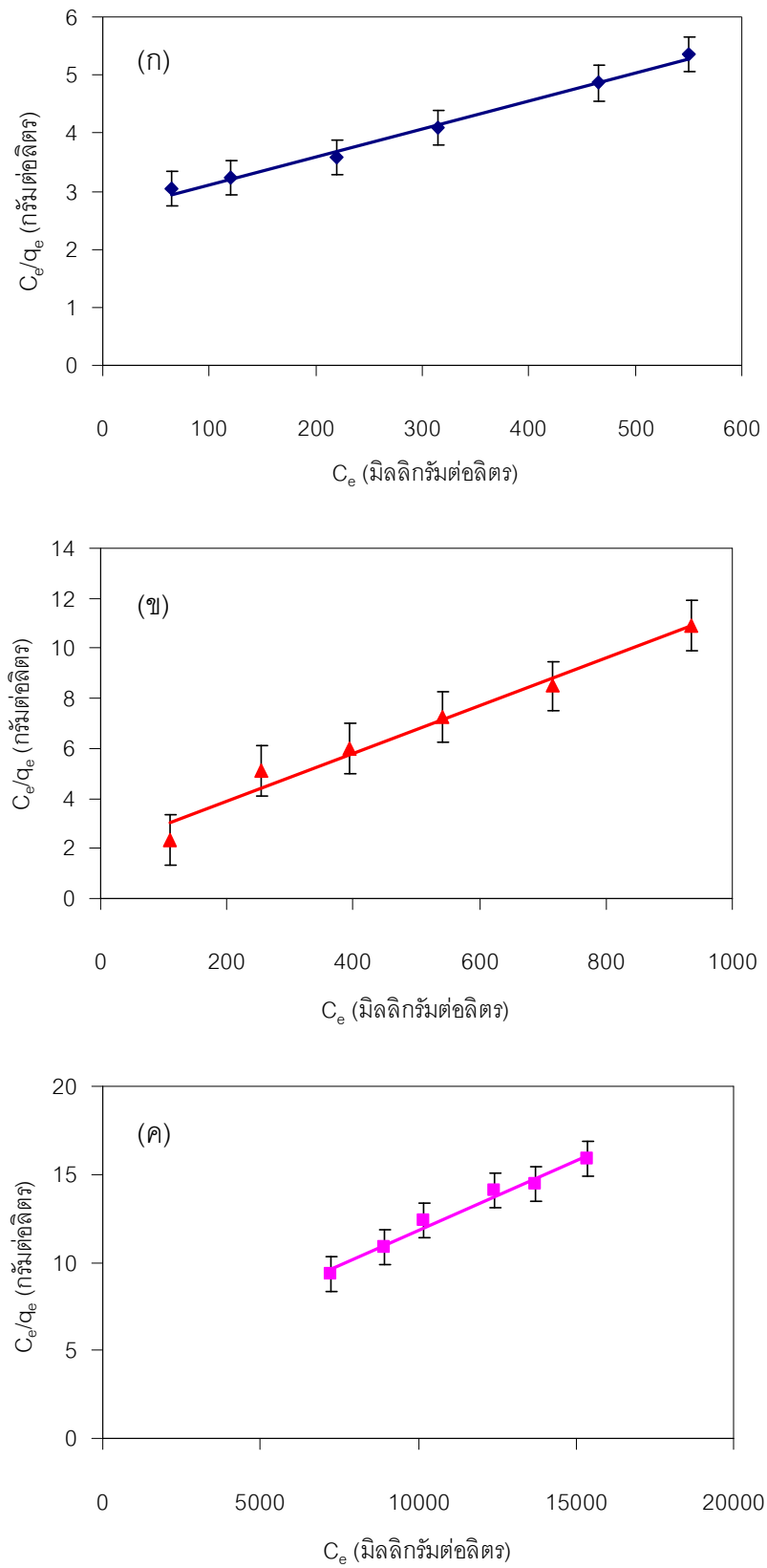
ปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ พบว่าปริมาณสารมลพิษที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษที่ภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับสารมลพิษของไคโตซานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีแนวโน้มคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลมีค่าน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 550 715 และ 13,714 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ก. จากสมการแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e$  และ  $C_e/q_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีค่าความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/K_L X_m$

ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์  $C_e$  และ  $C_e/q_e$  ของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9931 0.9736 และ 0.9828 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าไคโตซานมีปริมาณการดูดซับ ( $X_m$ ) ซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 1,250 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือน้ำมันและไขมัน และบีโอดี โดยมีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 208 และ 104 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่าไคโตซานสามารถดูดซับสารที่สามารถย่อยสลายอินทรีย์ โดยการใช้ออกซิเจนจากสารเคมีได้สูงที่สุด ส่วนค่าคงที่สมดุลในการดูดซับหรือ  $K_L$  พบว่าค่าคงที่ในการดูดซับบีโอดีจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.0048 ลิตรต่อมิลลิกรัม รองลงมาคือน้ำมันและไขมัน และซีโอดีเท่ากับ 0.0018 และ 0.0002 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.3** ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิชของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยไคโตซาน

| พารามิเตอร์       | สมการแลงเมียร์ |                             |                             |        | สมการฟรุนดลิช |                             |        |
|-------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|---------------|-----------------------------|--------|
|                   | $R_L$          | $X_m$<br>(มิลลิกรัมต่อกรัม) | $K_L$<br>(ลิตรต่อมิลลิกรัม) | $R^2$  | $n$           | $K_F$<br>(ลิตรต่อมิลลิกรัม) | $R^2$  |
| ค่าน้ำมันและไขมัน | 0.0978         | 208                         | 0.0018                      | 0.9931 | 1.35          | 1.06                        | 0.9885 |
| ค่าบีโอดี         | 0.1263         | 104                         | 0.0048                      | 0.9736 | 3.14          | 9.85                        | 0.9166 |
| ค่าซีโอดี         | 0.0683         | 1,250                       | 0.0002                      | 0.9828 | 3.32          | 52.83                       | 0.9450 |



ภาพที่ 4.8 ไอโซเทอมแลงเมียร์ของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) ปิไอดี และ (ค) ซีไอดี



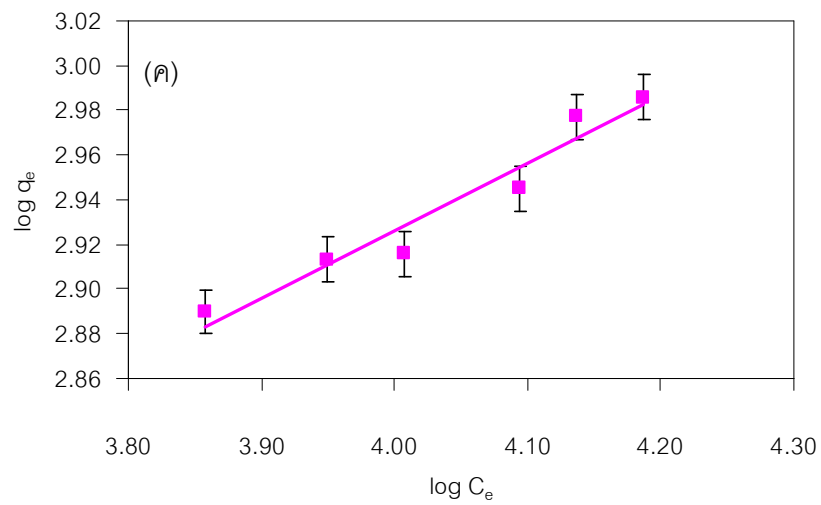
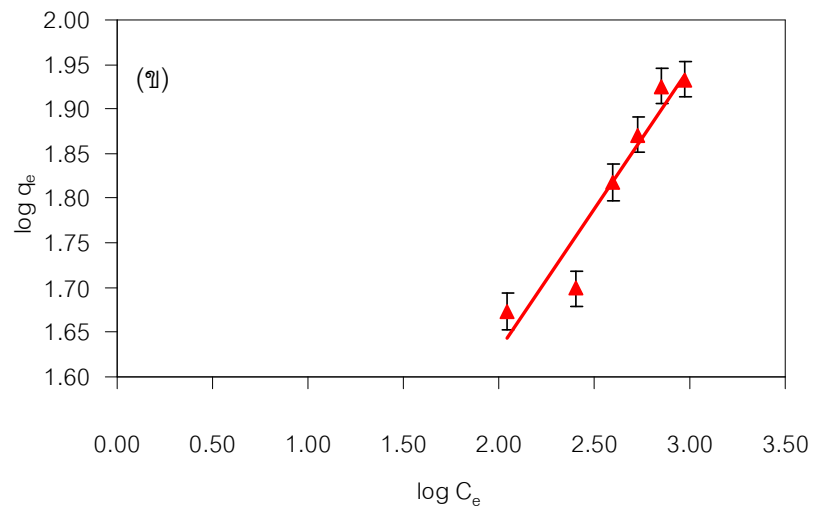
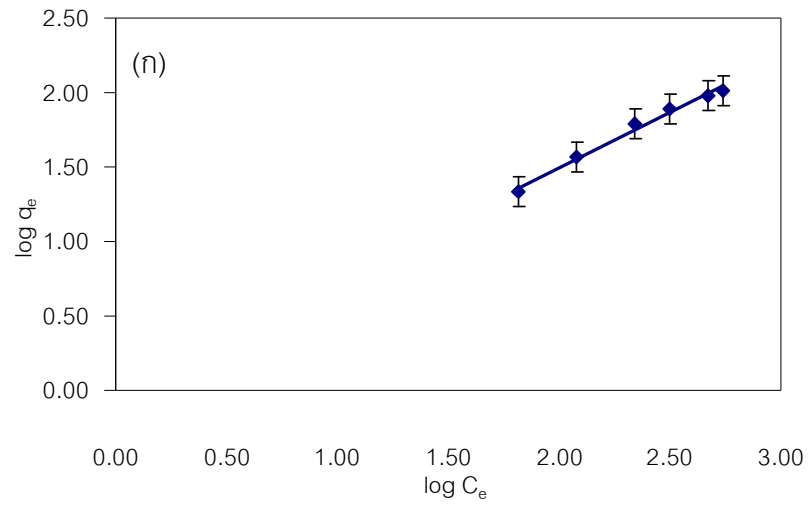
ข. จากสมการพหุนดลิตซ์ (สมการ 2.5) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_F$

ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  ของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9885 0.9166 และ 0.9450 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 ค่า  $n$  ของการดูดซับซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 3.32 ส่วนค่า  $n$  ของบีโอดี และน้ำมันและไขมันเท่ากับ 3.14 และ 1.35 ตามลำดับ โดยค่า  $n$  ที่สูงกว่า 1 จะบ่งชี้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในภาวะการดูดซับ ซึ่งพบว่าการดูดซับซีโอดีจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด รองลงมาคือ บีโอดี และน้ำมันและไขมัน และค่า  $R_L$  แสดงลักษณะของการดูดซับ พบว่าค่า  $R_L$  ที่สูงกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (Unfavorable) ค่า  $R_L = 1$  แสดงถึงการดูดซับที่คงที่เป็นเส้นตรง (Linear) และค่า  $0 < R_L < 1$  แสดงถึงการดูดซับที่ดี (Favorable) (Ahmad และคณะ, 2005) ซึ่งพบว่าน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีมีค่า  $R_L$  อยู่ระหว่าง 0 กับ 1 แสดงว่าลักษณะของการดูดซับสารมลพิษด้วยไคโตซานดีทุกค่า ส่วนค่าคงที่สมดุลในการดูดซับหรือ  $K_F$  พบว่าค่าคงที่ในการดูดซับซีโอดีจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 52.83 ลิตรต่อมิลลิกรัม บีโอดี และน้ำมันและไขมันเท่ากับ 9.85 และ 1.06 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงว่าไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับซีโอดีสูงที่สุด

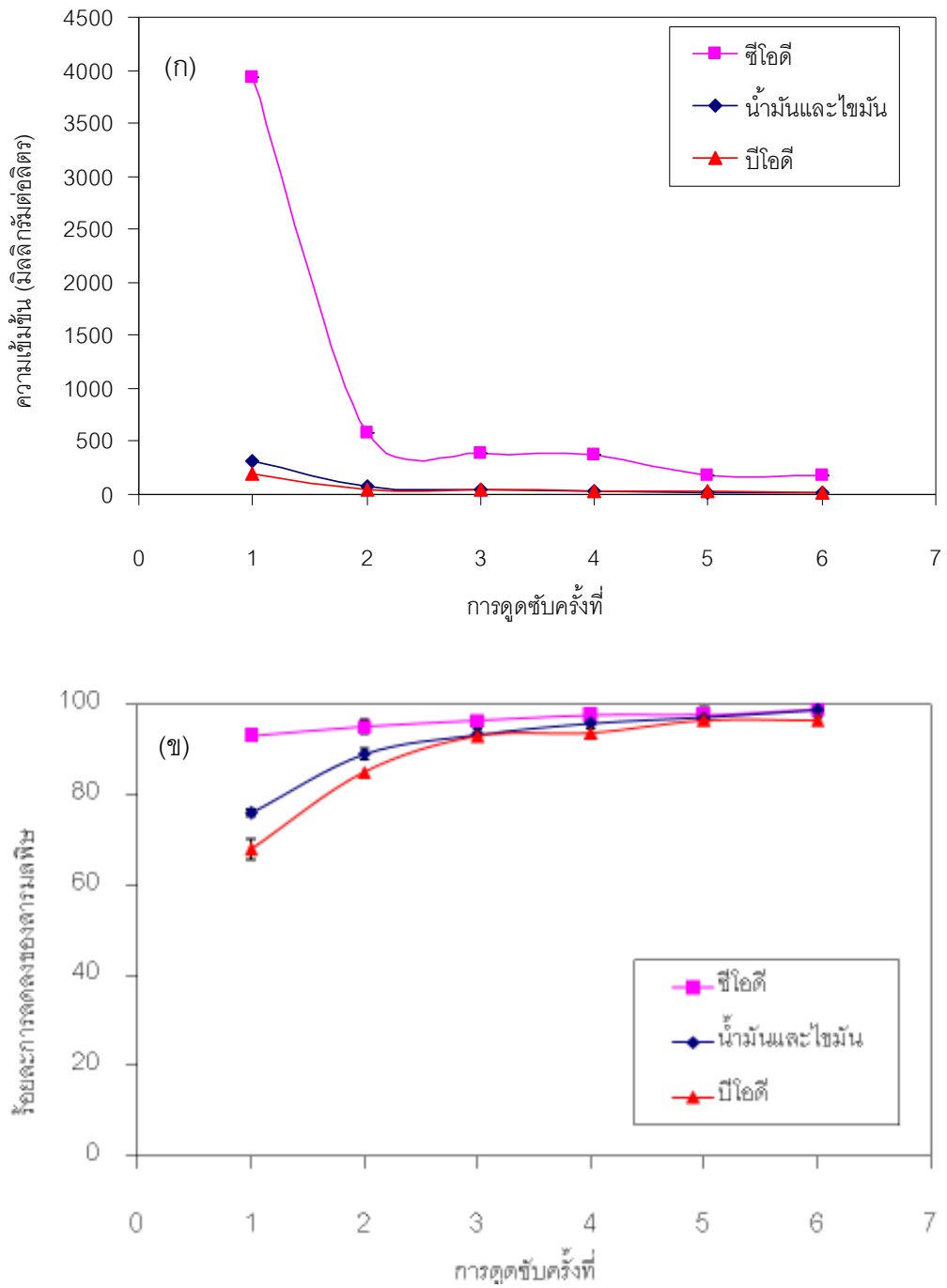
เมื่อพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 2 แบบแล้ว พบว่าการดูดซับจะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบพหุนดลิตซ์ แสดงว่าการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และพลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆพื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

#### 4.3 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับซ้ำ

เนื่องจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังคงมีสมบัติที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 4.2 จึงยังไม่สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาบำบัดซ้ำ ภาพที่ 4.10 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี และร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีของการดูดซับซ้ำในแต่ละครั้งที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณไคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อจำนวนรอบของการดูดซับเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารมลพิษจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบของการดูดซับเป็นการเพิ่มปริมาณหรือพื้นที่ในการดูดซับส่งผลให้น้ำเสียที่ผ่านการดูดซับซ้ำมีปริมาณสารมลพิษลดน้อยลง



ภาพที่ 4.9 ไอโซเทอมฟรอนดิลของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) ปิไอดี และ (ค) ซีไอดี



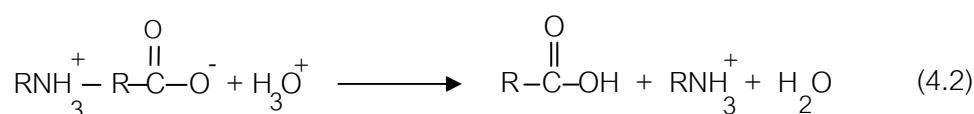
ภาพที่ 4.10 (ก) การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมัน ปีโอดี และชีโอดี และ (ข) ร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน ปีโอดี และชีโอดีที่รอบของการดูดซับต่างๆ ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

โดยน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 3 จะมีสมบัติบางค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมคือความเข้มข้นของบีโอดีมีค่าลดลงเหลือ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นการลดลงของบีโอดีร้อยละ 93 และความเข้มข้นของซีโอดีลดลงเหลือ 384 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นการลดลงของซีโอดีร้อยละ 97 ตามลำดับ แต่ปริมาณน้ำมันและไขมันนั้นยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อน้ำเสียผ่านการดูดซับซ้ำจนถึงครั้งที่ 5 พบว่าปริมาณน้ำมันและไขมันจะลดลงผ่านเกณฑ์มาตรฐานคือลดลงเหลือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณบีโอดีและซีโอดีมีค่าเท่ากับ 25 และ 183 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับร้อยละ 97.1 96.5 และ 97.7 ตามลำดับ ซึ่งน้ำเสียมีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมทุกค่าซึ่งน้ำเสียดังกล่าวจะสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

#### 4.4 การศึกษาการฟื้นฟูสภาพโคโตซาน

การฟื้นฟูสภาพโคโตซานที่ผ่านการใช้งานแล้วจะดำเนินการด้วยวิธีทางเคมี โดยนำโคโตซานที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่ในสารเคมีได้แก่ กรดไนตริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.05-0.2 โมลต่อลิตร กรองแยกและอบตามภาวะที่ระบุในหัวข้อ 3.5.5 จากนั้นนำโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 เวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณโคโตซาน 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที

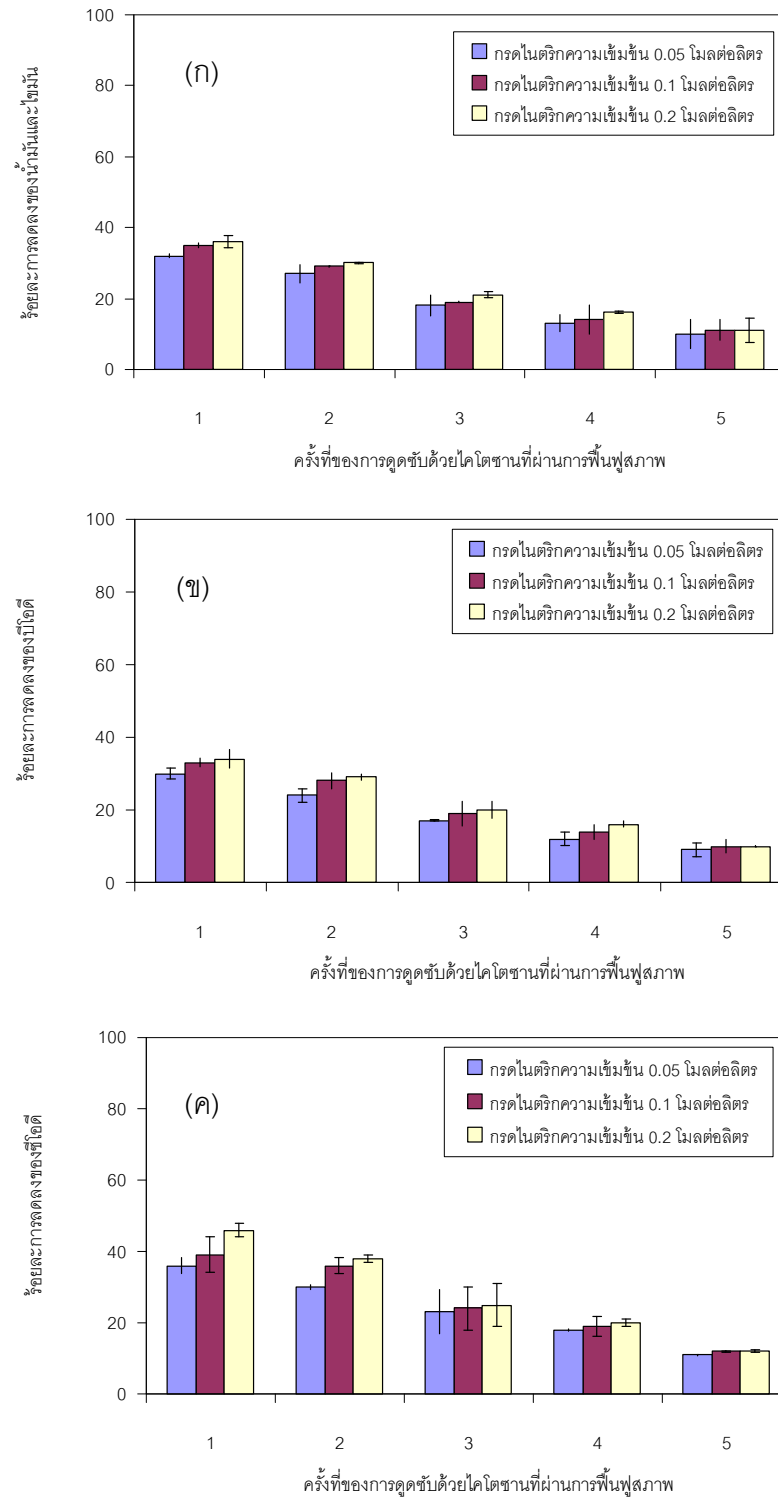
ภาพที่ 4.11 แสดงร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี ในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกเพิ่มขึ้นโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้นโดยพิจารณาจากการลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้น กล่าวคือการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 32 ไปเป็นร้อยละ 35 การลดลงของค่าบีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 ไปเป็นร้อยละ 33 และการลดลงของซีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 36 ไปเป็นร้อยละ 39 ตามลำดับเมื่อโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 เนื่องจากโปรตอนของกรดไนตริกจะเข้าไปจับกับประจุลบของสารมลพิษส่งผลให้สารมลพิษหลุดออกมาจากอนุภาคโคโตซาน ดังสมการ (4.2) (Kyzas และคณะ, 2009)



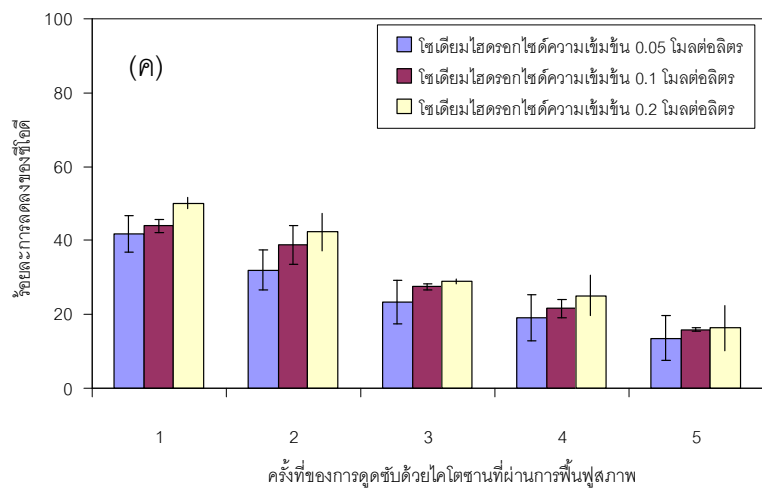
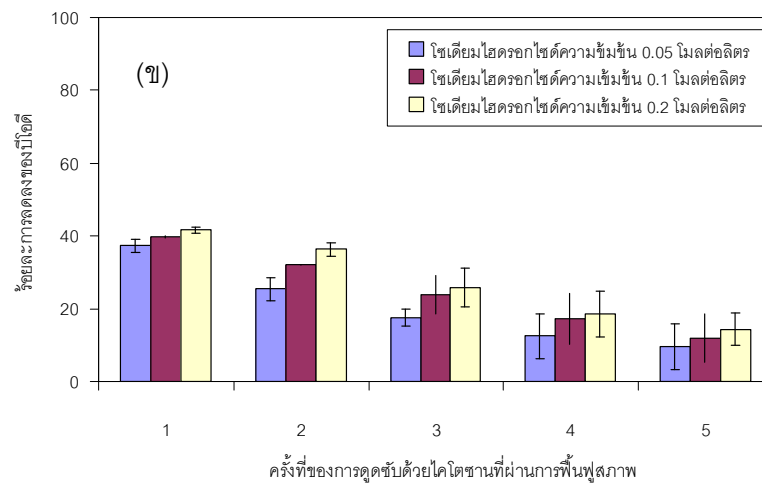
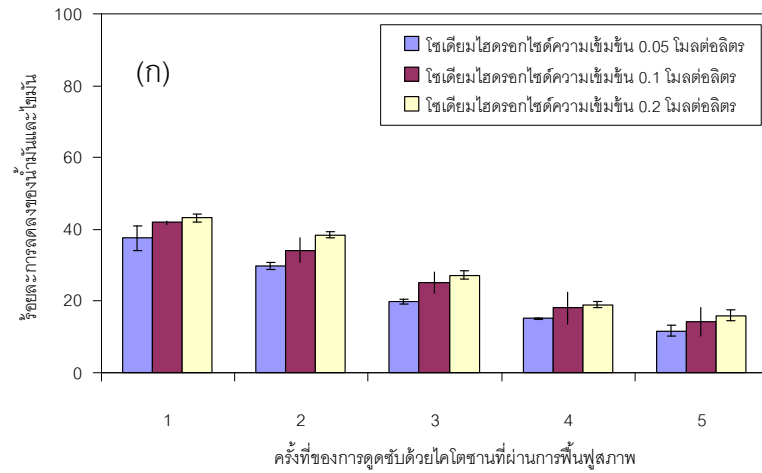
R คือ หมู่อัลคิล

เมื่อจำนวนครั้งในการฟื้นฟูสภาพโคโตซานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของโคโตซานในการดูดซับจะลดลง เพราะในภาวะกรดโคโตซานจะเกิดการบวมตัวมากและอาจเกิดการละลาย (Wan Ngah และคณะ, 2008) และเป็นการดูดซับทางเคมี จึงทำให้การฟื้นฟูสภาพ โคโตซานด้วยกรดไนตริกทำได้ยากจึงไม่สามารถกำจัดสารมลพิษบนพื้นผิวของโคโตซานได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษลดลง ดังจะเห็นได้จากการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 จะสามารถลดน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีได้เพียงร้อยละ 11 10 และ 12 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 0.2 โมลต่อลิตร พบว่าโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 จะสามารถลดน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีได้เพียงร้อยละ 11 10 และ 13 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีปริมาณลดลงเนื่องจากโคโตซานเกิดการละลายในกรด และโคโตซานที่ได้จะมีสีที่เข้มขึ้นจากสีขาวเหลืองเป็นสีน้ำตาลเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพตามจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพโคโตซานที่ผ่านการดูดซับแล้วคือที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ภาพที่ 4.12 แสดงร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี ในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้น โดยพิจารณาจากการลดลงของสารมลพิษที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือการลดลงของน้ำมันและไขมันจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38 ไปเป็นร้อยละ 42 การลดลงของบีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37 ไปเป็นร้อยละ 40 และการลดลงของซีโอดีจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 42 ไปเป็นร้อยละ 44 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.05 เป็น 0.1 โมลต่อลิตร สำหรับการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.1 โมลต่อลิตร ไปที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการลดลงของซีโอดีมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมันและบีโอดีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันจะปรากฏในการฟื้นฟูสภาพโคโตซานครั้งที่ 2 3 4 และ 5 แสดงว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการฟื้นฟูสภาพโคโตซานคือความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

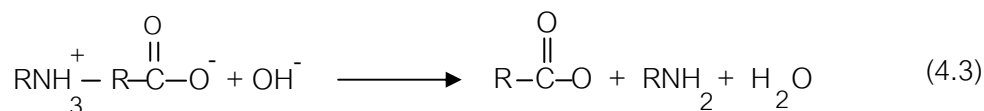


ภาพที่ 4.11 ร้อยละการลดลงของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) ซีไอดี และ (ค) ซีไอดีในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยโคไตซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยกรดในตริกที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 มิลลิลิตร



ภาพที่ 4.12 ร้อยละการลดลงของ (ก) น้ำมันและไขมัน (ข) โปรตีน และ (ค) เถ้าในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร

สำหรับกลไกการฟื้นฟูสภาพของไคโตซานในภาวะเบสจะเกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดออกของโปรตอนจากหมู่  $\text{-NH}_3^+$  ของไคโตซาน ส่งผลให้สารมลพิษหลุดออกจากอนุภาคไคโตซาน ดังสมการ (4.3) (Kyzas และคณะ, 2009)



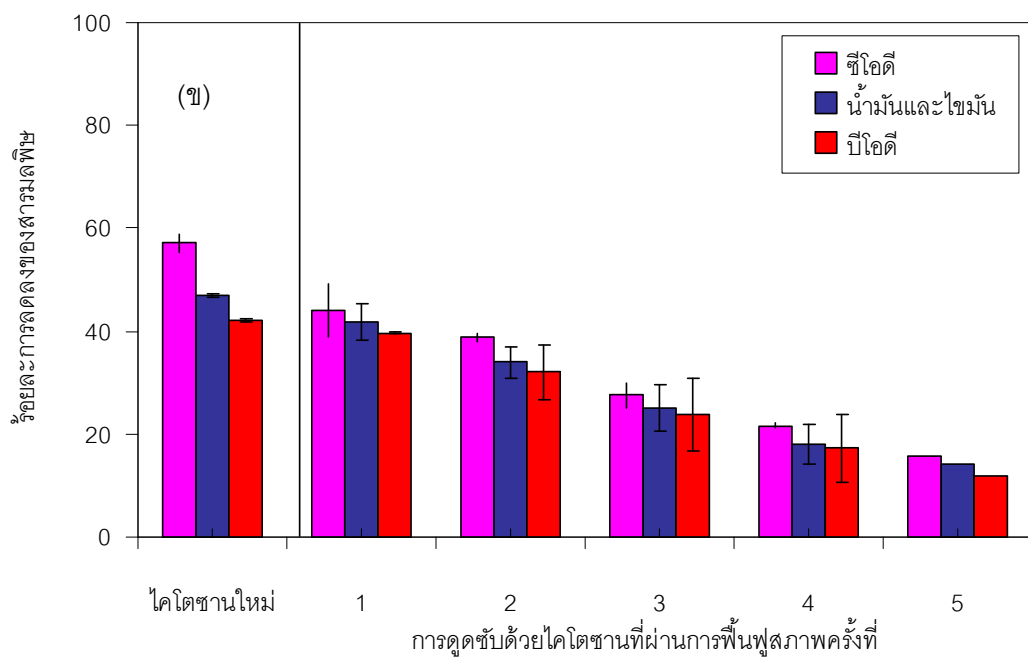
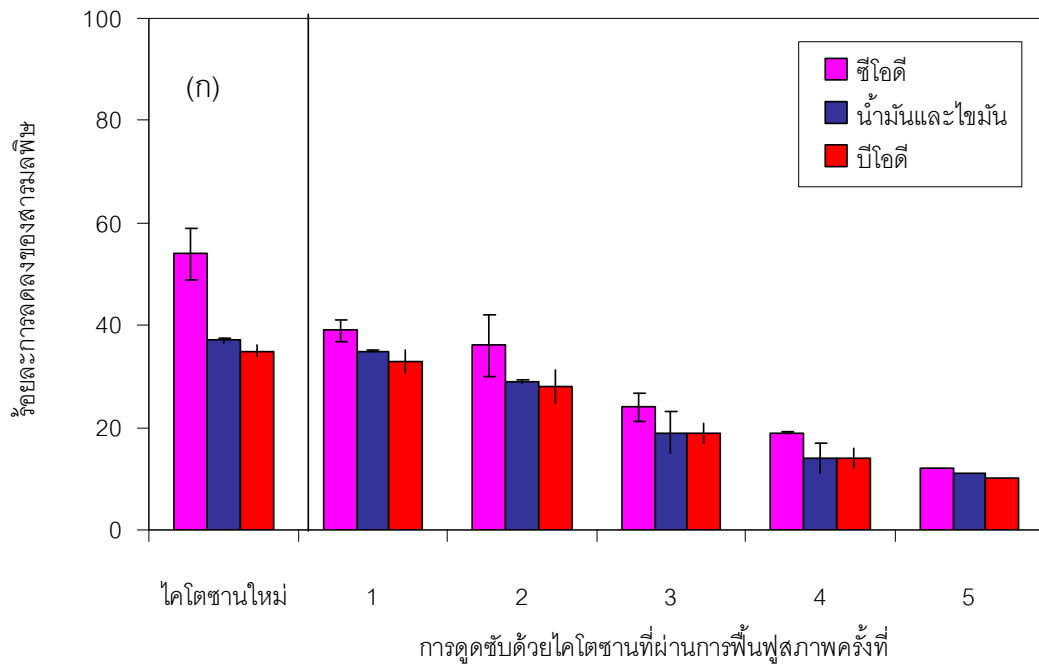
R คือ หมู่อัลคิล

เมื่อพิจารณาผลของจำนวนครั้งในการฟื้นฟูสภาพไคโตซานต่อประสิทธิภาพของไคโตซานในการดูดซับสารมลพิษ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษของไคโตซานจะลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการฟื้นฟูสภาพมากขึ้น เนื่องการดึงสารมลพิษจากอนุภาคไคโตซานด้วยวิธีการที่ศึกษาไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้มีสารมลพิษตกค้างบนพื้นผิวของไคโตซาน พื้นที่ผิวในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษจึงลง นอกจากนี้ยังพบว่าไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมีสีเปลี่ยนแปลงจากเดิมเล็กน้อยจากสีขาวเหลืองเป็นสีเหลืองเข้ม โดยสีของไคโตซานจะเข้มขึ้นเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพตามจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้น

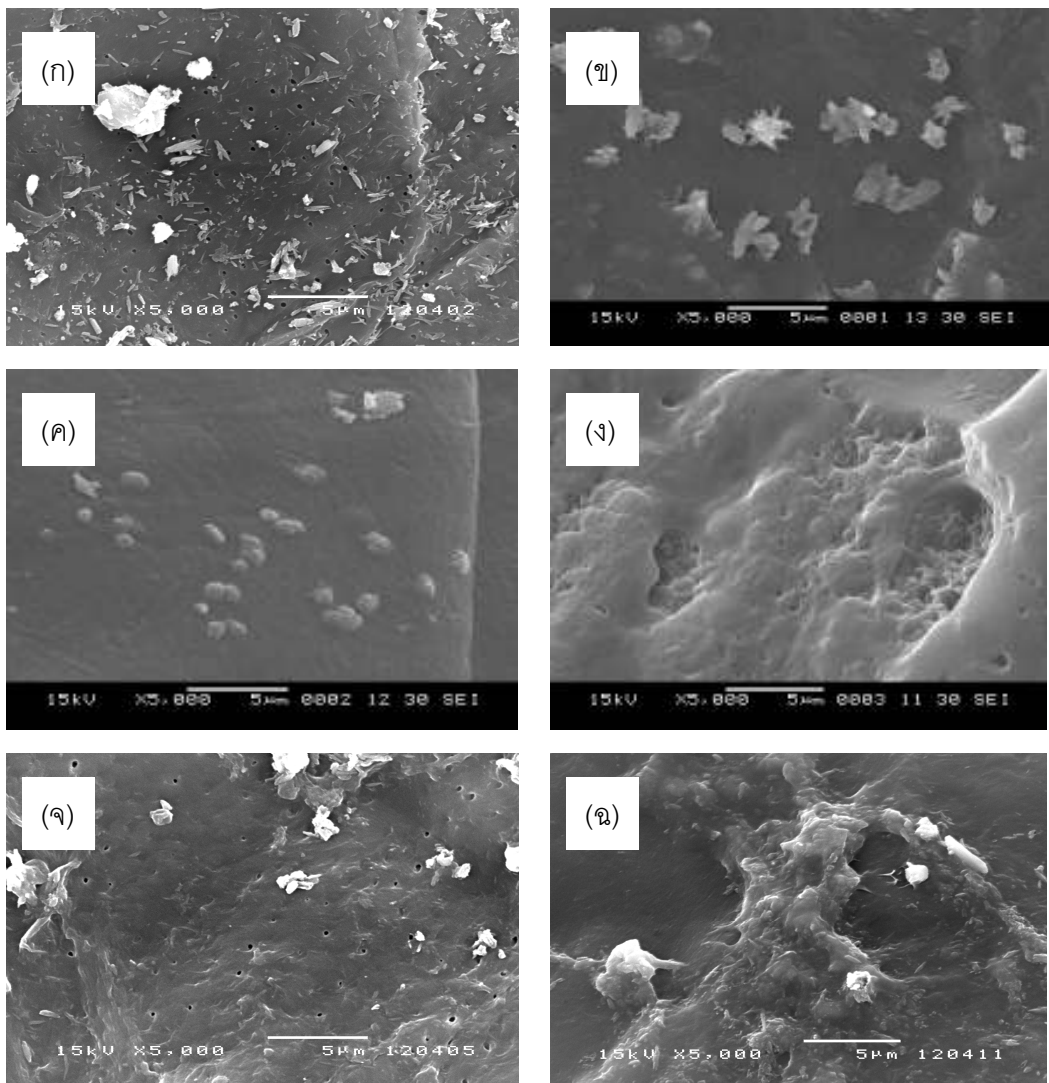
ภาพที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพไคโตซานด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ของน้ำเสียเริ่มต้นจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในแต่ละครั้งภายในล็อตเดียวกัน พบว่าไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 และ 2 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษใกล้เคียงกับไคโตซานใหม่ โดยไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการลดสารมลพิษสูงกว่าไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกเล็กน้อย กล่าวคือสามารถลดน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีในน้ำเสียได้ร้อยละ 42 40 และ 44 ตามลำดับ ในขณะที่การลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีของกรดไนตริกเท่ากับร้อยละ 35 33 และ 39 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการฟื้นฟูสภาพไคโตซานด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริก เนื่องจากไคโตซานจะไม่เกิดการบวมตัวและไม่ละลายเหมือนการฟื้นฟูสภาพไคโตซานด้วยกรดไนตริก (Wan Ngah และคณะ, 2008)

เมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของไคโตซานก่อนและหลังการดูดซับ และเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปโดยใช้





ภาพที่ 4.13 ร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับด้วยโคโคซานที่ผ่านการฟื้นฟูด้วย (ก) กรดไนตริก และ (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

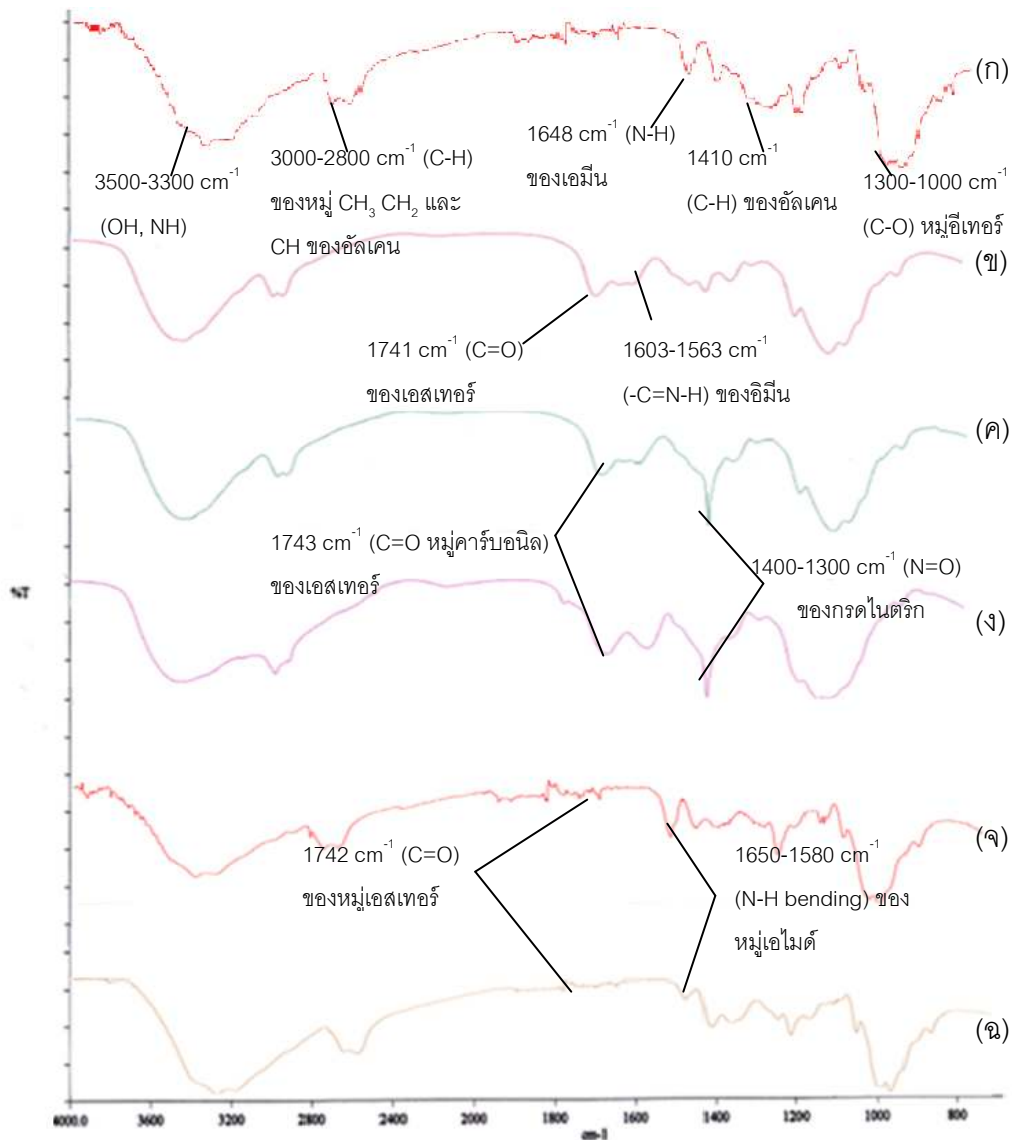


ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM ของ (ก) ไคโตซานเชิงพาณิชย์ (ข) ไคโตซานที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1 (ค) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ง) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ (จ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ฉ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

กำลังขยายที่ 5,000 เท่า พบว่าพื้นผิวของไคโตซานเริ่มต้น (ภาพที่ 4.14 (ก)) จะมีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระมีความพรุน และไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อผ่านการดูดซับพื้นผิวของไคโตซานจะถูกปกคลุมด้วยสารที่ถูกดูดซับอยู่ทั่วพรุน (ภาพที่ 4.14(ข)) เมื่อพิจารณาพื้นผิวของไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรครั้งที่ 3 (ภาพที่ 4.14 (ค)) พบว่า

พื้นผิวของโคโตซานยังถูกปกคลุมด้วยสารที่ถูกดูดซับอยู่ที่วรูปูนและมีความพรุนลดลง และเมื่อโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 (ภาพที่ 4.14 (ง)) พบว่าพื้นผิวถูกปกคลุมไปด้วยสารที่ถูกดูดซับ และไม่มีรูพรุน แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยกระบวนการที่ศึกษาไม่สามารถกำจัดสารมลพิษที่เคลือบอยู่ที่ผิวของโคโตซานได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เมื่อพิจารณาพื้นผิวของโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ครั้งที่ 3 (ภาพที่ 4.14 (จ)) พบว่าพื้นผิวของโคโตซานยังคงถูกปกคลุมด้วยสารที่ถูกดูดซับอยู่ตามรูพรุนแต่ยังปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวเล็กน้อย แต่มีจำนวนมากกว่ารูพรุนของโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกครั้งที่ 3 จึงกล่าวได้ว่าโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้สูงกว่าโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริก และเมื่อโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 (ภาพที่ 4.14 (ฉ)) พบว่าพื้นผิวโคโตซานถูกปกคลุมไปด้วยสารที่ถูกดูดซับ และไม่มีรูพรุน แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถกำจัดสารมลพิษที่เคลือบอยู่ที่ผิวของโคโตซานได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเช่นเดียวกับการฟื้นฟูสภาพโคโตซานด้วยกรดไนตริกสมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเช่นเดียวกับการฟื้นฟูสภาพโคโตซานด้วยกรดไนตริก

ภาพที่ 4.15 แสดงหมู่ฟังก์ชันโคโตซานที่ภาวะต่างๆ โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าโคโตซานเชิงพาณิชย์ (ภาพที่ 4.15(ก)) ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันหลักคือพีค OH และ NH Stretching ที่เลขคลื่นในช่วง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  พีค C-H Stretching ของหมู่  $\text{CH}_3$   $\text{CH}_2$  และ CH ของอัลเคนที่เลขคลื่นในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  พีค N-H (Amine group) ของหมู่เอมีนที่เลขคลื่นในช่วง  $1648\text{ cm}^{-1}$  พีค C-H bending ของอัลเคนที่เลขคลื่น  $1410\text{ cm}^{-1}$  และพีค C-O Stretching ของหมู่เอเทอร์ที่เลขคลื่นในช่วง  $1300-1000\text{ cm}^{-1}$  เมื่อผ่านการดูดซับ (ภาพที่ 4.15(ข)) จะพบพีคของหมู่ฟังก์ชันของโคโตซานเชิงพาณิชย์เป็นหลัก และเกิดพีค (-C=N-H) ของอิมิน (Imine) ที่เลขคลื่น  $1603-1563\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างหมู่เอมีนของโคโตซานและหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ และพีค (C=O carbonyl group) ของเอสเทอร์ที่เลขคลื่น  $1741\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดไขมัน แสดงถึงการดูดซับกรดไขมันบนโคโตซาน และจะเกิดการชิฟท์ (Shift) ของพีค C-O Stretching ของหมู่เอเทอร์ที่เลขคลื่นในช่วง  $1300-1000\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา (Reaction) ระหว่างกรดไขมันกับโคโตซาน ส่วนโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกครั้งที่ 3 (ภาพที่ 4.15(ค)) และโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดไนตริกครั้งที่ 5 (ภาพที่ 4.15(ง)) จะพบพีคต่างๆ ที่แสดงเอกลักษณ์ของ



เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)

ภาพที่ 4.15 IR สเปกตรัมของ (ก) ไคโตซานเชิงพาณิชย์ (ข) ไคโตซานที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 1 (ค) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ง) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร (จ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ฉ) ไคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ไคโตซาน และจะแสดงพีค N=O ของกรดไนตริกที่เลขคลื่น  $1400-1300 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตกค้างของกรดไนตริกบนพื้นผิวไคโตซานระหว่างการฟื้นฟูสภาพ และพีคของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของเอสเทอร์ที่เลขคลื่นประมาณ  $1743 \text{ cm}^{-1}$  (ทิพย์วิมล เกิดอิม, 2547) แสดงว่า

การฟื้นฟูสภาพโคโตซานด้วยกรดไนตริกทำได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีการสะสมตัวของกรดไขมันบนพื้นผิวโคโตซาน (Wan Ngah และคณะ, 2008) ส่วนโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ครั้งที่ 3 (ภาพที่ 4.15 (จ)) จะแสดงพีค C=O ของหมู่เอสเทอร์ที่เลขคลื่น  $1742\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่ามีการสะสมตัวของกรดไขมันบนพื้นผิวโคโตซาน อย่างไรก็ตามก็อาจจะพบพีค N-H bending ของหมู่เอไมด์ที่เลขคลื่น  $1650\text{-}1580\text{ cm}^{-1}$  แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดกรดไขมันออกจากพื้นผิวโคโตซานได้บางส่วน และเมื่อโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ครั้งที่ 5 (ภาพที่ 4.15 (ข)) จะพบพีคต่างๆ ที่แสดงเอกลักษณ์ของโคโตซานและพีค C=O ของหมู่เอสเทอร์ที่เลขคลื่น  $1742\text{ cm}^{-1}$  และพีค N-H bending ของหมู่เอไมด์ที่เลขคลื่น  $1650\text{-}1580\text{ cm}^{-1}$  เช่นเดียวกับโคโตซานผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และจะพบว่า (ภาพที่ 4.15 (จ)) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 3 และ (ภาพที่ 4.15 (ข)) โคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 5 มีการเปลี่ยนตำแหน่งของเลขคลื่นเดิมหรือเกิดการชิฟท์ (shift) จากโคโตซานเชิงพาณิชย์ และโคโตซานเมื่อผ่านการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการฟื้นฟูสภาพโคโตซานด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการล้างอนุภาคสารมลพิษไม่หมด แสดงให้เห็นว่าสารทั้งสองชนิดอาจมีการเกิดแรงระหว่างอนุภาค (Interaction) ต่อกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน พบว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและยังสามารถนำไคโตซานที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาฟื้นฟูใหม่ได้ด้วย โดยในส่วนของขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นจะดำเนินการตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Jaruwat และคณะ, 2010) โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดซัลฟิวริกและนำไปเขย่าด้วยอัตราเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเกิดการแยกชั้นโดยส่วนบนเป็นไบโอดีเซลที่สามารถนำไปใช้ใหม่ได้ หลังจากนั้นจะนำส่วนล่างที่เกิดการแยกชั้นไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ปริมาณน้ำมันและไขมัน ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี พบว่าสารมลพิษต่างๆ ในน้ำเสียจะมีค่าลดลงโดยร้อยละการลดลงของปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี มีค่าสูงถึงร้อยละ 47.26 และ 49 ตามลำดับ เมื่อศึกษากระบวนการดูดซับสารมลพิษด้วยไคโตซาน พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่ การลดลงของสารมลพิษจะต่ำในภาวะที่เป็นกรดมากและเบสมาก ปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การลดลงของสารมลพิษเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มคงที่ และอัตราเร็วในการเขย่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การลดลงของสารมลพิษจะเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่เหมาะสมในการลดมลพิษในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการดูดซับด้วยไคโตซาน ได้แก่ เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับไคโตซานที่ใช้ 3.5 กรัมต่อลิตร และอัตราเร็วในการเขย่า 350 รอบต่อนาที ซึ่งภาวะดังกล่าวสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีได้ร้อยละ 84.68 และ 93 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยไคโตซานยังคงมีสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงยังไม่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมาบำบัดซ้ำอีก โดยการบำบัดซ้ำพบว่าหลังจากการดูดซับซ้ำในครั้งที่ 3 น้ำเสียมีปริมาณบีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 45 และ 384 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน น้ำเสียดังกล่าวยังมีปริมาณน้ำมันและไขมันสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แต่เมื่อผ่านการบำบัดซ้ำถึงครั้งที่ 5 นั้น พบว่าน้ำเสียมีสมบัติที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมคือปริมาณน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 15.25 และ 183 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีร้อยละการลดลงของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 97.1, 96.5 และ 97.7 ตามลำดับ ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการดูด

ชั้นขี้ไต้สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ การศึกษาไอโซโทมของการดูดซับสามารถอธิบายโดยใช้ ไอโซโทมของแกลเมียร์ นอกจากนี้เมื่อศึกษาการนำโคโคซานที่ผ่านการดูดซับแล้วมาฟื้นฟูสภาพ ด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการฟื้นฟูสภาพโคโคซานด้วยกรดไนตริกและ โซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นสามารถนำโคโคซานที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้ง โดยการฟื้นฟูสภาพโคโคซานด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร มีร้อยละการลดลง ของน้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 42 40 และ 44 ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการ ฟื้นฟูสภาพโคโคซานได้ดีกว่ากรดไนตริก ทั้งนี้การตั้งสารมลพิษจากอนุภาคโคโคซานจะ ไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพของโคโคซานที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมี ประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากร้อยละการลดลงของสาร มลพิษจะลดลงเมื่อจำนวนครั้งมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการนำน้ำเสียมาบำบัดอย่างต่อเนื่อง เช่น การ นำกลับมาบำบัดซ้ำ การเติมสารส้มเพื่อทำให้ตกตะกอนเร็วขึ้น การเติมคลอรีนเพื่อ ฆ่าเชื้อโรค การกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น เนื่องจากสมบัติของน้ำเสียมี ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สูงมาก
- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในระบบการบำบัดที่ใหญ่ขึ้น เพื่อดูประสิทธิภาพการบำบัดที่ แท้จริงในการนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา. จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซาน  
เรซิน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18, 1 (ม.ค.- เม.ย. 2551) : 68.

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 1. ภาควิชาเคมี คณะ  
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การจัดการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์,  
2543.

ณัฐพงศ์ วรณจิตร และ สุรีย์ บุญญาณพงศ์. ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์. [ออนไลน์]. 2551.  
แหล่งที่มา: <http://www.sri.cmu.ac.th> [1 กรกฎาคม 2554]

ทิพย์วิมล เกิดอิม. การขจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซาน  
รูปแบบต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์. ระบบบำบัดแบบโปรยกรอง. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา:  
<http://www.health.hcu.ac.th> [1 กรกฎาคม 2554]

ธีรวิทย์ ทับทอง. การดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ถูกตรึงเป็นเม็ด.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.

บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา:  
<http://www.karnkaset.com/index.php> [5 ธันวาคม 2554]

บุศรากรณ์ มหาโยธี. การขจัดหมู่อะซิติกในไคตินและสมบัติของไคตินและไคโตแซนในการคีเลต  
เฟอริกไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

ประภัสสร สุรวฒนาวรรณ. ไคติน-ไคโตซาน. สถาบันวิจัยและพัฒนา. [ออนไลน์]. 2540.  
แหล่งที่มา: <http://www.gpo.or.th/rdi/html/chitin.html> [8 ตุลาคม 2554]

ปรารถนา โป่งฟ้า. กระบวนการดูดซับ(Adsorption Process). [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา:  
<http://pradthana.wordpress.com/> [7 พฤศจิกายน 2553]

ปัทมาพร เจริญสาคร. การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์



ปริญญาamahบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธ์ และ สุวดี จันทร์กระจ่าง. ไคติน-ไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2545. แหล่งที่มา:  
<http://www.kmutt.ac.th/organization/Research/Intellect/best32.htm> [20 ตุลาคม  
2553]

พูนทรัพย์ วิชัยพงษ์. ไคติน ไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.kasetloongkim.com/> [2 พฤศจิกายน 2553]

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. กระบวนการผลิตไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. 2545. แหล่งที่มา:  
<http://www.energygreenhealth.com/viewarticledata> [10 มิถุนายน 2554]

วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. 2539. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำ  
ทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3.

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย  
(วว.). สภาวการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา:  
<http://www.tistr.or.th> [14 ตุลาคม 2554]

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.  
ไคติน ไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:  
<http://www.thailabonline.com/chitin-chitosan> [9 มกราคม 2554]

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.  
โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:  
<http://www.chitosan.igetweb.com/> [6 พฤศจิกายน 2553]

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.  
Effects of glycerol physical property and biodegradable of chitosan film.  
[ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: [http://www.vcharkarn.com/upload/0/164\\_1.pdf](http://www.vcharkarn.com/upload/0/164_1.pdf). [31  
ตุลาคม 2553]

สภาผู้แทนราษฎร, คณะกรรมาธิการพลังงาน. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล.  
กรุงเทพมหานคร : 2545.

สวีณา เกตุสุวรรณ. การลดค่าซีไอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอน  
ทางเคมีกับโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

### ภาษาอังกฤษ

- Agriculture and Consumer Protection. 2009. Anaerobic Baffled Reactor. [Online]. Available from: [www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E09.html](http://www.fao.org/docrep/T0541E/T0541E09.html). [2011, October 14]
- Ahmad A.L., Ismail S., Ibrahim N., Bhatia S. 2003. Remove of suspended solids and residual oil from palm oil mill effluent. Chemical Technology and Biotechnology 78: 971-978.
- Ahmad A.L., Sumathi S., Hameed B.H. 2005a. Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study. Chemical Engineering. 108: 179-185.
- Ahmad A.L., Sumathi S., Hameed B.H. 2005b. Adsorption of residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: Equilibrium and kinetic studies. Water Research. 39: 2483-2494.
- Alley E.R. 2000. Water quality control handbook. Mcgraw-Hill. New York.
- Emara Adel A.A., Tawab M.A., El-ghamry M.A., Elsabee M.Z. 2011. Metal uptake by chitosan derivatives and structure studies of the polymer metal complexes. Carbohydrate Polymers. 83(1) 192-202.
- ENSC 4734 Topic V ION EXCHANGE. 2009. Adsorbent Characteristic. [Online]. Available from: [www.soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf](http://www.soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf). [2011, October 30]
- Hena S. 2010. Removal of chromium hexavalent ion from aqueous solutions using biopolymer chitosan coated with poly 3-methyl triophene polymer. Hazardous Materials. 181(1-3) 474-479.
- Jaruwat P., Kongjao S., Hunsom M. 2010. Management of biodiesel wastewater by the combined process of chemical recovery and electrochemical treatment. Energy Conversion and Management. 51: 531-537.
- Kenneth E.N., Vassilios G. 1992. Adsorption technology for air and water pollution

control. Lewis publishers.

- Kim T.Y., Park S.S., Cho S.Y. 2012. Adsorption characteristics of Reactive Black 5 onto chitosan beads cross-linked with epichlorohydrin. Industrial and Engineering Chemistry. 1-43.
- Knorr, D. 1984. Use for chitinous polymers in food. Food Technology. 38: 85-97.
- Kumjadpai S., Ngamlerdpokin K., Chatanon P., Lertsathitphongs P., Hunsom M. 2011. Management of Fatty Acid Methyl Ester (FAME) wastewater by a combined two stage chemical recovery and coagulation process. Canadian Journal of Chemical Engineering. 89: 369-376.
- Kyzas G.Z., Lazaridis N.K. 2009. Reactive and basic dyes removal by sorption onto chitosan derivatives. Colloid and Interface Science. 331: 32-39.
- Momenzadeh H., Tehrani-Bagha A.R., Khosravi A., Gharanjig K., Holmberg K. 2011. Reactive dye removal from wastewater using a chitosan nanodispersion. Desalination. 271: 225-230.
- Nesic A.R., Velickovic S.J., Antonovic D.G. 2012. Characterization of chitosan/montmorillonite membranes as adsorbents for Bezactiv Orange V-3R dye. Hazardous Materials. 209-210: 256-263.
- Onwudili J.A., Williams P.T. 2010. Hydrothermal reforming of bio-diesel plant waste: Products distribution and characterization. Fuel. 89: 501-509.
- Orathai C., Maneerat O. 2009. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. Environmental Sciences. 21(11) 1491-1496.
- Wan Ngah W.S., Hanafiah M.A.K.M., Yong S.S. 2008. Adsorption of humic acid from aqueous solutions on crosslinked chitosan-epichlorohydrin beads: Kinetics and isotherm studies. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 65(1) 18-24.
- Zhang Y., Dube M.A., McLean D.D., Kates M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. Bioresource Technology. 89: 1-16.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ความหมายของค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

#### ค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

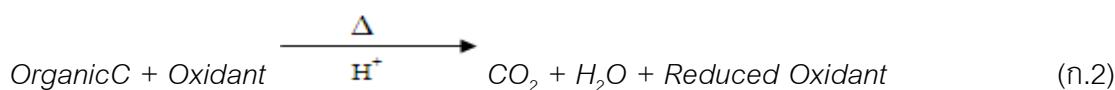
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสิ่งเจือปนในน้ำเสียมีหลายชนิด ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและสะดวกในการวิเคราะห์หสิ่งเจือปนดังกล่าว จึงได้มีการกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ค่าที่สำคัญและมักจะกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งที่ควรทราบ

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

$$pH = -\log[H^+] \quad (ก.1)$$

2. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) หมายถึงปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ภายใต้ภาวะที่มีออกซิเจน โดยผลพลอยได้จากการออกซิเดชันนี้ทำให้แบคทีเรียได้รับพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือ แอมโมเนีย ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ซึ่งค่าบีโอดีหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ที่ถูกใช้ไปโดยจุลชีพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ณ ปัจจุบัน เรียกว่า  $DO_0$  และในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเวลา 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกว่า  $DO_5$

3. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) หมายถึงปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำทางเคมีให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมดสามารถที่จะถูกออกซิไดส์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้ภาวะเป็นกรด ดังสมการ



ค่าซีไอดีจัดเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงให้ทราบว่าน้ำนั้นมีความสกปรกที่เกิดจากสารอินทรีย์อยู่ในระดับมากน้อยเพียงใด

4. น้ำมันและไขมันคือสารส่วนใหญ่ที่ได้มาจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการประกอบอาหารและจากอุตสาหกรรม เช่น โรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ บางส่วนได้มาจากน้ำมันและไขมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่ลอยน้ำได้ซึ่งขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนลงสู่น้ำ ทำให้แหล่งรับน้ำเสียเกิดสภาพไม่น่าดูและทำให้น้ำเน่าเสียได้ง่าย

5. ของแข็งทั้งหมด (Total solids) หมายถึงปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างหมดแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง (Desiccator) แล้วชั่งหาน้ำหนัก น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

6. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids) หมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างบนกระดาษกรองใยแก้ว GF/C หลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอนแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในโถทำแห้งแล้ว ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

7. ของแข็งละลายน้ำ (Total dissolved solids) หมายถึงส่วนของตัวอย่างน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดหรืออาจหาได้จากการนำค่าของของแข็งแขวนลอยหักออกจากของแข็งทั้งหมด (TS-TSS = TDS) (กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และพิศมัย ชัยรัตน์อุทัย, 2541)

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย (กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และพิสมัย ชัยรัตน์อุทัย, 2541)

#### 1. pH

วิธีวิเคราะห์คือวิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter SevenEasy pH METTLER TOLEDO

หมายเหตุ: รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

#### 2. การวิเคราะห์บีโอดี

การวิเคราะห์บีโอดีสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีแบบโดยตรง (Direct method) และวิธีการเจือจาง (Dilution method) แต่ในการทดลองจะใช้วิธีการเจือจาง ค่าบีโอดีเกิน 7 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะแปรผันตรงกับจำนวนสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ เมื่อตัวอย่างน้ำมีสารอินทรีย์จำนวนมากจึงต้องเจือจางตัวอย่างเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอที่แบคทีเรียจะใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ วิธีการเจือจางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือไม่ต้องเติมหัวเชื้อและต้องเติมหัวเชื้อสำหรับการทดลองนี้จะเลือกแบบไม่ต้องเติมหัวเชื้อ

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 250-300 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิดสนิท
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่บัสแสงซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส
3. อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระบอกตวง บิวเรต ขวดรูปชมพู่ เป็นต้น
4. เครื่องจ่ายลมและหัวจ่ายลมแบบเดียวกับที่ใช้กับตู้เลี้ยงปลาสวยงาม

#### สารเคมี

1. น้ำกลั่นต้องมีคุณภาพสูง ควรมีทองแดงน้อยกว่า 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ปราศจากคลอรีน คลอรามีน สารอินทรีย์ และมีความเป็นกรด-เบสประมาณ 7.0
2. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเป็นกรด-เบส 7.2 โดยละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 8.5 กรัม ไดโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 21.75 กรัม แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 17.2 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 33.4 กรัม และในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำการละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 22.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

4. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ละลายแคลเซียมคลอไรด์ปราศจากน้ำ (Anhydrous  $\text{CaCl}_2$ ) จำนวน 27.5 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

5. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 0.25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

6. สารละลายแมงกานีสซัลเฟต ละลายแมงกานีสซัลเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 364 กรัม หรือแมงกานีส ซัลเฟตเตตระไฮเดรต ( $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 480 กรัม หรือแมงกานีสซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{MnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 400 กรัมในน้ำกลั่น กรองแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

7. สารละลายแอลคาไล-ไฮโดรอกไซด์-ไฮดรอกไซด์ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) 500 กรัมและโซเดียมไอโอดิไดด์ ( $\text{NaI}$ ) 135 กรัมในน้ำกลั่นเจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตรและทำให้เย็น จากนั้นค่อยๆ เติมสารละลายโซเดียมเอไซด์ ( $\text{NaN}_3$ ) ที่ละลายในน้ำ 40 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดและเจือจางจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

8. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 24.82 กรัมในน้ำต้มที่เย็นแล้ว เติมคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตร หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม เพื่อเก็บไว้ใช้นานๆ ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เมื่อใช้งานให้เจือจางเป็น 0.025 นอร์มัล

9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น

10. น้ำแป้ง

### วิธีวิเคราะห์แบบเจือจางที่ไม่ต้องเติมหัวเชื้อ Seed

1. การเตรียมน้ำเจือจาง โดยนำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารเคมีข้อ 2-5 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร

2. การเลือกปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ ถ้าไม่ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณของตัวอย่างน้ำต้องหาซีโอดีก่อน พร้อมกับพิจารณาลักษณะของตัวอย่างน้ำและแหล่งเก็บตัวอย่างน้ำร่วมด้วยเพื่อประมาณค่าบีโอดี เช่น น้ำตัวอย่างที่มีค่าของแข็งละลายมากควรจะมีค่าบีโอดีระหว่าง 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร การเลือกปริมาณตัวอย่างนิยมเลือกให้มีปริมาณออกซิเจนเหลืออยู่อย่างน้อย 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควรจะมีการใช้ออกซิเจนอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อ



ทราบค่าบีโอดีโดยประมาณควรเลือกปริมาณตัวอย่างที่คาดว่าจะให้ค่าบีโอดีอยู่ในช่วงที่กำหนด แล้วจึงเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้ให้สูง และต่ำกว่าที่อยู่ติดกันตามตารางที่ ข.1 เช่น ปริมาณค่าบีโอดีที่ทราบค่าประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ควรเลือกใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร และเลือกปริมาณตัวอย่างที่ใช้สูงขึ้นไป 5 มิลลิลิตร และต่ำลงที่ 20 มิลลิลิตรตามตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 การเลือกปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วงบีโอดี

| ปริมาณตัวอย่าง (มิลลิลิตร) | ช่วงบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) | อัตราเจือจาง |
|----------------------------|-------------------------------|--------------|
| 0.02                       | 30,000-105,000                | 15,000       |
| 0.05                       | 12,000-42,000                 | 6,000        |
| 0.10                       | 6,000-21,000                  | 3,000        |
| 0.20                       | 3,000-10,500                  | 1,500        |
| 0.50                       | 1,200-4,200                   | 600          |
| 1.0                        | 600-2,100                     | 300          |
| 2.0                        | 300-1,050                     | 150          |
| 5.0                        | 120-420                       | 60           |
| 10.0                       | 60-210                        | 30           |
| 20.0                       | 30-105                        | 15           |
| 50.0                       | 12-42                         | 6            |
| 100                        | 6-21                          | 3            |
| 300                        | 0-7                           | 1            |

**หมายเหตุ** ถ้าปริมาณตัวอย่างที่ใช้น้อยกว่า 1.0 มิลลิลิตร ควรเจือจางตัวอย่างก่อนปิเปตใส่ขวดบีโอดี

3. ปิเปตตัวอย่างตามจำนวนที่เลือกไว้ลงในขวดบีโอดี ขนาด 300 มิลลิลิตร อย่างละ 2 ขวด
4. เติมน้ำสำหรับใช้เจือจางจนเต็มขวดบีโอดี แต่ต้องระมัดระวังพยายามอย่าให้เกิดฟองอากาศ ปิดฝาให้แน่น

5. นำขวดบีโอดีขวดหนึ่งของแต่ละปริมาณที่เลือกมาหาค่าออกซิเจนละลาย เริ่มต้นโดยสมมุติเป็น  $DO_0$  ส่วนอีกขวดนำไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน
6. เมื่อครบ 5 วัน นำขวดบีโอดีที่บ่มไว้มาหาค่าออกซิเจนละลายที่เหลืออยู่ เรียกว่า  $DO_5$

### การวิเคราะห์ค่าดีไอ

1. เก็บตัวอย่างลงในขวดบีโอดี ให้เต็มขวดพร้อมปิดจุก
2. เติมสารละลาย  $MnSO_4$  1.0 มิลลิลิตร และสารละลายแอลคาไล-ไฮโดรไดต์-ไฮไซด์ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปตวัดปริมาตรและจุ่มลงใต้ผิวน้ำตัวอย่าง ปิดจุกอย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เขย่าโดยคว่ำขึ้น-ลง แรงๆ หลายๆ ครั้ง ให้ผสมเข้ากันปล่อยให้เกิดการตกตะกอนและเขย่าใหม่ซ้ำอีกครั้ง
3. เมื่อตกตะกอนได้ส่วนใหญ่มากกว่า 100 มิลลิลิตร เปิดจุกและค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 2.0 มิลลิลิตร ให้ไหลรินตามคอขวดบีโอดี
4. ปิดจุกและทำการเขย่าคว่ำ ขึ้น-ลง จนเห็นไอโอดีนกระจายทั่ว ( $I_2$  มีสีเหลืองแกมน้ำตาล) และตะกอนละลายหมด
5. ปิเปตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 203 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 นอร์มัล เมื่อสารละลายได้สีเหลืองอ่อนให้เติมน้ำแบ่งเป็น อินดิเคเตอร์ 1-2 มิลลิลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินจางหายไป

### การคำนวณค่าดีไอ

$$DO_{(ส่วนในล้านส่วน)} = (\text{ปริมาตรของ } 0.025 \text{ นอร์มัลของโซเดียมไทโอซัลเฟต} \times 0.2/200) \times 1000 \quad (\text{ข.1})$$

- \*ข้อสังเกต** - การนำสารละลายจากข้อที่ 4 มาไทเทรตจำนวน 203 มิลลิลิตร แต่ในการคำนวณคิดปริมาณเพียง 200 เนื่องจากคิดเทียบจากเมื่อใช้น้ำ 300 มิลลิลิตร เติมสารเคมีจากข้อ 1 ลงไป 4 มิลลิลิตร นำตัวอย่างเหลือในขวดเพียง 296 มิลลิลิตร
- น้ำตัวอย่าง 296 มิลลิลิตรเมื่อเทียบกับสารละลาย 300 มิลลิลิตร ดังนั้นต้องการสารละลาย 200 มิลลิลิตร จะต้องใช้สารละลายในขวด =  $(300 \times 200)/296 = 203$  มิลลิลิตร

### การคำนวณค่าบีโอดี

$$\text{BOD (มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตร)} = (\text{DO}_0 - \text{DO}_5) \times \text{อัตราส่วนเจือจาง} \quad (ข.2)$$

เมื่อ  $\text{DO}_0 =$  ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันแรก

$\text{DO}_5 =$  ค่าออกซิเจนละลายที่ไทเทรตได้ในวันที่ 5

- ใส่ฟีนอล์ฟทาลีน 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเติมน้ำยาไซเดียมไฮดรอกไซด์

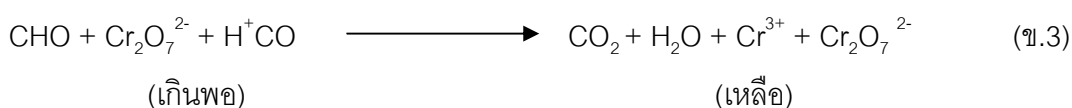
- ไซเดียมไทโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตร จะเกิดเป็นชั้นของด่าง (Alkaline layer) อยู่ที่

ก้นขวดนำไปต่อกับเครื่องกลั่นแล้วผสมให้เข้ากันดี สีของของผสมจะเป็นสีชมพูอ่อนถ้ายังไม่เกิดให้เติมน้ำยาไซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปอีก

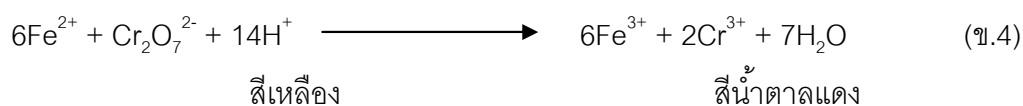
### 3. การวิเคราะห์บีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

การวิเคราะห์บีโอดี มี 2 แบบ คือวิธีรีฟลักซ์แบบปิดและวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด แต่ในการทดลองจะใช้วิธีรีฟลักซ์แบบปิด โดยมีหลักการดังนี้ ภายใต้ภาวะการณรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโปตัสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์แล้วทำการวัดปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เหลือ โดยนำไปไทเทรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate, FAS) และใช้เฟอโรอิน (Ferrouin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ได้ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

เมื่อรีฟลักซ์ด้วย  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$



หาปริมาณ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่เหลือโดยการไทเทรตด้วย FAS ที่มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}$  (FAS) ได้โครมิก ( $\text{Cr}^{3+}$ ) จนหมด แล้ว  $\text{Fe}^{2+}$  จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีนํ้าตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไทเทรต

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (Digestion vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกตขนาด 20×150 หรือ 25×150 มิลลิเมตร มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วยพีทีเอฟอี
2. บล็อกหรือที่ใส่หลอดแก้วแบบต้นทำด้วยอะลูมิเนียม โดยความลึกของช่องใส่หลอด ประมาณ 45-50 มิลลิเมตร
3. ตู้อบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 150±2 องศาเซลเซียส
4. บิวเรต
5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

### สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล
  - นำ  $K_2Cr_2O_7$  อบที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก  $K_2Cr_2O_7$  มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิเมตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต
  - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) 22 กรัม เติมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย
3. สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทแทนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล
  - ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) ชนิด AR.Grade ประมาณ 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้อุ่นแล้วเจือจาง 1,000 มิลลิลิตร
  - สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardization) ก่อนใช้ทุกครั้งด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ทำได้ดังนี้คือ นำ  $K_2Cr_2O_7$  ปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้ เฟอโรอิน จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์
5. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนเพทาเลต

- ชั่ง KHP จำนวน 425 มิลลิกรัม ที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ละลายด้วยในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรสารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

### วิธีวิเคราะห์

1. ล้างหยอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 20 ทุกครั้งก่อนใช้งาน
2. เลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มน้ำเสียเพื่อหาซีไอดีให้เหมาะสม
3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25×150 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร) และถ้าค่าซีไอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16×100 มิลลิเมตร (ปริมาตรน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร)
4. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำ (<40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25×150 มิลลิเมตร แต่ถ้าซีไอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20×150 มิลลิเมตร โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอดีสูงมากต้องเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จากตารางที่ ข.2
5. ใส่ตัวอย่างลงในหลอดแก้วขนาดเหมาะสม แล้วเติมน้ำยาลอยสลายหรือโปตัสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ ข.3 ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลงค์ (Blank) ให้ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง
6. วางหลอดแก้วในบล็อกลูกแล้วใส่ตู้อบ และตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
7. นำออกมาจากตู้อบ และทิ้งให้เย็น
8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลาย
9. ในหลอดแก้วให้หมดแล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรซีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเขียวอมเหลือง สีฟ้า และสีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรต

ตารางที่ ข.2 ปริมาณน้ำตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ซีโอดี\*

| ช่วงซีโอดี   | ขนาดตัวอย่าง (มิลลิลิตร) | อัตราเจือจาง |
|--------------|--------------------------|--------------|
| <200         | 5                        | 1:1          |
| 200-400      | 4                        | 1:1          |
| 400-800      | 2                        | 1:1          |
| 800-1600     | 1                        | 1:1          |
| 1600-3200    | 5                        | 1:10         |
| 2700-5300    | 3                        | 1:10         |
| 4000-8000    | 4                        | 1:20         |
| 8000-16000   | 2                        | 1:20         |
| 13000-26500  | 3                        | 1:50         |
| 20000-40000  | 2                        | 1:50         |
| 40000-80000  | 2                        | 1:100        |
| 80000-160000 | 1                        | 1:100        |

\*เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ  $K_2Cr_2O_7$  ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ตารางที่ ข.3 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาณตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

| ขนาดหลอดแก้ว<br>(มิลลิลิตร) | ปริมาตร<br>ตัวอย่างน้ำ<br>(มิลลิลิตร) | สารละลายไดโครเมต<br>(มิลลิลิตร) | สารละลาย<br>กรดซัลฟิวริก<br>(มิลลิลิตร) | ปริมาตร<br>ทั้งหมด<br>(มิลลิลิตร) |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|
| 16 × 100                    | 2.5                                   | 1.5                             | 3.5                                     | 7.5                               |
| 20 × 150                    | 5.0                                   | 3.0                             | 7.0                                     | 15.0                              |
| 25 × 150                    | 10.0                                  | 6.0                             | 14.0                                    | 30.0                              |

### การคำนวณ

$$\text{ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000 \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อ A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับแบลนด์ (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$N$  = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

$V$  = ปริมาณน้ำเสียตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

#### 4. การวิเคราะห์ไขมัน

การสกัดไขมันด้วยกรวยแยก (Partition-gravimetric method) ไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในรูปสารละลายหรือไม่ละลายในตัวอย่างน้ำจะถูกทำให้เป็นกรดด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้ต่ำกว่า 2 และถูกสกัดออกจากตัวอย่างน้ำโดยการนำไปเขย่ากับตัวทำละลาย เช่น ฟริออน หรือ เฮกเซนในกรวยแยกจากนั้นระเหยตัวทำละลายจนแห้งและทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น การทำแห้งวิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับน้ำที่ประกอบด้วยไขมันและน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยกที่จุกปิดด้วย ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. ขวดก้นกลมขนาด 125 มิลลิลิตร
3. เครื่องอิงไอน้ำ
4. กระดาษกรอง
5. เครื่องชั่งละเอียด

#### สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.  $H_2SO_4$ )
2. เฮกเซน (n-Hexane) หรือฟริออน
3. โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำ (Sodium sulfate anhydrous)

#### วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอน (500 มิลลิลิตร) ใส่ในบีกเกอร์ที่ล้างด้วยเฮกเซนแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า

2. เทตัวอย่างน้ำลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มิลลิลิตร แล้วเทใส่กรวยแยกปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้นโดยชั้นเฮกเซนจะอยู่บนและตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง

3. ถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้ในปิ๊กเกอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ถ่ายชั้นเฮกเซน ซึ่งมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่ หลังการสกัดเทไว้ในขวดรูปชมพู่หรือขวดก้นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักคงที่ทราบค่า

4. นำตัวอย่างน้ำที่เก็บไว้จากข้อ 3 มาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15-20 มิลลิลิตร สกัดด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทำหลายๆ ครั้งจนไขมันและน้ำมันถูกสกัดออกจากน้ำตัวอย่างน้ำทั้งหมด

5. นำขวดรูปชมพู่ที่มีเฮกเซนไขมันและน้ำมันที่ได้จากการสกัดมาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอังน้ำจนแห้งปราศจากความชื้น ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก

#### การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B-A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \quad (ข.6)$$

A = น้ำหนักของขวดรูปชมพู่ (กรัม)

B = น้ำหนักของขวดรูปชมพู่และไขมันกับน้ำมัน (กรัม)

ในกรณีที่ชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ให้ใส่โซเดียมซัลเฟตจนได้สารละลายใสหรือใสเค็มซัลเฟตจับตัวกันดี กลิ้งไปกลิ้งมาได้ไม่เหลว และควรใส่โซเดียมซัลเฟตไว้บนกระดาษกรองด้วย แล้วจึงเทตัวทำละลายที่ใสผ่านกระดาษกรองเพื่อให้มีลชั้นและโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

#### 5. การวิเคราะห์หาของแข็งละลายน้ำ (TDS)

ของแข็งละลายน้ำ หมายถึงส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วแล้วนำไปใส่ถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ



## 6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

### วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองสารแขวนลอยออกทั้งหมดก่อนโดยกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและเครื่องกรองสุญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก

### การคำนวณ

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B-A)}{C} \times 10^6 \quad (ข.7)$$

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

## 6. การวิเคราะห์หาของแข็งทั้งหมด (TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึงปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างหมดแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นลงในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก น้ำหนักส่วนที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes) ทำด้วยกระเบื้องทองคำขาว หรือแก้วทนไฟ
2. เตาเผา (Muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $550 \pm 50$  องศาเซลเซียส
3. เครื่องอ่างไอน้ำ (Water bath)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)
6. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

### วิธีวิเคราะห์

1. นำถ้วยระเหยไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก
2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ให้ค่าของแข็งประมาณ 10 -20 มิลลิกรัม (โดยปกติใช้ 50 -100 มิลลิลิตร) เขย่าน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงปริมาตรน้ำที่แน่นอนด้วยกระบอกตวงใส่ในถ้วยระเหยในกรณีที่ใช้ปริมาตรน้อยกว่า 50 มิลลิลิตร ควรใช้ปิเปตจะได้ค่าที่แน่นอนมากขึ้น
3. นำไปตั้งบนเครื่องอังไอน้ำจนแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
4. นำถ้วยระเหยใส่ในโถดูดความชื้น เพื่อปล่อยให้เย็นและนำมาชั่งน้ำหนัก
5. ควรทำซ้ำโดยนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก ทำจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่หรือน้ำหนักที่ลดลงน้อยกว่าร้อยละ 4 ของการชั่งครั้งแรกหรือประมาณ 0.5 มิลลิกรัม

### การคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times 1,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}} \quad (ข.8)$$

$$A = \text{น้ำหนักของของแข็งและถ้วยระเหย (มิลลิกรัม)}$$

$$B = \text{น้ำหนักของถ้วยระเหย (มิลลิกรัม)}$$

### 7. การวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด หมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้างบนกระดาษกรองใยแก้ว หลังจากการกรองน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรแน่นอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มคือ น้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes) ทำด้วยกระเบื้องทองคำขาว หรือแก้วทนไฟ
2. เตาเผา (Muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $550 \pm 50$  องศาเซลเซียส
3. เครื่องอังไอน้ำ (Water bath)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส

5. โถดูดความชื้น (Desiccator)
6. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. กระดาษกรอง GF/C (glass fiber filter) เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
8. เครื่องกรองบุคเนอร์ (Buchner funnel)
9. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศขนาด 500 – 1000 มิลลิลิตร

### การทดลอง

1. นำกระดาษกรองไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก
2. วางกระดาษกรองลงในกรวยบุคเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ
3. ตวงปริมาตรตัวอย่างน้ำประมาณ 50 – 100 มิลลิลิตร (ควรให้มีค่าของแข็งที่ติดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม หรือต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม) เทลงในกรวยบุคเนอร์และเปิดเครื่องดูดสุญญากาศ จนน้ำแห้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที
4. นำกระดาษกรองไปอบแห้งที่ 103 -105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

### การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times 1,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}} \quad (\text{ข.9})$$

A = น้ำหนักของกระดาษกรองและสารแขวนลอย (มิลลิกรัม)

B = น้ำหนักของกระดาษกรอง (มิลลิกรัม)

## ภาคผนวก ค

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม  
(กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

| ดัชนีคุณภาพของน้ำ                                | ค่ามาตรฐาน  | วิธีวิเคราะห์  |
|--|---|--|
| 1. ค่าความเป็นกรด-เบส<br>(pH value)              | 5.5 – 9.0   | pH Meter   |
| 2. ค่าของแข็งละลายน้ำ<br>(Total dissolved solid) | - ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร<br>- น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือลงสู่ทะเล ค่า TDS ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร | ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |
| 3. สารแขวนลอย<br>(Suspended solids)              | ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมหรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัมต่อลิตร  | กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter disc)             |
| 4. อุณหภูมิ<br>(Temperature)                     | ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส   | เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง                      |
| 5. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)         | ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร  | ไทเทรต   |

| ดัชนีคุณภาพของน้ำ  | ค่ามาตรฐาน  | วิธีวิเคราะห์   |
|--|---|---|
| 6. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)   | ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร  | กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid                  |
| 7. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)  | ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัมต่อลิตร | สกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน           |
| 8. สีหรือกลิ่น   | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ   | ไม่ได้กำหนด   |
| 9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (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 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Biochemical Oxygen Demand: BOD) | ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร    | Azide modification ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน |
| 14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl)  | ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร  | Kjeldahl  |



| ดัชนีคุณภาพของน้ำ  | ค่ามาตรฐาน                     | วิธีวิเคราะห์   |
|--------------------|--------------------------------|---|
| 10. อาร์เซนิก (As) | ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร  | Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma:ICP |
| 11. ปรอท (Hg)      | ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร | Atomic absorption Cold Vapor Technique  |
| 12. เซเลเนียม (Se) | ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร  | Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma:ICP |

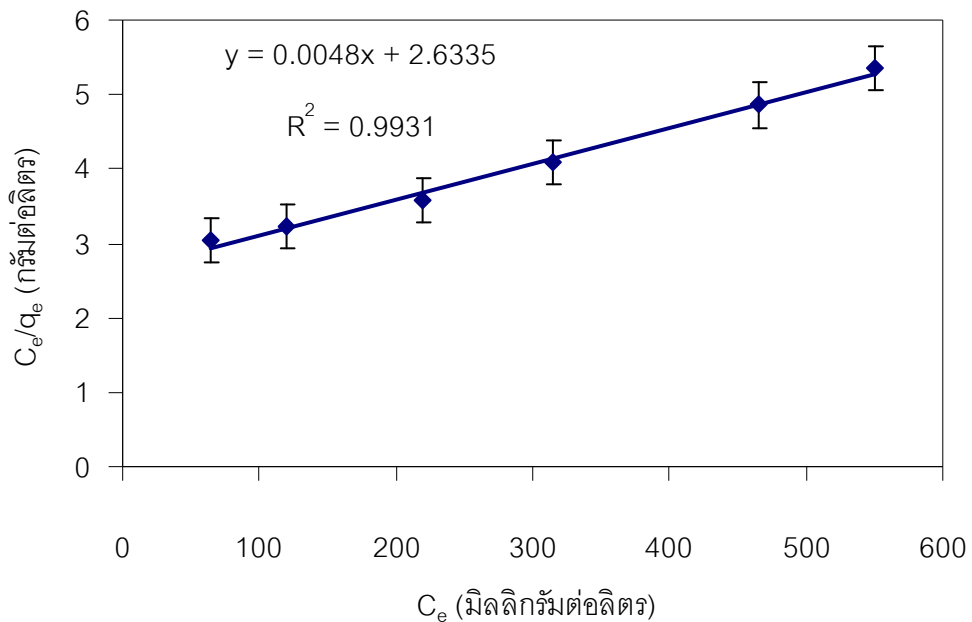
## ภาคผนวก ง

## วิธีการคำนวณ

## 1. การคำนวณค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

กราฟแสดงการศึกษาสมการแลงเมียร์ของปริมาณน้ำมันและไขมันสมการแลงเมียร์สามารถแสดงได้ดังนี้  $\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{K_L X_m}$  เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e$

และ  $C_e/q_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/X_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/K_L X_m$



สมการแลงเมียร์ (Langmuir equation)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{K_L X_m} \quad (\text{ค.1})$$

จากสมการเชิงเส้นตรง คำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{X_m}$$

$$0.0048 = \frac{1}{X_m}$$

$$\text{จุดตัด} = \frac{1}{K_L X_m}$$

$$2.6335 = \frac{1}{K_L X_m}$$



$$X_m = \frac{1}{0.0048} \qquad K_L = \frac{1}{(2.6335) \times \frac{1}{0.0048}}$$

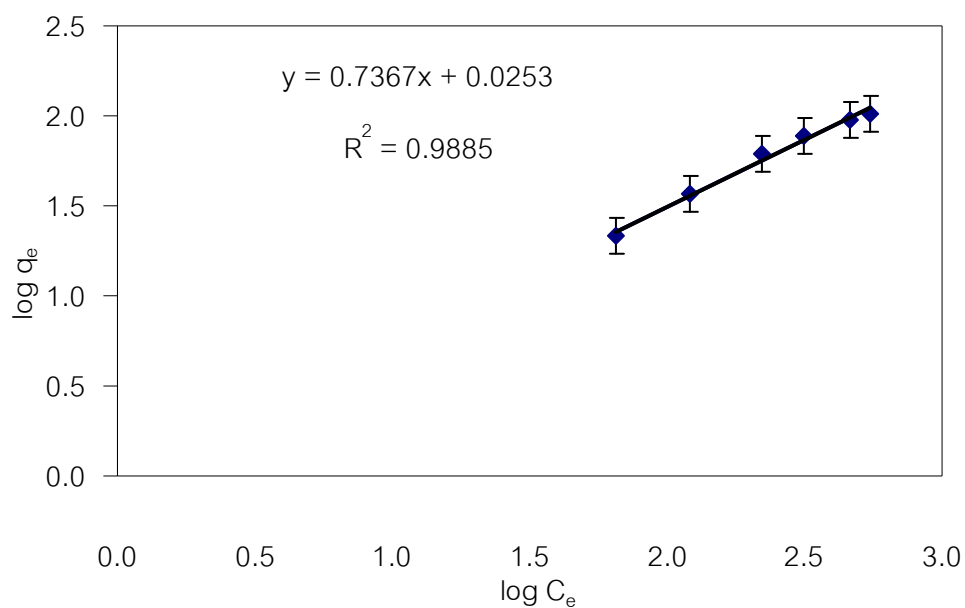
$$X_m = 208.33 \text{ mg/g}$$

$$K_L = 0.0018 \text{ L/mg}$$

## 2. การคำนวณค่าคงที่ของสมการฟรุนดลิช (Freundlich equation)

กราฟแสดงการศึกษาศักยภาพการฟรุนดลิชของปริมาณน้ำมันและไขมัน สมการฟรุนดลิชสามารถแสดงได้ดังนี้  $\log q_e = \log K_F + \left( \frac{1}{n} \right) \log C_e$  เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

$\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K_F$



สมการฟรุนดลิช (Freundlich equation)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{ค.2})$$

จากสมการเชิงเส้นตรง คำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{n}$$

$$\text{จุดตัด} = \log K_F$$

$$0.7367 = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{0.7367}$$

$$n = 1.3574$$

$$0.0253 = \log K_F$$

$$K_F = 10^{0.0253}$$

$$K_F = 1.0599 \text{ L/g}$$

3. การคำนวณค่าปริมาณน้ำมันและไขมันที่ปริมาณโคโตซาน 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสที่ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.1 ผลของปริมาณน้ำมันและไขมัน

| ปริมาณโคโตซาน (กรัม ต่อลิตร) | น้ำหนักขวดรูป ชมพู่ (A) ครั้งที่ 1 (กรัม) | น้ำหนักรวมที่ได้ (B) ครั้งที่ 1 (กรัม) | น้ำหนักขวดรูป ชมพู่ (A) ครั้งที่ 2 (กรัม) | น้ำหนักรวมที่ได้ (B) ครั้งที่ 2 (กรัม) | ปริมาณน้ำมัน และไขมัน ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัม ต่อลิตร) | ปริมาณน้ำมัน และไขมัน ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัม ต่อลิตร) | ค่าเฉลี่ยของ ปริมาณ น้ำมันและ ไขมัน (มิลลิกรัม ต่อลิตร) |
|------------------------------|---|--|---|--|--|--|---|
| น้ำมัน                       | 124.6811                                  | 124.6918                               | 124.7202                                  | 124.731                                | 1,070  | 1,080  | 1,075   |
| pH 2                         | 124.4412                                  | 124.4499                               | 124.4432                                  | 124.452                                | 870  | 880  | 875   |

#### การคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{[\text{น้ำหนักรวมที่ได้ (B)} - \text{น้ำหนักขวดรูปชมพู่ (A)}] \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \quad (\text{ค.3})$$

$$= \frac{(124.6918 - 124.6811) \times 10^6}{10}$$

$$= 1,070 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

การคำนวณร้อยละการลดลง (Reduction)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (\text{ค.4})$$

โดย  $C_o$  คือ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  คือ ปริมาณความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$= \frac{(1,075-875) \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 100}{1,075 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}$$

$$= 18.60$$

ร้อยละการลดลง = 18.60

4. การคำนวณค่าปริมาณซีไอดีที่ปริมาณโคโคซาน 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสที่ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.2 ผลของปริมาณซีไอดี

| ปริมาณโคโคซาน (กรัมต่อลิตร) | Blank (A) (มิลลิลิตร) | FAS ที่ไม่ได้อบ (มิลลิลิตร) | FAS ที่ไม่ได้อบ (N) (มิลลิลิตร) | ปริมาตร FAS ที่น้ำหนักโคโคซาน 3.5 กรัมต่อลิตร (มิลลิลิตร) |                            |  |  | ค่าเฉลี่ยของปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|----------------------------|--|--|---|
|                             |                       |                             |                                 | ครั้งที่ 1 (B) (มิลลิลิตร)                                | ครั้งที่ 2 (B) (มิลลิลิตร) | ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ครั้งที่ 1 | ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ครั้งที่ 2 |   |
| น้ำหนัก                     | 3.66                  | 3.2                         | 0.0234                          | 2.82  | 2.84                       | 31,500                                     | 30,750                                     | 31,125                                      |
| pH 2                        | 4                     | 3.5                         | 0.0214                          | 3.3   | 3.28                       | 24,000                                     | 24,685.71                                  | 24,342.8                                    |

การคำนวณ

$$\text{ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{[\text{แบลงค์ (A)} - \text{ปริมาตร FAS ครั้งที่ 1 (B)}] \times \text{ปริมาตร FAS ที่ไม่ได้อบ (N)} \times 8000 \times 10^6}{(\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง มิลลิลิตร})}$$

$$= \frac{(3.66-2.82) \times 0.0234 \times 8000 \times 500}{2.5}$$

$$= 31,500 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

การคำนวณร้อยละการลดลง (Reduction)

$$\begin{aligned} \% \text{ Removal} &= \frac{(C_o - C_e) \times 100}{C_o} && (\text{ค.6}) \\ &= \frac{(31,125 - 24,342.86) \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 100}{31,125 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}} \end{aligned}$$

ร้อยละการลดลง = 21.79

5. การคำนวณค่าปริมาณบีโอดีที่ปริมาณโคโคซาน 0.5-5.5 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสที่ 4 เวลา 3 ชั่วโมง และอัตราเร็วในการเขย่าที่ 350 รอบต่อนาที

ตารางที่ ง.3 ผลของปริมาณบีโอดี

| ปริมาณโคโคซาน (กรัมต่อลิตร) | Blank (มิลลิลิตร) | ปริมาตร Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O (มิลลิลิตร) |  |                                   |  |  |                                   |                                  |
|-----------------------------|-------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|-----------------------------------|----------------------------------|
|                             |                   | DO <sub>0</sub> ครั้งที่ 1 (มิลลิลิตร)   | DO <sub>5</sub> ครั้งที่ 1 (มิลลิลิตร) | BOD ครั้งที่ 1 (มิลลิกรัมต่อลิตร) | DO <sub>0</sub> ครั้งที่ 2 (มิลลิลิตร) | DO <sub>5</sub> ครั้งที่ 2 (มิลลิลิตร) | BOD ครั้งที่ 2 (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ค่าเฉลี่ย BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| น้ำนม                       | 9.53              | 9.8  | 1.2                                    | 1,720                             | 9.66                                   | 1.1                                    | 1,712                             | 1,716                            |
| pH 2                        | 10.10             | 8.6  | 1.08                                   | 1,504                             | 8.82                                   | 1.1                                    | 1,544                             | 1,524                            |

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{DO}_{\text{(ส่วนในล้านส่วน)}} &= [\text{DO}_0 \times (0.2/200)] \times 1000 && (\text{ค.7}) \\ &= [9.8 \times (0.2/200)] \times 1000 \\ \text{DO}_0 &= 9.8 \text{ มิลลิลิตร} \\ \text{DO}_5 &= 1.2 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าบีโอดี

$$\begin{aligned} \text{BOD (มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตร)} &= (\text{DO}_0 - \text{DO}_5) \times \text{อัตราส่วนเจือจาง} && (\text{ค.8}) \\ &= (9.8 - 1.2) \times 200 \\ &= 1,720 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

การคำนวณร้อยละการลดลง (Reduction)

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_o - C_e) \times 100}{C_o} \quad (\text{ค.9})$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(1,716 - 1,524) \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 100}{1,716 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}} \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละการลดลง} = 11.18$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิภาวัลย์ พิทักษ์พูลศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2530 จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเอกเคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร เมื่อเดือนมีนาคม 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2552 และสำเร็จหลักสูตรในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2555