การดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์

นายอภิชาติ ประหลาดเนตร

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SURFACE MODIFICATION OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION

Mr. Aphichart Praladnet

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์

โดย นายอภิชาติ ประหลาดเนตร

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม)

....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริลักษณ์ เจียรากร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อภิชาติ ประหลาดเนตร : การดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์ (SURFACE MODIFICATION OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. มะลิ หุ่นสม, 81 หน้า.

กลีเซอรอลดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจะมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากกระบวนการผลิต น้ำ สบู่และเกลือ งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์เพื่อการทำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพให้บริสุทธิ์โดยกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชาร์เท่ากับ 0.50-1.50 และอุณหภูมิในการกระตุ้นเท่ากับ 500-900 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชาร์เท่ากับ 1.00 และอุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,042 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.6783 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจากร้อยละ 80.87 ไปเป็น 93.28 โดยน้ำหนัก ในขณะที่สีลดลงถึงร้อยละ 82.57 โดยภาวะในการดูดซับที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ถึง 1.02 เท่า และเมื่อทำการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยการรีฟลักซ์ในกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3.0-9.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2558		

5572167923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS: PURIFICATION / SURFACE MODIFICATION / CRUDE GLYCEROL / ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / SEWAGE SLUDGE

APHICHART PRALADNET: SURFACE MODIFICATION OF ACTIVATED CARBON PREPARED FROM SEWAGE SLUDGE FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION. ADVISOR: PROF. MALI HUNSOM, Dr. de L'INPT, 81 pp.

Crude glycerol obtained from biodiesel production has low concentration due to the presence of impurities such as remaining catalyst, water, soaps and salts. This work aims to study the preparation of sludge-derived activated carbon and surface modification for crude glycerol purification by a chemical activation with KOH at the weight ratio of KOH to char of 0.50-1.50, followed by the activation temperature at 500-900 ^{o}C. The results demonstrated that the activated carbon prepared by KOH activation at the weight ratio between KOH to char of 1.00 and activation temperature of 800 ^{o}C can enhance the formation of BET surface area and pore volume up to 1,042 m^2/g and 0.6783 cm^3/g, respectively. It can enhance the purity of pretreated crude glycerol from 80.87 to 93.28 wt.% and a color reduction of 82.57% at the dosage of 70 g/L for 120 min adsorption time and shaking rate of 250 rpm, which is more effective than that of commercial activated carbon of around 1.02-fold. For surface modification of activated carbon by reflux in HNO_3 and H_2O_2 at the concentration in the range of 3-9 M at temperature of 80 ^{o}C for 10 h, which slightly changed the BET surface area and pore volume of the obtained activated carbon, but cannot significantly enhance more purity of pretreated crude glycerol.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Chemical Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ นอกจากนี้ยังช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริลักษณ์ เจียรากร และ ศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตศานต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ความเมตตาและเอาใจใส่แก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุน "ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต" จึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์กลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและบริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฎ

สารบัญภาพ .... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กลีเซอรอล 4

2.1.1 สมบัติของกลีเซอรอล 4

2.1.2 ประโยชน์ของกลีเซอรอล 6

2.2 กระบวนการผลิตกลีเซอรอล 8

2.2.1 ปฏิกิริยาแซพปอนนิฟิเคชัน 8

2.2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 9

2.2.3 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส 9

2.3 สมบัติกลีเซอรอลดิบและการเพิ่มความบริสุทธิ์ 9

2.3.1 การปรับสภาพกลีเซอรอลด้วยการสลายสบู่ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.3.2 การนำกลับแอลกอฮอล์ 11
2.3.3 การกลั่นด้วยไอน้ำ 12
2.3.4 การแลกเปลี่ยนไอออน 12
2.3.5 กระบวนการดูดซับ 13
2.4 กระบวนการดูดซับ 13
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ 13
2.4.2 กลไกการดูดซับ 14
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 15
2.5 ตัวดูดซับ 16
2.5.1 สารอนินทรีย์ 16
2.5.2 สารอินทรีย์สังเคราะห์ 17
2.5.3 วัสดุชีวภาพ 17
2.5.4 สารดูดซับชีวภาพ 17
2.5.5 ถ่านกัมมันต์ 17
2.6 ถ่านกัมมันต์ 17
2.6.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์ 17
2.6.2 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ 18
2.6.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์ 19
2.6.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ 20
2.6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ 22
2.6.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ 24
2.6.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช 25
2.7 การดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ 26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.7.1 การดัดแปรผิวด้วยกรด 26
2.7.2 การดัดแปรผิวด้วยเบส 27
2.7.3 การดัดแปรผิวด้วยความร้อน 27
2.7.4 การดัดแปรผิวด้วยคลื่นไมโครเวฟ 28
2.7.5 การดัดแปรผิวด้วยโอโซน 28
2.7.6 การดัดแปรผิวด้วยพลาสมา 29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย........ 32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย........ 32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 33
3.2.1 การคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย........ 33
3.2.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ........ 33
3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอล 34
3.3 วัตถุดิบและการจัดเตรียมวัตถุดิบ 34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย........ 36
3.4.1 การคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย 36
3.4.2 การกระตุ้นถ่านชาร์ 37
3.4.3 การดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์ 38
3.4.4 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับ 39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 40
4.1 สมบัติของวัตถุดิบ 40
4.1.1 สมบัติของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์........ 40
4.1.2 สมบัติของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ 42

หน้า

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย 44

4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ 44

4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้น 48

4.3 ผลของการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์ 53

4.3.1 ผลของการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก 53

4.3.2 ผลของการดัดแปรผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 57

4.4 ผลของภาวะในการดูดซับ 61

4.4.1 ผลของเวลาในการดูดซับ 61

4.4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพในการดูดซับ 61

4.5 ไอโซเทิร์มของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ 65

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 68

5.1 สรุปผลการทดลอง 68

5.2 ข้อเสนอแนะ 68

รายการอ้างอิง 69

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล 74

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ 76

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 78

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 81

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ 5

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานกลีเซอรอลจำแนกตามการนำไปใช้ 7

ตารางที่ 2.3 การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น และจีน 8

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลตามเกณฑ์ที่กำหนด 10

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด 19

ตารางที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด 20

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบโดยประมาณของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ 41

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ 41

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที 42

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ 44

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ .. 49

ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 65

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชของการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย 67

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล 5

ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาแซพปอนนิฟิเคชัน 8

ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 9

ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส 9

ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสะเทินสบู่ด้วยกรด 10

ภาพที่ 2.6 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 11

ภาพที่ 2.7 ระบบการนำกลับแอลกฮอล์ 11

ภาพที่ 2.8 กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดไอออนในกลีเซอรอลดิบ 12

ภาพที่ 2.9 กลไกการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีรูพรุน 15

ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ 18

ภาพที่ 2.11 รูปแบบไอโซเทิร์มตามการจำแนกแบบ IUPAC 23

ภาพที่ 2.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ 24

ภาพที่ 2.13 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช 25

ภาพที่ 2.14 หมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 26

ภาพที่ 2.15 ปฏิกิริยาบนพื้นผิวระหว่างกรดไนตริกกับถ่านกัมมันต์ 27

ภาพที่ 2.16 ปฏิกิริยาบนพื้นผิวระหว่างแอมโมเนียกับถ่านกัมมันต์ 27

ภาพที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ 28

ภาพที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยพลาสมา 29

ภาพที่ 3.1 กากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย 34

ภาพที่ 3.2 (ก) กลีเซอรอลดิบและ (ข) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพ 35

ภาพที่ 3.3 การปรับสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยกรดฟอสฟอริก 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย 37

ภาพที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 39

ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของ (ก) กลีเซอรอลดิบ (ข) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพและ (ค) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพหลังผ่านกระบวนการดูดซับ 43

ภาพที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 45

ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 46

ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ 46

ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 47

ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 48

ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 50

ภาพที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 50

ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ 51

ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 52

ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที..... 52

ภาพที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์..... 54

ภาพที่ 4.13 กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดไนตริก..... 54

ภาพที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 55

ภาพที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ 55

ภาพที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 56

ภาพที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 56

ภาพที่ 4.18 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 57

ภาพที่ 4.19 กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 58

ภาพที่ 4.20 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ 58

ภาพที่ 4.21 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ 59

ภาพที่ 4.22 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที 60

ภาพที่ 4.23 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที........ 60

ภาพที่ 4.24 ผลของเวลาในการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ(■) สารปนเปื้อน........ 62

ภาพที่ 4.25 ผลของเวลาในการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์........ 63

ภาพที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน........ 63

ภาพที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์........ 64

ภาพที่ 4.28 สมดุลของการดูดซับ........ 66

ภาพที่ 4.29 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ 66

ภาพที่ 4.30 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีลักษณะเป็นของเหลวใส หนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและมีรสหวาน ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 100 ลิตร จะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้คือกลีเซอรอลประมาณ 10 ลิตร กลีเซอรอลดังกล่าวมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของน้ำ มอนอกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ แอลกอฮอล์ที่เหลือจากกระบวนการผลิต รวมถึงสบู่ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับเบสที่ใช้เร่งปฏิกิริยา ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ในทันที จึงเริ่มมีการคิดค้นกระบวนการต่างๆ ในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล เช่น กระบวนการปรับสภาพกลีเซอรอลด้วยการสลายสบู่ การนำกลับแอลกอฮอล์ และการกลั่นด้วยไอน้ำ เป็นต้น แต่กระบวนการดังกล่าวนี้มีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์ที่สูงมากเพราะต้องดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันสูง จึงมีการประยุกต์นำวิธีการดูดซับ (Adsorption) ด้วยตัวดูดซับที่มีรูพรุนมาใช้ เนื่องจากวิธีการนี้สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ มีค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาผลของการดัดแปรผิวต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
2. เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรผิวต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย
3. เพื่อศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดัดแปรพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียด้วยกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบด้วยการดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ดัดแปรพื้นผิว

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. วิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียแบบประมาณ (Proximate analysis: ASTM D3172-07a) และแบบแยกธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence spectrometry)
4. คาร์บอไนเซชันกากตะกอนโดยการให้ความร้อนอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที
5. ศึกษาผลของตัวแปรในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ
   - อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.5
   - อุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส
6. ศึกษาผลของการดัดแปรผิวต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ตัวแปรที่ศึกษาคือ
   - ชนิดของสารเคมี ได้แก่ กรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
   - ความเข้มข้นในช่วง 3 ถึง 9 โมลต่อลิตร
7. วิเคราะห์สมบัติกากตะกอนที่ผ่านการคาร์บอไนซ์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ พื้นที่ผิว (BET surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameters) ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ และวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis: ASTM D3172-07a)

8. ศึกษาภาวะในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลด้วยถ่านกัมมันต์ ศึกษาตัวแปรที่ศึกษาคือ
   - เวลาที่ใช้ในการดูดซับในช่วง 30 ถึง 360 นาที
   - อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอล ในช่วง 30-110 กรัมต่อลิตร
9. วิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ค่าสี ปริมาณเถ้า และปริมาณสิ่งเจือปนในกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้
10. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลีเซอรอล

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอรีน (Glycerin) เป็นชื่อที่มาจากคำในภาษากรีกว่า Glykys หมายถึงความหวาน กลีเซอรอลได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1779 โดยนักวิทยาศาสตร์ด้านเคมีชาวสวีเดนชื่อ Carl W. Scheele จากการทดลองปฏิกิริยาการผลิตสบู่ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว กลีเซอรอลที่ถูกค้นพบครั้งนั้นถูกเรียกว่า "Sweet principle of fat" ต่อมาได้มีการค้นพบว่ากลีเซอรอลสามารถสกัดได้จากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ที่อยู่ในรูปเอสเตอร์ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากลีเซอไรด์ (Glyceride) โดยในระยะแรกมีการใช้ประโยชน์สำหรับเป็นส่วนผสมของกาว ทำให้กาวมีความเหนียวมากขึ้น รวมถึงส่วนผสมของสีย้อมและน้ำหมึก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1867 นักวิทยาศาสตร์ด้านเคมีชาวสวีเดนชื่อ Alfred Nobel ได้คิดค้นวิธีการผลิตระเบิดไดนาไมต์ (Dynamite) โดยใช้กลีเซอรอลที่ทำอยู่ในรูปไนโตรกลีเซอรีน (Nitroglycerine) เมื่อนำมาผสมกับซิลิกา (Silica) ณ จุดนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการนำกลีเซอรอลไปประยุกต์ในอุตสาหกรรม ปัจจุบันกลีเซอรีนเป็นชื่อเรียกเชิงพาณิชย์ของสารที่มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) [1]

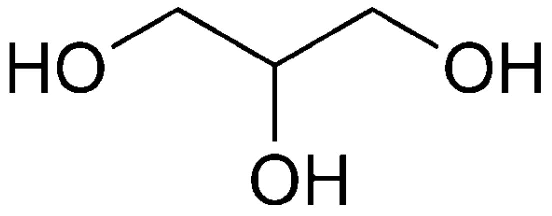
2.1.1 สมบัติของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใส หนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ มีรสหวาน กลีเซอรอลเป็นสารประเภทน้ำตาลแอลกอฮอล์ (Sugar alcohol) มีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ มีโครงสร้างเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่โมเลกุลมีเฉพาะพันธะเดี่ยวหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าแอลเคน (Alkane) โดยแอลเคนชนิดที่เป็นส่วนประกอบของกลีเซอรอลคือ โพรเพน (Propane) กลีเซอรอลเป็นสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จับกับหมู่แอลคิล (Alkyl group) 3 หมู่ (ภาพที่ 2.1) มีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่าไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ (Trihydric alcohol) เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่โครงสร้างประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจึงเป็นสารที่มีขั้ว (Polar molecule) ทำให้สามารถละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายบางชนิด ยกเว้นสารเคมีประเภทไฮโดรคาร์บอน [2] รายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติทางเคมีของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่กำหนดโดย AOCS (2000) แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอลบริสุทธิ์

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	92.09 g/mole
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.2636 (20 °C) ; 1.2620 (25 °C)
แรงดันไอ (Vapor pressure)	0.0025 mm (50 °C)
จุดเดือดที่ความดันปกติ (Boiling point)	150.2 °C (5 mm)
จุดเดือดที่ความดันต่ำ (Boiling point at low pressure)	166.1 °C (10 mm)
	181.3 °C (20 mm)
	190.9 °C (30 mm)
	198.0 °C (40 mm)
จุดหลอมเหลว (Melting point)	18.17 °C
จุดเยือกแข็ง (Freezing point)	(66.7% glycerol solution) -46.5 °C
ความหนืด (Viscosity)	1499 centipoises (20 °C)
จุดวาบไฟ (Flash point)	(99.0% glycerol) 177 °C
ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion)	397.0 kcal/mole
แรงตึงผิว (Surface tension)	63.4 dyne cm (20 °C)
	58.6 dyne cm (90 °C)
	51.9 dyne cm (150 °C)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล [3]

2.1.2 ประโยชน์ของกลีเซอรอล

อุตสาหกรรมการผลิตกลีเซอรอลเริ่มต้นขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 เนื่องจากราคาของโพรพิลีนที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตสารเคมีหลายชนิดมีราคาสูงขึ้น ทำให้ประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศหันมาสนใจผลิตกลีเซอรอลเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตสารเคมีแทน กลีเซอรอลเป็นสารประกอบอินทรีย์พวกแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท [4] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

1. อุตสาหกรรมเคมี กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารประกอบพอลิออล (Polyol) สำหรับผลิตโฟมพอลิยูริเทน ใช้ในการผลิต 1,3-โพรเพนไดออล (1,3-propanediol) เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบเคมีในการผลิตพอลิไตรเมทิลีนเทเรฟทาเลต (Polytrimethylene terephthalate, PTT) ซึ่งเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดใหม่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใย เนื่องจากมีความคงทนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. อุตสาหกรรมไดนาไมต์ กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไนโตรกลีเซอรีน (Nitroglycerine) ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการผลิตวัตถุระเบิดโดยเฉพาะไดนาไมต์ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่มีความรุนแรงเป็นสามเท่าของดินปืน
3. อุตสาหกรรมเภสัชกรรม กลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบในตัวยาที่ต้องการความชุ่มชื่นแก่ผิวหนัง เช่น ครีมทาผิว เป็นส่วนผสมในยาหลายชนิดเพื่อเพิ่มความชื้นและทำให้ยามีลักษณะเป็นน้ำเชื่อม เป็นส่วนผสมในยาสีฟันป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแห้งแข็งตัวในหลอดและกลีเซอรอลถูกใช้ในการผลิตสารละลายกลีเซอรอล-ฟีนอล (Glycerol-phenol) ใช้ในการล้างหู
4. อุตสาหกรรมอาหาร กลีเซอรอลเป็นสารให้ความหวาน ใช้เป็นตัวทำละลายให้แก่วานิลลา (Vanilla) ใช้เป็นสารให้ความนุ่มในทอฟฟี่ เค้ก ชีส ใช้เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) โดยผลิตเป็นมอนอหรือไดกลีเซอไรด์ ใช้เป็นฟิลเลอร์แก่อาหารที่มีไขมันต่ำ เช่น คุกกี้ และใช้เป็นสารให้ความข้น (Thickening agent) แก่เหล้า

ปริมาณการใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่างๆ จำแนกตามประเทศ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานกลีเซอรอลจำแนกตามการนำไปใช้ [4]

ลักษณะ	อุตสาหกรรม				มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
	เคมี	ไดนาไมต์	อาหาร	เภสัชกรรม	
กลิ่น	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	
กลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่น้อยกว่า)	99	99	99	95	BS 5711 : Part 3
ความหนาแน่นสัมพัทธ์					ISO 2099
- ที่อุณหภูมิ 20/20 องศาเซลเซียส	1.261 ถึง 1.264	1.261 ถึง 1.264	1.261 ถึง 1.264	-	
- ที่อุณหภูมิ 25/25 องศาเซลเซียส	-	-	-	1.249	
เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	0.01	0.01	0.01	0.01	ISO 1616
สารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมไม่เกิน)	2.0	-	-	1.5	มอก. 1281
ตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมไม่เกิน)	1.0	-	-	-	BS 2621 - 5
โลหะหนักทั้งหมด (เทียบกับตะกั่ว) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	5.0	-	-	5.0	BS 5711 : Part 15
คลอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	-	0.010	0.010	0.001	BS 5711 : Part 12
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	-	-	2.0	-	BS 5711 : Part 16
ซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน)	-	-	-	0.002	USP
แซพปอนนิฟิเคชัน (อิควิวเลนต์มิลลิอิควิเลนต์ต่อ 100 กรัมไม่เกิน)	0.64	0.64	-	-	BS 5711 : Part 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

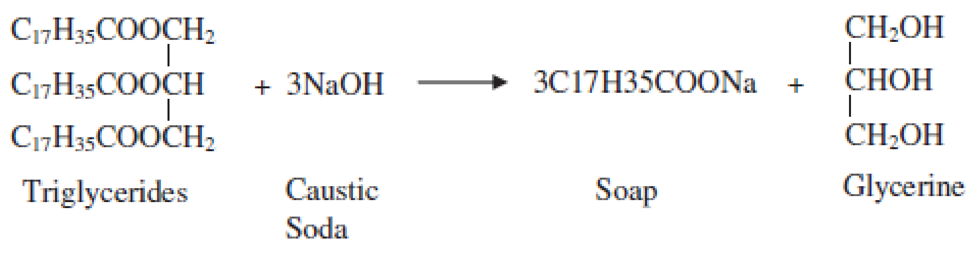
ตารางที่ 2.3 การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป ญี่ปุ่น และจีน

อุตสาหกรรม	ปริมาณร้อยละการใช้กลีเซอรอล			
	สหรัฐอเมริกา (160,000 ตันต่อปี)	สหภาพยุโรป (190,000 ตันต่อปี)	ญี่ปุ่น (50,000 ตันต่อปี)	จีน (80,000 ตันต่อปี)
ยา	39.5	23.1	34.0	5.2
ยาสูบ	15.8	2.5	5.3	7.3
อาหาร	14.5	5.6	ไม่มีข้อมูล	ไม่มีข้อมูล
พอลิอีเทอร์-แอลกอฮอล์	10.5	13.1	11.6	5.2
สี	9.2	13.1	19.5	49.0
กระดาษแก้ว	2.0	4.4	3.8	1.5
ระเบิด	0.6	3.1	1.9	3.1
อื่นๆ	7.9	35.0	23.9	29.5

2.2 กระบวนการผลิตกลีเซอรอล

2.2.1 ปฏิกิริยาแซพปอนนิฟิเคชัน

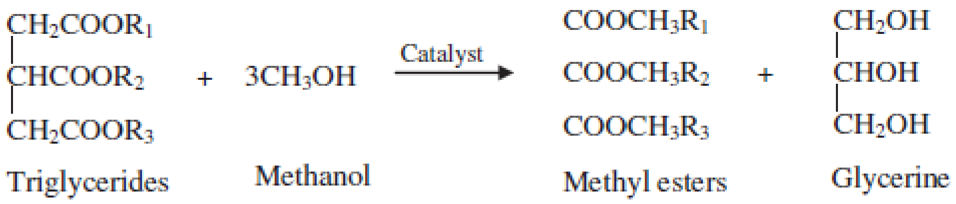
ปฏิกิริยาแซพปอนนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในไขมันหรือน้ำมัน กับด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและเกลือของกรดไขมันหรือสบู่ (Soap) แสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาแซพปอนนิฟิเคชัน

2.2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

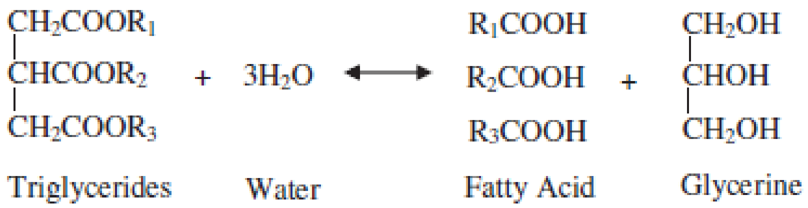
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล (Methanol) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นเอสเทอร์และผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นกลีเซอรอล แสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

2.2.3 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

ไตรกลีเซอไรด์ในไขมันหรือน้ำมันสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสให้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้โดยโมเลกุลของไอน้ำจะเข้าไปแตกพันธะของกรดไขมันออก และกลีเซอรอลจะกลับเข้าไปทำปฏิกิริยาใหม่ ได้กลับมาเป็นไตรกลีเซอไรด์ แสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

2.3 สมบัติกลีเซอรอลดิบและการเพิ่มความบริสุทธิ์

กลีเซอรอลดิบที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตสารต่างๆ จะมีความบริสุทธิ์ต่ำจึงถูกใช้งานอย่างจำกัดในอุตสาหกรรม ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลดิบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่ากลีเซอรอลดิบมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำและมีร้อยละของเถ้า น้ำ สบู่ ที่สูงเมื่อเทียบกับกลีเซอรอลเชิงพาณิชย์ ปัจจุบันมีการคิดค้นวิธีการเพิ่มมูลค่า

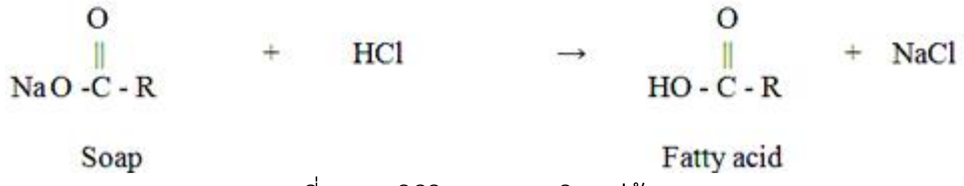
กลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อนำกลีเซอรอลที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมเคมี ดังนี้ [5]

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลตามเกณฑ์ที่กำหนด

ลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	กลีเซอรอลดิบ	กลีเซอรอลดิบที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความความบริสุทธิ์	กลีเซอรอลเชิงพาณิชย์
กลีเซอรอล (ร้อยละ)	60-80	99.1-99.8	99.2-99.98
เถ้า (ร้อยละ)	1.5-2.5	0.054	0.002
น้ำ (ร้อยละ)	1.5-6.5	0.11-0.8	0.14-0.29
สบู่ (ร้อยละ)	3.0-5.0	0.56	-
คลอไรด์ (ppm)	-	1.0	0.6-9.5
สี	น้ำตาลดำ	ใส	ใส

2.3.1 การปรับสภาพกลีเซอรอลด้วยการสลายสบู่

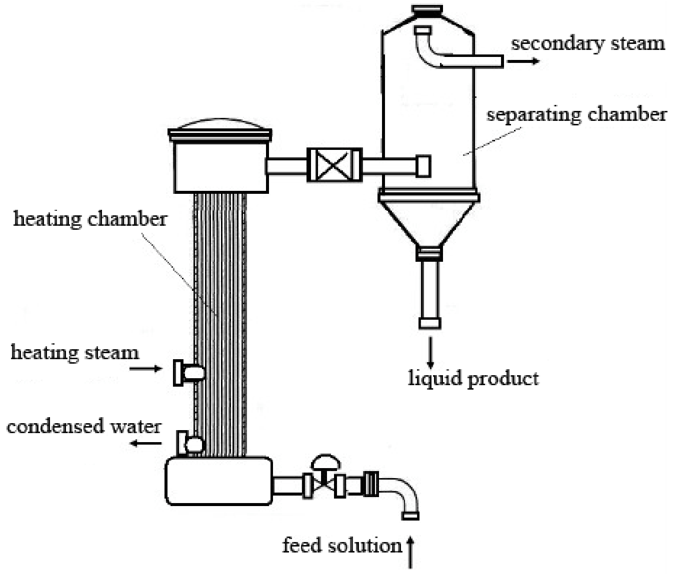
กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์จะเกิดสบู่ขึ้นในปริมาณมากในเฟสกลีเซอรอล ขั้นตอนแรกของการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลด้วยกระบวนการนี้จะเป็นการสะเทินตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่ที่มีอยู่ในกลีเซอรอลก่อนด้วยกรด โดยกรดที่นิยมใช้คือ กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 98 เพราะมีน้ำปนอยู่น้อยกว่ากรดเกลือ การสะเทินตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดทำให้เกิดเกลืออนินทรีย์และน้ำ ส่วนการสะเทินสบู่ด้วยกรดทำให้เกิดกรดไขมันอิสระตามปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.5 ทำให้เกิดการแยกชั้นออกเป็น 3 ชั้นได้แก่ ชั้นบนเป็นชั้นของกรดไขมันอิสระ ชั้นกลางเป็นชั้นที่มีกลีเซอรอลในปริมาณมากและชั้นล่างเป็นชั้นของเกลืออนินทรีย์



ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสะเทินสบู่ด้วยกรด

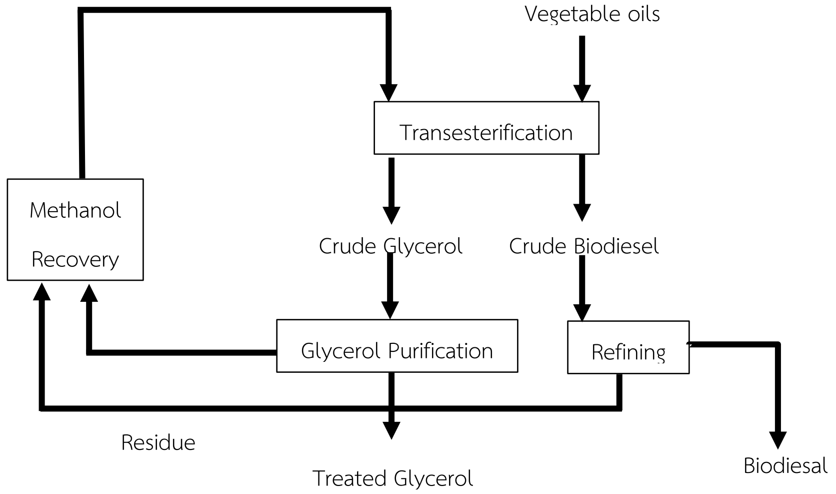
2.3.2 การนำกลับแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนิยมใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินพอเพื่อทำให้เกิดร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่สูง โดยปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินพอนี้จะกระจายตัวอยู่ในชั้นของไบโอดีเซลและกลีเซอรอล การแยกแอลกอฮอล์ออกจากกลีเซอรอลสามารถทำได้ด้วยการระเหยแบบแฟลชหรือใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มบางดังภาพที่ 2.6 อุณหภูมิในการแยกคืนแอลกอฮอล์ต้องไม่สูงมากเกินไปเพราะกลีเซอรอลสามารถสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส หลังขั้นตอนการระเหยแอลกอฮอล์แล้วความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 85 โดยระบบการนำกลับแอลกฮอล์แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.6 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง [6]

Chulalongkorn University



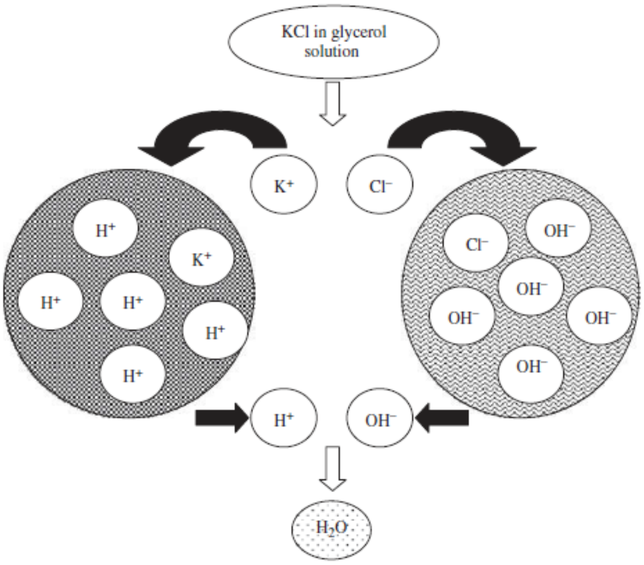
ภาพที่ 2.7 ระบบการนำกลับแอลกฮอล์ [7]

2.3.3 การกลั่นด้วยไอน้ำ

การกลั่นด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในกรณีที่ต้องการแยกสารไม่บริสุทธิ์ที่ไม่ระเหยออกจากสารที่มีจุดเดือดสูงและสลายตัวง่าย การกลั่นด้วยไอน้ำเป็นการป้อนไอน้ำที่มีความร้อนสูงและมีความดันมากกว่าบรรยากาศปกติประมาณ 2-3 เท่า โดยไอน้ำนี้จะถูกส่งผ่านจากหม้อต้มน้ำเข้าไปยังหอกลั่นซึ่งมีวัตถุดิบบรรจุอยู่ ดังนั้นไอน้ำจะสัมผัสโดยตรงกับวัตถุดิบเลย ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วแล้วไอน้ำจะพากลีเซอรอลออกมาด้วยทางฝาด้านบนของหอกลั่นไอน้ำ กลีเซอรอลจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยควบแน่นเพื่อทำให้เย็นลงกลายเป็นของเหลว วิธีการนี้ทำให้การกลั่นที่ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าและได้ผลค่อนข้างเร็ว

2.3.4 การแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอีกวิธีหนึ่งในการกำจัดสารเจือปนในกลีเซอรอลดิบ ได้แก่ กรดไขมันอิสระ สบู่ และเกลืออนินทรีย์ โดยทำการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างอะตอมของไฮโดรเจนในเรซินกับสารเจือปนในกลีเซอรอล (ภาพที่ 2.8) เรซินที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวหรือสีเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 มิลลิเมตร เป็นสารพอลิเมอร์ ในการใช้งานอาจมีการเพิ่มรูพรุนของโครงสร้างของตัวดูดซับหรืออาจมีการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เพื่อให้สามารถดูดซับสารเจือปนได้เพิ่มขึ้น ชนิดของการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้ตรงกับความต้องการได้ โดยการแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถแยกเกลืออนินทรีย์ ไขมัน สบู่ สี และกลิ่นออกได้ ทำให้กลีเซอรอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น



ภาพที่ 2.8 กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดไอออนในกลีเซอรอลดิบ [7]

2.3.5 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นความสามารถของตัวดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่อยู่ในภาวะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 วัฏภาค เชน แกสกับของเหลว แกสกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.4

2.4 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการกักเก็บสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กจะถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับที่ผิวนี้จะเป็นการดูดซับระหว่างสถานะมีทั้งแบบแก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ติดอยู่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากตัวถูกดูดซับไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงภาวะสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในตัวถูกดูดซับจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปจับอยู่กับตัวดูดซับ [8]

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลสารถูกดูดซับในภาวะแก๊สหรือของเหลวถูกดึงให้มาเกาะจับและติดที่บริเวณผิวของของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ การดูดซับนี้นับเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบของสารออกจากสารละลายหรือแก๊สอีกวิธีหนึ่ง ความสามารถในการดูดซับสารที่ต่างกันขึ้นกับลักษณะและความมีขั้วของผิว การจำแนกตัวดูดซับตามลักษณะขั้วของผิวมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีขั้ว ได้แก่ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล และอะลูมินาออกไซด์ เป็นต้น และชนิดที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์และพอลิเมอร์ดูดซับ เป็นต้น ดังนั้นในการที่จะแยกสารองค์ประกอบใดๆ จึงควรเลือกใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับสารนั้นๆ

การพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะทำให้ทราบถึงชนิดของการดูดซับได้ เนื่องจากสารองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายหรือแก๊สมีแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ไม่เท่ากัน และมีความสามารถในการกระจายบนผิวที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับและสารที่เป็นตัวถูกดูดซับ การดูดซับสามารถแบ่งตามความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในการดูดซับได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่ง

เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน เป็นกระบวนการคายความร้อนที่มักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ทำให้กระบวนการสามารถผันกลับ (Reversible) ไปมาได้ ส่งผลให้สามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (Regeneration) ได้ง่ายขึ้น ที่ความดันสูงจะสามารถเกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้นซึ่งจำนวนชั้นของสารถูกดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ แต่ที่ความดันต่ำโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดันภายในระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสารบนผิวของตัวดูดซับลดลง เกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (Desorption) ซึ่งการปลดปล่อยนี้จะไม่มีผลทำให้สมบัติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงไป

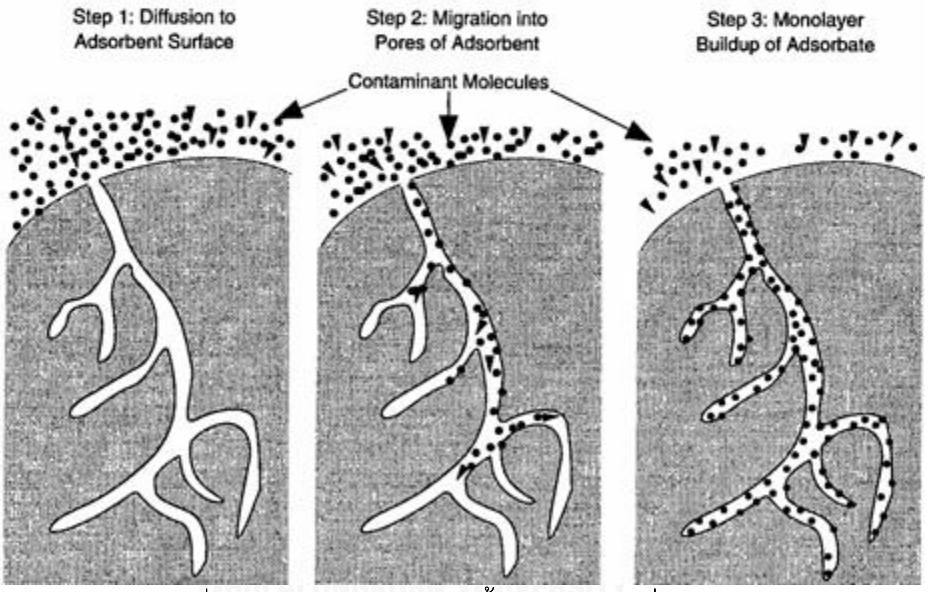
- การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงที่มากกว่าการดูดซับทางกายภาพ โดยเกิดจากการที่หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารถูกดูดซับ เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างกัน ทำให้มีค่าพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องส่งผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียวเท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว สารถูกดูดซับจะไม่สามารถหลุดออกมาจากผิวตัวดูดซับได้ ซึ่งจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้

2.4.2 กลไกการดูดซับ

กระบวนการดูดซับจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการดูดซับและขั้นตอนการคายซับ ในขั้นตอนการดูดซับสารละลายจะถูกส่งผ่านไปบนตัวดูดซับอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ กลไกการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับดังภาพที่ 2.9 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนการแพร่ภายนอก เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับเข้ามาติดกับผิวนอกของตัวดูดซับ สารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาตัวดูดซับหรือเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) การแพร่กระจายจะทำให้สารที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าหาตัวดูดซับได้มากกว่า แต่สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตรนั้น สารจะเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับตามทิศทางการไหลของของไหล การแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยมากโดยที่ขนาดและน้ำหนักของสารถูกดูดซับจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตะกอนและติดค้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้ ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาดจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับ

- ขั้นตอนการแพร่ภายใน เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนภายในของตัวดูดซับ โดยปกติแล้วตัวดูดซับนี้จะมีชั้นฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่โดยรอบ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามายังตัวดูดซับ โมเลกุลของสารต้องทำการแทรกตัวผ่านชั้นฟิล์มให้ได้จึงจะสามารถเข้าไปในผิวตัวดูดซับได้จึงจะมีการดูดซับเกิดขึ้น
- ขั้นตอนการเกาะติด โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของตัวดูดซับได้โดยไม่หลุดออกไป ซึ่งเป็นขั้นตอนที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนการแพร่ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้แล้ว ถือว่าเกิดการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2.9 กลไกการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีรูพรุน [9]

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการกวนสารละลายหรือการไหลผ่านคอลัมน์จะมีผลต่อการดูดซับ เนื่องจากตัวดูดซับมีขนาดและลักษณะทางกายภาพต่างกัน ทำให้การดูดซับของตัวดูดซับต้องการความปั่นป่วนในระดับที่แตกต่างกันออกไป เช่น ตัวดูดซับแบบผงต้องการความปั่นป่วนสูงจึงจะเกิดการดูดซับได้ดี เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านรูพรุนของโมเลกุลที่ถูกดูดซับเข้าสู่โพรงช่องว่างของตัวดูดซับ
- ขนาดของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับแบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับแบบเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Capacity of iodine adsorption)

กล่าวคือกรณีที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับส่วนมากเป็นพื้นที่ผิวของช่องว่างหรือโพรงภายใน ขนาดภายนอกของตัวดูดซับจะไม่ค่อยมีผลต่อการกำหนดพื้นที่ผิว ตัวดูดซับทั้งแบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักไม่แตกต่างกัน จึงทำให้ตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน แต่ตัวดูดซับแบบผงจะมีอัตราการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับแบบเกล็ด

- ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวตัวดูดซับ สารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนจะละลายน้ำได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างเหนียวแน่น ทำให้สารนี้เกิดการดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามสารที่ละลายน้ำได้บางชนิดสามารถเกาะติดผิวตัวดูดซับได้
- ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับมีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในโพรงของตัวดูดซับ พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเพียงเล็กน้อย เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารและตัวดูดซับมากที่สุด จึงทำให้สารขนาดเล็กนี้ถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับก่อน จากนั้นสารขนาดใหญ่จึงจะถูกดูดเข้าสู่รูพรุนตามลำดับ
- ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย เนื่องจากตัวดูดซับส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการดูดซับสารออกจากสารละลาย ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของสารตัวทำละลายจะมีผลต่อการดูดซับของตัวดูดซับ เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายจะมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของตัวถูกละลาย ถ้าสารละลายเป็นกรดจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนจะเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับได้ดี ทำให้ตัวดูดซับมีรูพรุนน้อยลง
- อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับอย่างมากถ้าอยู่ในภาวะของเหลว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้อัตราการดูดซับสูงขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.5 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ หมายถึง สารที่มีความสามารถในการดูดซับสารอื่นบนพื้นผิวได้ในปริมาณมากและตัวดูดซับแต่ละชนิดมีลักษณะประจำตัวตามธรรมชาติทางเคมีที่แตกต่างกันไป เช่น ปริมาณของพื้นที่ผิว และลักษณะการกระจายของขนาดรูพรุน เป็นต้น โดยจะแบ่งตัวดูดซับออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

2.5.1 สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกากัมมันต์ อะลูมิเนียมกัมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลของสารได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับอนินทรีย์มีข้อจำกัด

2.5.2 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.5.3 วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลืองและเถ้าแกลบดำ เป็นต้น

2.5.4 สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย เป็นต้น

2.5.5 ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ใช้ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้กำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.6

2.6 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal) เป็นตัวดูดซับของแข็งที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวภายในสูง เตรียมได้จากวัตถุดิบชีวมวลตามธรรมชาติ มีการใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น ใช้ในกำจัดสารเจือปนจากของเหลวหรือแก๊ส ทำให้ของเหลวหรือแก๊สนั้นมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการแยกสารได้อีกด้วย การใช้งานแต่ละประเภทนั้นย่อมต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีการจัดเรียงตัวเป็นโครงข่ายของแผ่นแกรฟีนอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ จากโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบนี้ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขนาดต่างๆ กระจายอยู่ภายในอนุภาคอย่างมหาศาล ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติการดูดซับที่ดีและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง คุณภาพของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบชีวมวล กระบวนการผลิต ชนิดและความเข้มข้นของสารกระตุ้น อุณหภูมิการกระตุ้น และระยะเวลาการกระตุ้น เป็นต้น [8]

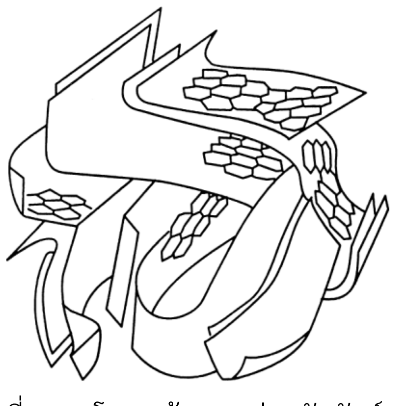
2.6.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

ประมาณปลายศตวรรษที่ 15 องค์การบริการสาธารณสุขของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้นำถ่านจากไม้ (Charcoal) มาใช้ในการดูดสีและกลิ่นจากน้ำธรรมชาติ เพื่อนำกลับมาใช้สำหรับอุปโภคบริโภคในแหล่งชุมชน ใน ค.ศ. 1811 มีการนำถ่านที่ผลิตจากกระดูกสัตว์มาใช้ในการดูดสี พบว่าสามารถดูดสีได้ดีกว่าถ่านไม้ จึงนำมาใช้ฟอกสีของน้ำตาลทราย ในปี ค.ศ. 1822 มีการนำถ่านมาผสมกับเลือดและขี้เถ้า (Potash) ถ่านที่ได้มีสมบัติในการดูดสีดีกว่าถ่านธรรมดาถึง 20-50 เท่า แต่การผลิตไม่เพียงพอต่อการใช้ในอุตสาหกรรม ต่อมาในปี ค.ศ. 1902 Ostreyko นักวิทยาศาสตร์ชาวโปแลนด์ศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้ไปเผาในบรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และนำถ่านที่ได้ผสมกับคลอไรด์ของโลหะแล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูง นับว่าเป็นผู้ริเริ่มการผลิต

ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ขึ้น และในปี ค.ศ. 1978 ได้มีการคิดค้นการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว โดยนำไปเผาภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นก็มีการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้ในอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อย เปลือกถั่ว หรือถ่านลิกไนต์ เป็นต้น

2.6.2 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของวงเบนซิน (Benzene ring) หรือกลุ่มของคาร์บอนอะตอมที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดี่ยวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพอิเล็กตรอนซึ่งจะเคลื่อนที่ไปทั่วทั้งโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม การสลับตำแหน่งในทิศทางขนานกับแผ่นจะเกิดง่ายเพราะแรงแวนเดอร์วาลอ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่องในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย เมื่อศึกษาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆ ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวราบ การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆ จะมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์เซชัน โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [10]

2.6.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด

ถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียดมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงละเอียด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600	AWWA B600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20-0.75	AWWA B600

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

ถ่านชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอของสารที่เจือปนกับแก๊สเพื่อทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เมื่อถูกใช้ไปแล้วนั้นจะสามารถนำกลับมาทำให้บริสุทธิ์และใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีก โดยแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่ (ตารางที่ 2.6)

- ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดผงอัด เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการนำผงถ่านกัมมันต์มาอัดให้เป็นแท่งหรือเป็นเม็ด ถ่านประเภทนี้เหมาะกับการกรองหรือการดูดซับแก๊ส เนื่องจากทำให้ความดันตกคร่อม (Pressure drop) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น นอกจากนี้ถ่านอัดยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทั้งยังทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อยด้วย

- ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ซึ่งจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับขนาดในการบดและกระบวนการในการผลิตทำให้มีความสามารถในการกรองหรือดูดซับแก๊สก็จะแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600	AWWA B604
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8	AWWA B604
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่น้อยกว่า	0.20	AWWA B604
ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 Ro-Tap abrasion test

- ถ่านกัมมันต์เคลือบผิว

ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้เป็นถ่านกัมมันต์พิเศษที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวดูดซับให้กับสารดูดซับ การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับดำเนินการโดยการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยสารต่างๆ ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะบางประเภท สารพอลิเมอร์บางชนิด กรดหรือด่าง เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

- ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปในโครงสร้าง เช่น อนุภาคโลหะเงิน ทองแดง โครเมียม และเหล็ก เป็นต้น ทำให้ถ่านมีสมบัติพิเศษในการฆ่าเชื้อโรค ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้กับระบบกรองน้ำในเครื่องกรองน้ำ อีกทั้งยังใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหารด้วย

- ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์บางชนิดที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพโดยใช้เทคนิคพิเศษ พอลิเมอร์ที่จะนำมาเคลือบนี้ต้องมีสมบัติพิเศษในการยอมให้สารบางชนิดผ่านไปได้เท่านั้น ดังนั้นจึงมีการนำถ่านชนิดนี้มาใช้เป็นวัสดุดูดซับสารหรือไอของแก๊สพิษ หรือนำไปใช้เป็นยาในกระบวนการฟอกเลือดที่เรียกว่า ฮีโมเพอร์ฟูชัน (Hemoperfusion)

2.6.4 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ขั้นตอนหลักในการผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอไนเซชัน (Carbonization process) และการกระตุ้น (Activation process) ดังนี้

- การคาร์บอไนเซชัน

การคาร์บอไนเซชันเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นถ่านชาร์หรือการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงในสภาพไร้

ออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนจำกัด เพื่อป้องกันไม่ให้วัตถุดิบเกิดการลุกไหม้และกลายสภาพเป็นเถ้า ในระหว่างการคาร์บอไนซ์นั้น ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนจะถูกกำจัดออกไปอยู่ในสถานะแก๊ส จากขั้นตอนนี้จะได้แก๊สผสมไฮโดรคาร์บอนของเหลวคล้ายน้ำมัน (ทาร์) กรดแอซีติก แอซีโทน เมทานอล และถ่านชาร์ ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้นี้จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าวัตถุดิบชีวมวลเริ่มต้นและไม่มีควัน แต่จะยังมีความสามารถในการดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

- การกระตุ้น

การกระตุ้นเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบหรือถ่านชาร์ไปเป็นถ่านกัมมันต์ในสภาพที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด ซึ่งเป็นขั้นตอนการเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการดูดซับให้กับถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะมีทั้งกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยตรง และกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ จากนั้นจึงเปลี่ยนถ่านชาร์ไปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี ดังนี้

- การกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น ให้มีรูพรุนขนาดต่างๆ ให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และคาร์บอนมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไอเสียจากการเผา ซึ่งเรียกสารดังกล่าวว่า แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) โดยใช้ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ แก๊สพวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับทาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์เกิดการแกซิฟิเคชัน (Gasification) ในบางส่วนของถ่านชาร์ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกไป เกิดเป็นรูพรุนด้วยกลไกที่ต่างๆ กันคือ การเปิดรูพรุนที่ปิด การทำให้รูพรุนขนาดเล็กใหญ่ขึ้น และการสร้างรูพรุนใหม่ ทำให้ถ่านชาร์มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นจึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการคาร์บอไนเซชันวัตถุดิบที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นโดยทั่วไปเป็นสารประเภทแอลคาไลน์ โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประเภทด่าง และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น สารเคมีที่เติมลงไปจะทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบและขณะที่ทำการคาร์บอไนเซชันจะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบและเกิดการเชื่อมโยงกัน (Cross- link) ของโครงสร้างทำให้ถ่านชาร์เกิดรูพรุนขึ้น สารระเหยบางตัวในโครงสร้างของวัตถุดิบไม่สามารถหลุดออกไปได้ เนื่องจากติดการเชื่อมโยงกันนี้ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ได้เพิ่มขึ้นและการเกิดทาร์ลดลง การเชื่อมโยงกันประกอบกับสารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ และแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้เกิดการหดตัวน้อย เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำหรือกรดจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้นอีก ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้เพราะสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน ตัวแปรที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของสารเคมี อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลา

2.6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไปมักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทิร์ม (Isotherm) ภาพที่ 2.11 แสดงประเภทไอโซเทิร์มตามการจำแนกของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [11]

- ไอโซเทิร์มแบบที่ I เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพันธ์ต่ำ

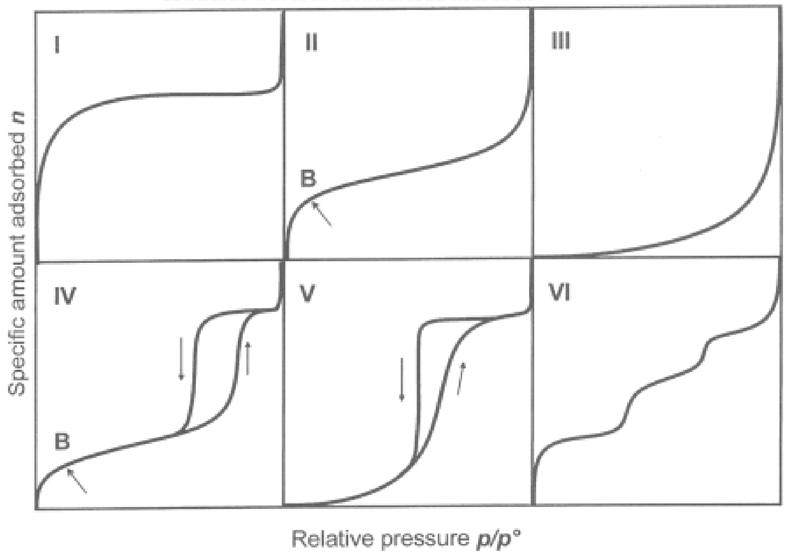
● ไอโซเทิร์มแบบที่ II เป็นไอโซเทิร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) มักจะเกิดกับตัวดูดซับที่มีความพรุนขนาดใหญ่ ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (จุด B) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น

● ไอโซเทิร์มแบบที่ III เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้า มักจะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง

● ไอโซเทิร์มแบบที่ IV เป็นไอโซเทิร์มที่พบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง ในช่วงแรกซึ่งมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทิร์มจะเหมือนกับไอโซเทิร์มแบบที่ II จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นภายในรูขนาดเล็ก ทำให้เกิดวงฮีสเทอรีซีส (Hysteresis loop) ในช่วงของการคายซับ

● ไอโซเทิร์มแบบที่ V เป็นไอโซเทิร์มที่มีลักษณะคล้ายกับไอโซเทิร์มแบบที่ IV แต่เกิดการควบแน่นภายในรูพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งไอโซเทิร์มชนิดนี้จะไม่พบบ่อยนัก

● ไอโซเทิร์มแบบที่ VI เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได แสดงให้เห็นการดูดซับเป็นแบบหลายๆ ชั้นที่แยกออกจากกัน ซึ่งพบในตัวดูดซับที่มีการกระจายตัวของรูพรุนหลายขนาด



ภาพที่ 2.11 รูปแบบไอโซเทิร์มตามการจำแนกแบบ IUPAC [12]

2.6.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นไอโซเทิร์มที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมุติฐานของการดูดซับคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กัน

จากสมมุติฐานสามารถเขียนเป็นสมการของแลงเมียร์ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_0} + \frac{C_e}{q_0} \qquad (2.1)$$

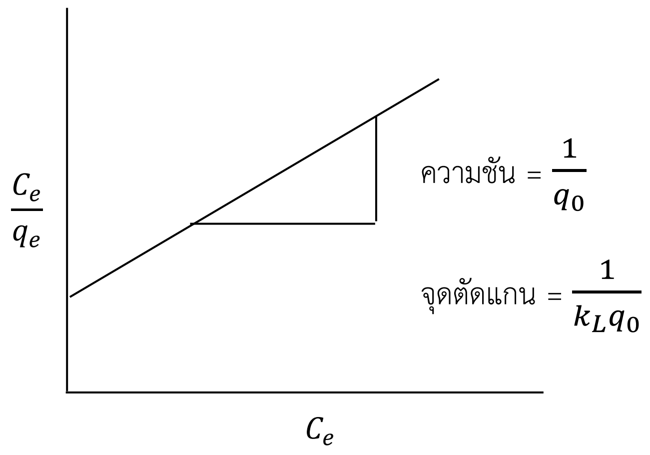
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับคงเหลือที่ภาวะสมดุล

q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุล

q_0 คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด

k_L คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากสมการที่ 2.2 เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_eกับ $\frac{C_e}{q_e}$ จะได้กราฟดังภาพที่ 2.12 ซึ่ง q_0 และ k_L สามารถได้จากความชันและจุดตัดแกน ตามลำดับ โดยเมื่อ q_0 มีค่ามากแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับมากและถ้า k_L มากแสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับดี



ภาพที่ 2.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

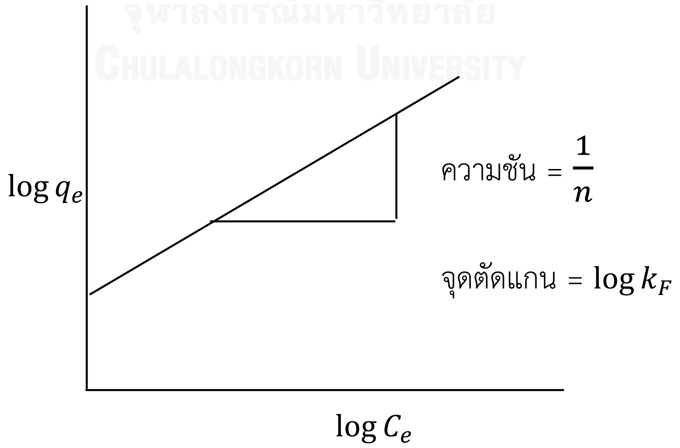
2.6.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช

ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิชเป็นไอโซเทิร์มที่ใช้กับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ โดยลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น ข้อเสียของไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช คือ ใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงได้ไม่ดี ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลแสดงดังสมการ

$$\log q_e = \log k_F + \frac{\log C_e}{n} \qquad (2.2)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับคงเหลือที่ภาวะสมดุล
q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่ภาวะสมดุล
k_F คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช
n คือ ค่าคงที่ที่มีผลขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากสมการที่ 2.2 เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ ดังภาพที่ 2.13 ซึ่ง n และ k_F สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนตามลำดับ โดย n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ถ้าค่า n มากแสดงว่าตัวดูดซับที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดีและถ้า k_F มากแสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดี

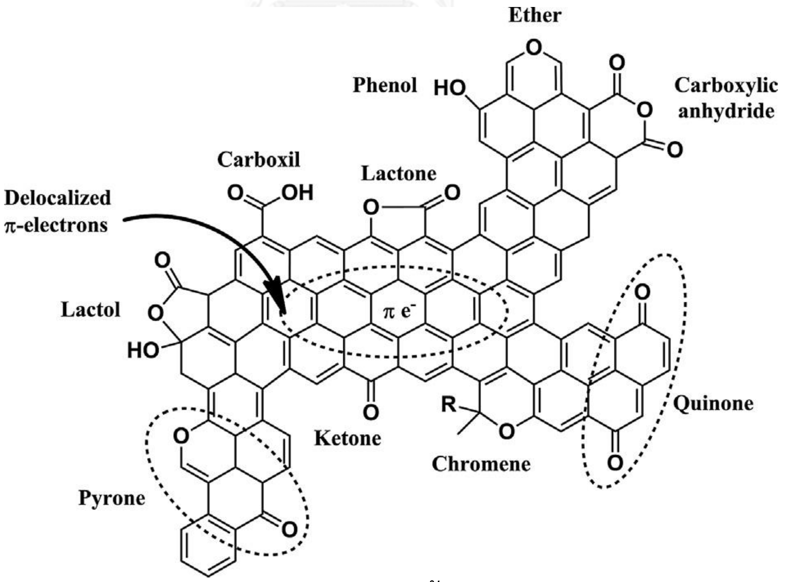


ภาพที่ 2.13 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟลุนด์ลิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7 การดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยผลึกคาร์บอนที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอนมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว จะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็นออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวนี้จึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบอย่างง่ายของสมการเคมีได้ เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 2.14) พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด การเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการออกซิไดซ์ถ่านกัมมันต์ในภาวะแก๊สและภาวะของเหลว จากวิธีการดังกล่าวทำให้พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นได้ทั้งกรด เบส และเป็นกลาง ตัวอย่างของพื้นผิวที่เป็นกรดเช่น คาร์บอกซิล ฟีโนลิก ไฮดรอกซิล แลคโตน และควิโนน ซึ่งเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกซิไดซ์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีหมู่ที่แสดงความเป็นกรดที่บริเวณผิวจะทำให้มีสมบัติในการชอบดูดน้ำมากขึ้น และการดูดน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลต่อการดูดซับที่พื้นผิวและลักษณะต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการมีหมู่ฟังก์ชั้นเหล่านี้จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ [13-15]

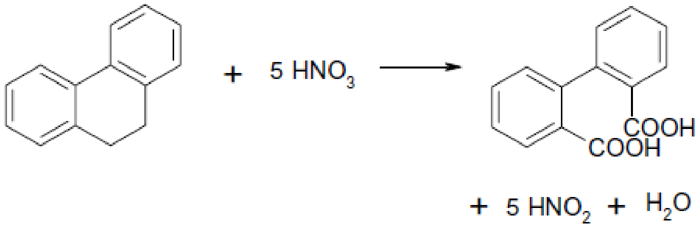


ภาพที่ 2.14 หมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [16]

2.7.1 การดัดแปรผิวด้วยกรด

การดัดแปรผิวด้วยกรดเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดให้กับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล แลคโตน และควิโนน โดยสารเคมีที่ใช้ในการออกซิไดซ์เพื่อดัดแปรพื้นผิวของ

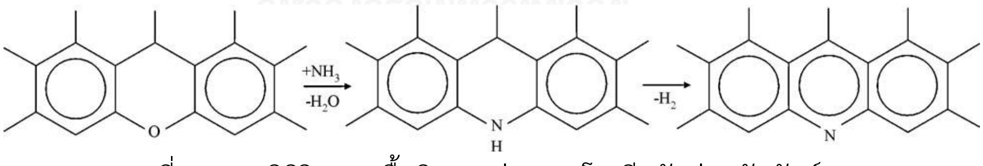
ถ่านกัมมันต์ เช่น กรดไนตริกหรือกรดซัลฟิวลิก เป็นต้น การดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกรดแสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.15 ซึ่งทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายได้ดีขึ้น เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดทำให้มีไอออนบวกจัดเรียงตัวกันอย่างซับซ้อนบนพื้นผิว ซึ่งไอออนบวกนี้สามารถเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะกับไฮโดรเจนได้



ภาพที่ 2.15 ปฏิกิริยาบนพื้นผิวระหว่างกรดไนตริกกับถ่านกัมมันต์ [15]

2.7.2 การดัดแปรผิวด้วยเบส

การดัดแปรผิวด้วยเบสเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสให้กับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี เช่น การดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยแอมโมเนียแสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.16 ซึ่งทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับฟีนอลซึ่งเป็นกรด ออกจากสารละลายได้ดีขึ้น โดยแอมโมเนียจะทำให้เกิด หมู่เอมีนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งหมู่เอมีนนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาจับกับฟีนอลได้



ภาพที่ 2.16 ปฏิกิริยาบนพื้นผิวระหว่างแอมโมเนียกับถ่านกัมมันต์ [15]

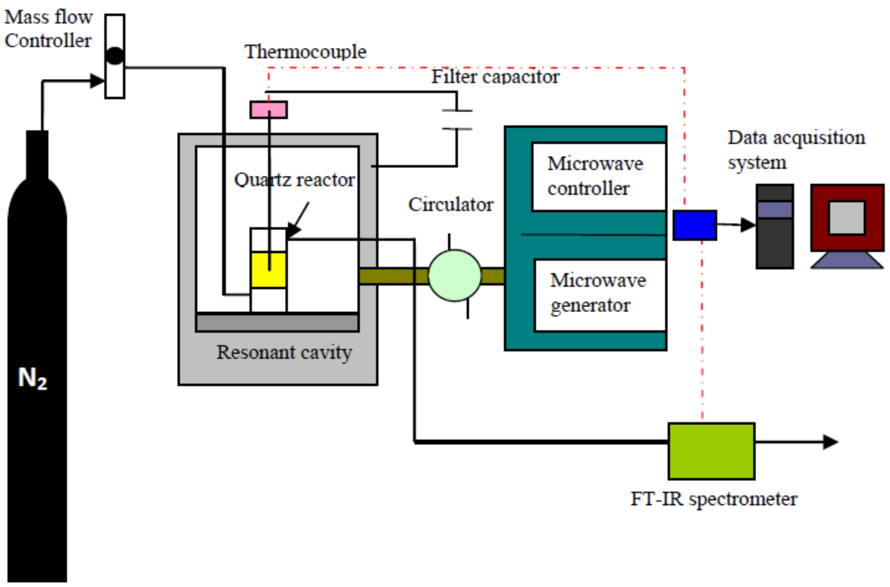
2.7.3 การดัดแปรผิวด้วยความร้อน

การดัดแปรผิวด้วยความร้อนในภาวะแก๊สหรือของเหลวสามารถเพิ่มความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ได้ เมื่อทำการดัดแปรผิวด้วยความร้อนภายใต้ภาวะแก๊สเฉื่อยสามารถเพิ่มความเป็นกรด-ด่าง และหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่นิยมใช้ในการดัดแปรผิวมากกว่าแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอนเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนมีความสามารถในการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำและทำให้หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มีความ

เสถียรมากขึ้น โดยการให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียสภายใต้ภาวะแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ชนิดเบสที่มีความเสถียรสูง

2.7.4 การดัดแปรผิวด้วยคลื่นไมโครเวฟ

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 2.17) จะส่งผลต่อรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดการลดลงของอะตอมออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ในขณะที่อะตอมไนโตรเจนมีการเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์เป็นหมู่เบสคือหมู่ไพโรนซึ่งมีอะตอมไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งข้อดีของการใช้คลื่นไมโครเวฟในการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่าวิธีอื่นทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้



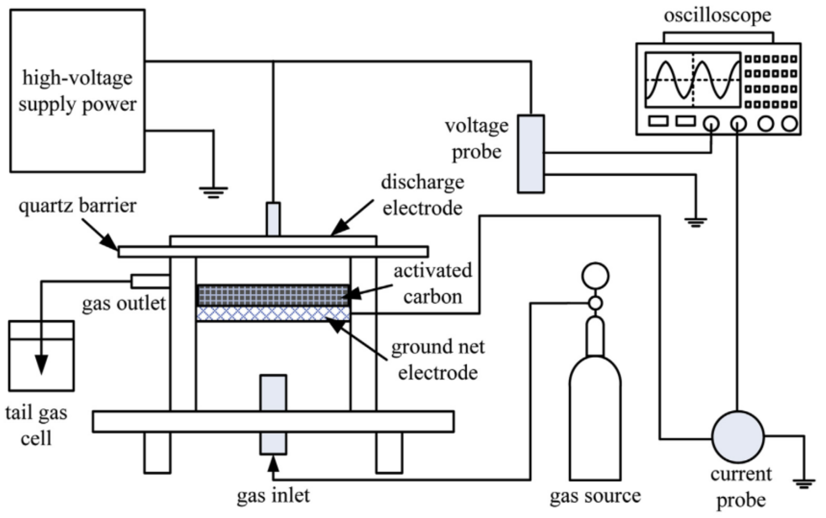
ภาพที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ [17]

2.7.5 การดัดแปรผิวด้วยโอโซน

โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของหมู่ออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ การใช้โอโซนในความเข้มข้นที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดปริมาณหมู่ฟังก์ชันชนิดกรดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จำนวนมาก แต่จะทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ของถ่านกัมมันต์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งการใช้โอโซนในการดัดแปรผิวจะทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สแอมโมเนียมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ดัดแปรผิวด้วยโอโซน

2.7.6 การดัดแปรผิวด้วยพลาสมา

การดัดแปรผิวด้วยพลาสมาถูกใช้ในการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันชนิดกรดและเบสบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับชนิดของแก๊สที่ใช้ในระบบ เช่น ถ้าใช้แก๊สออกซิเจนในระบบจะทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิลิกมากขึ้นแต่จะไปลดหมู่อีเทอร์บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ข้อดีของการใช้พลาสมาในการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์คือ วิธีนี้จะไปเพิ่มหมู่ออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อย่างเดียวโดยไม่ส่งผลต่อปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยพลาสมา [18]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu และคณะ (2009) [19] ศึกษาการดูดซับกลีเซอรอลจากน้ำล้างไบโอดีเซลโดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ดินขาว ซีโอไลต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีการดูดซับกลีเซอรอลสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น เมื่อทำการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียสและกระตุ้นด้วยกรดไนตริก พบว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีหมู่คาร์บอกซิลิก หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล หมู่แลกโตน และหมู่ฟีนอลิก การดัดแปรผิวด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียวจะเป็นการทำลายหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวและเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ส่วนการกระตุ้นพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริกจะเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมากขึ้นและเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอล พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปรพื้นที่ผิวด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริก

Monsalvo และคณะ (2011) [20] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการกระตุ้นของคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศ อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่าการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และอากาศจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวประมาณ 100 ตารางเมตรต่อกรัม การเพิ่มเวลา อุณหภูมิและอัตราส่วนในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวสูงสุดที่ได้เท่ากับ 1,832 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับกากตะกอนบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 3

Xianglan และคณะ (2011) [21] ศึกษาการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยใช้ไอน้ำ กรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นและเวลาในการกระตุ้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกเพิ่มขึ้นจะทำให้หมู่ฟีโนลิกเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้หมู่แลคโตนลดลง และหมู่คาร์บอกซิลิกกับหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้นข้นของกรดไนตริก สำหรับการกระตุ้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นและความเข้นข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้นข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้หมู่ฟีโนลิกและหมู่คาร์บอกซิลิกลดลง

Mahapatra และคณะ (2012) [22] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย สารกระตุ้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ผสมกรดซัลฟิวริก และซิงค์คลอไรด์ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า สารกระตุ้นทั้งหมดที่ศึกษาทำให้เกิดรูพรุนแบบไมโครพอร์ สารกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดรูพรุนแบบไมโครพอร์สูงที่สุด ส่วนการใช้สารกระตุ้นซิงค์คลอไรด์จะทำให้เกิดรูพรุนแบบเมโซพอร์จำนวนมาก และให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 531.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าการใช้สารกระตุ้นชนิดอื่น

Hunsom และ Autthanit (2013) [23] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์ สารกระตุ้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก จากผลการทดลองพบว่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่คาร์บอนิลและสมบัติทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สูงกว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนและการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริก อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ เวลาดูดซับสารกระตุ้น และอุณหภูมิการคาร์บอไนซ์ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ รวมถึงความสามารถใน

การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพอย่างชัดเจน โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ร้อยละ 93.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 1.05 เท่า

Vasques และคณะ (2013) [24] ศึกษาการดูดซับกลีเซอรอล มอนอกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์จากไบโอดีเซลโดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ถูกดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่ถูกดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก ความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29 เป็นร้อยละ 83 เนื่องจากความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลจะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ถูกดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกจะให้ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ได้ดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกและถ่านกัมมันต์ที่ถูกดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกจะให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก

Ozedemir และคณะ (2014) [25] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากก้านองุ่นด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นภายใต้บรรยากาศแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่อัตราส่วนของสารกระตุ้น เวลาการดูดซับสารกระตุ้น เวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นและอัตราส่วนของสารกระตุ้นส่งผลต่อพื้นที่ผิว โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียม ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้ได้พื้นที่ผิวสูงสุดคือ อัตราส่วนของสารกระตุ้นเท่ากับ 2 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 36 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการกระตุ้น 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยจะให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,411 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.723 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

Li และคณะ (2016) [26] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากต้นข้าวโพดและกากตะกอนบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นสารกระตุ้นภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ตัวแปรที่ต้องการศึกษาได้แก่ ชนิดสารกระตุ้น อุณหภูมิในการกระตุ้น ความเข้มข้นของสารกระตุ้น เวลาในการกระตุ้น เวลาดูดซับสารกระตุ้นและร้อยละการเติมต้นข้าวโพด พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอย่างเดียวจะให้ค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 475 ตารางเมตรต่อกรัม ที่ภาวะความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ 4 โมลต่อลิตร อุณหภูมิในการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และเมื่อทำการเติมต้นข้าวโพดลงไปร้อยละ 25 ที่ภาวะเดียวกันส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 769 ตารางเมตรต่อกรัม

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาผลของการดัดแปรผิวต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้รวมถึงขั้นตอนการทดลองแสดงดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แก๊สไนโตรเจน (N_2, 99.99%, Praxair)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, AR grade, Carlo Erba)
3. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4, AR grade. QReC)
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, QReC)
5. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4, 96%, QReC)
6. กรดไนตริก (HNO_3, 69%, J.T. Baker)
7. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2, 30%, QReC)
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade, QReC)
9. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3, AR grade, Loba Chemie)
10. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$, AR grade, Loba Chemie)
11. กลีเซอรอล (Glycerol, 99.5%, QReC)
12. เมทานอล (Methanol, HPLC grade, Fisher Chemical)
13. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
14. โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue, Loba Chemie)
15. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phynolpthalein, Loba Chemie)
16. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange, Loba Chemie)
17. ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ จากบริษัท Panreac Quimica UK

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 การคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

1. เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อ (Tubular furnace) ยี่ห้อ Vecstar furnaces รุ่น VCTF7
2. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ทำจากสแตนเลส
3. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
4. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (Rota meter) ยี่ห้อ New-flow รุ่น FBC-V-P-A-500-C
5. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ยี่ห้อ TAIE รุ่น PFY400

3.2.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

1. เครื่องเขย่าแนวราบ (Orbital shaker) ยี่ห้อ CTL รุ่น SK3
2. ตู้อบไฟฟ้า (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED115
3. ตะแกรงร่อน (Sieve) เบอร์ 10 และ เบอร์ 60
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ EYELA รุ่น A-3S
6. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel)
7. ขวดกรอง (Suction flask)
8. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
9. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
10. ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
11. กรวยแยกสาร (Separator funnel) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
12. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และ เบอร์ 5
13. กระดาษลิตมัส ยี่ห้อ MACHEREY-NAGEL pH-Fix 0-14
14. โกร่งบดสาร
15. เบ้ากระเบื้อง (Crucible) ขนาด 30 มิลลิลิตร
16. ช้อนตักสาร

3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอล

1. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี Bruneur-Emmet-Teller (BET) ยี่ห้อ Quanta-Chrome Corporation รุ่น Autosorb-1
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V530
3. เครื่องลิควิดโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 1100
4. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890A
5. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometry, XRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger

3.3 วัตถุดิบและการจัดเตรียมวัตถุดิบ

3.3.1 กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ กากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอจาก บริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด แสดงดังภาพ 3.1 ซึ่งมีการปนเปื้อนด้วยกรวด ดินและทรายขนาดเล็ก ดังภาพที่ 3.1 โดยนำมาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนต่างๆออก และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการบดและคัดขนาดด้วยกระแกรงร่อนเบอร์ 10 ให้มีขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร

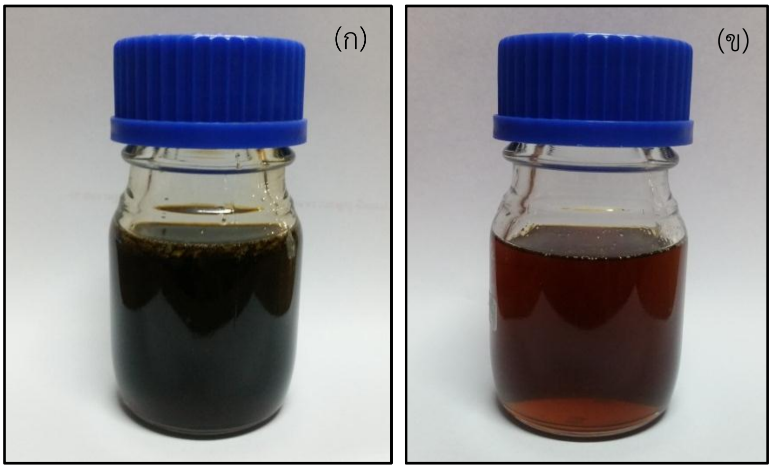
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.1 กากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

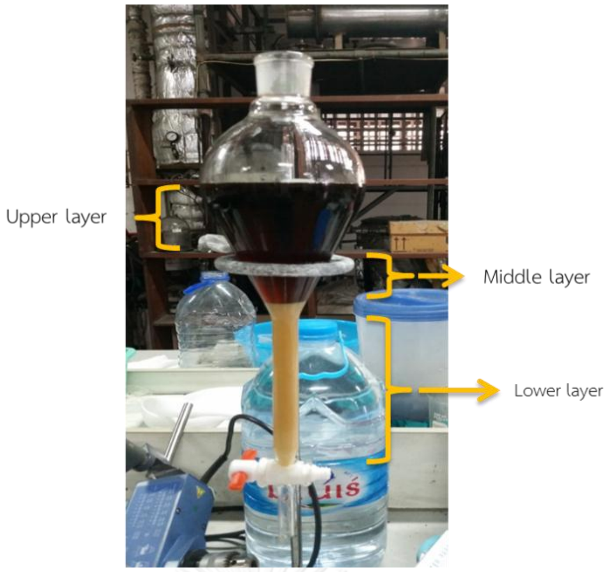
3.3.2 กลีเซอรอลดิบ

กลีเซอรอลดิบที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจาก บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) แสดงดังภาพที่ 3.2 (ก) เนื่องจากกลีเซอรอดดิบที่ได้มานั้นมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ จึงต้องทำการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลให้สูงขึ้น ก่อนนำไปใช้ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ต่อไป โดยการปรับสภาพเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบ มีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. นำกลีเซอรอลดิบ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 85 ลงไปในกลีเซอรอลดิบ ทำการปั่นกวนตลอดเวลาจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของกลีเซอรอลดิบเท่ากับ 2.5 จากนั้นทำการปั่นกวนต่อเป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง [27]
2. บรรจุกลีเซอรอลดิบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไว้ในกรวยแยกสาร ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ (ภาพที่ 3.3)
3. ทำการเทแยกสารชั้นบนและทำการกรองเกลือชั้นล่างออก จะได้สารชั้นที่มีกลีเซอรอลมาก (Glycerol-rich layer) จากนั้นนำสารชั้นที่มีกลีเซอรอลมากมาปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร
4. ทำการกรองแยกเกลือชั้นล่างออก จะได้กลีเซอรอลดิบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว (ภาพที่ 3.2 (ข))
5. วิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ (ไม่คิดรวมปริมาณน้ำ) และความเข้มสี (ภาคผนวก ก)



ภาพที่ 3.2 (ก) กลีเซอรอลดิบและ (ข) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

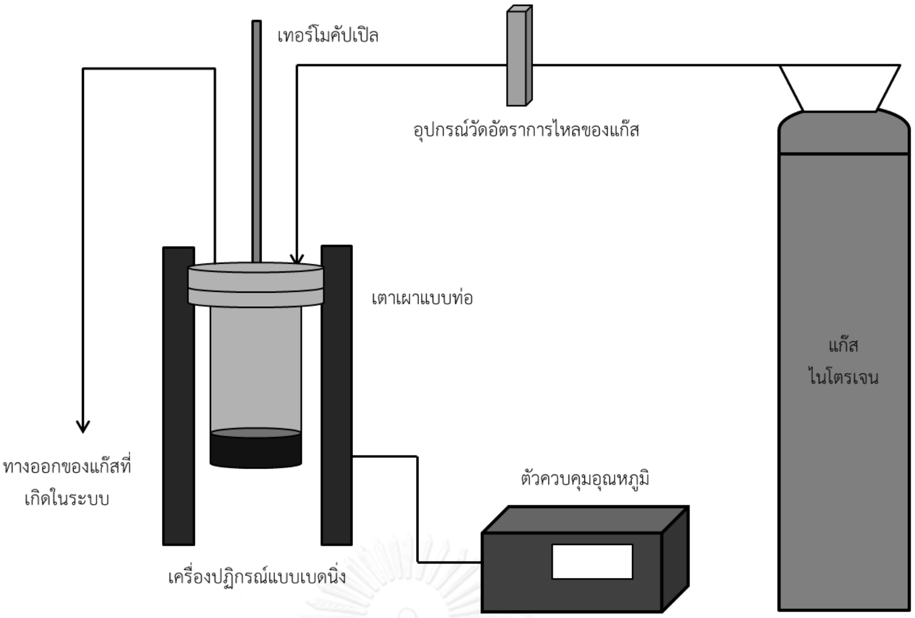


ภาพที่ 3.3 การปรับสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยกรดฟอสฟอริก

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

1. ชั่งน้ำหนักกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.1 ประมาณ 50 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ภาพที่ 3.4)
2. เพิ่มอุณหภูมิไปที่ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. นำถ่านชาร์ที่ได้ มาบดและคัดร่อนขนาดให้มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมโครเมตร ด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 60
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์แบบประมาณ เพื่อหาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว (ภาคผนวก ข)



ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการคาร์บอไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

3.4.2 การกระตุ้นถ่านชาร์

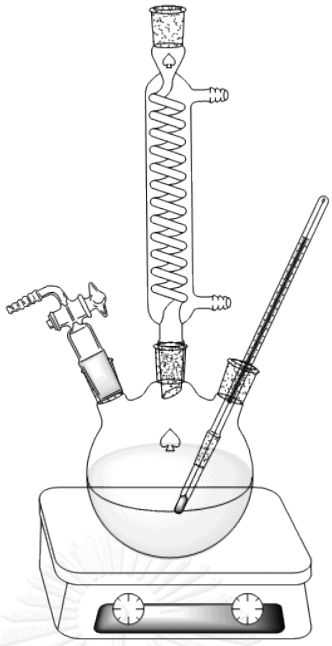
การกระตุ้นถ่านชาร์เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของถ่านชาร์ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น เพื่อทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารที่ผิวของถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีในการกระตุ้น มีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. นำถ่านชาร์ที่ได้ 10 กรัม และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 15 มิลลิลิตร จะได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านชาร์ เท่ากับ 0.5 ละลายด้วย
2. นำสารละลายผสมไปปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนจนน้ำระเหยออกไปหมด จะได้ถ่านชาร์ที่แห้ง
3. บรรจุถ่านชาร์แห้งลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ภาพที่ 3.4) เพิ่มอุณหภูมิไปที่ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
4. นำถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออนจนมีค่าความเป็นกรด-ด่างคงที่

5. กรองและอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี
6. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ค)
7. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านชาร์เป็น 0.75 1.00 1.25 และ 1.50 และทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในการกระตุ้น เป็น 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส

3.4.3 การดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์

1. นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ 5 กรัม มาดัดแปรผิวโดยการเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร
2. บรรจุสารละลายผสมในขวดสามคอ นำไปรีฟลักซ์ (ภาพที่ 3.5) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
3. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิวมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีค่าความเป็นกรด-ด่างคงที่
4. กรองแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการดัดแปรผิว
5. วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ข-ค)
6. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 6 และ 9 โมลต่อลิตร และทำการเปลี่ยนสารเคมีเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 6 และ 9 โมลต่อลิตร



ภาพที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีฟลักซ์

3.4.4 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับ

1. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2 มาเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบ ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 120 นาที
3. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มากรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากกลีเซอรอล
4. นำกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับมาวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ และความเข้มสี
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเวลาในการดูดซับเป็น 30 60 90 150 180 และ 360 นาที และอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 30 50 90 และ 110 กรัมต่อลิตร

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชาร์ในช่วง 0.5-1.5 และอุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 500-900 องศาเซลเซียส ศึกษาการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมี 2 ชนิดได้แก่ กรดไนตริก (HNO_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์กับกลีเซอรอลดิบปรับสภาพและเวลาในการดูดซับ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

4.1.1 สมบัติของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ พบว่ากากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะมีความชื้นร้อยละ 6.36 เถ้าร้อยละ 15.96 สารระเหยได้ร้อยละ 60.11 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 17.57 เมื่อนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียไปผ่านการคาร์บอไนซ์เป็นถ่านชาร์พบว่าสัดส่วนความชื้นและปริมาณสารระเหยจะลดลง 2.5 และ 3.8 เท่า ตามลำดับ แต่สัดส่วนเถ้าและคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น 2.5 และ 2.4 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอไนซ์จะทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ในกากตะกอนเกิดการสลายตัวทำให้สัดส่วนของเถ้าและคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น โดยให้ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์เท่ากับร้อยละ 36

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแยกธาตุของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ได้จากการคาร์บอไนซ์ พบว่าถ่านชาร์ที่ผ่านการคาร์บอไนซ์จะมีปริมาณออกซิเจนลดลงประมาณ 7.58 เท่าเมื่อเทียบกับกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้สัดส่วนของธาตุอื่นๆ ในถ่านชาร์เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนในองค์ประกอบธาตุอาจเกิดจากเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากการสูญเสียของน้ำที่อยู่ในผลึกของถ่านชาร์ [28]

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบโดยประมาณของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์

การวิเคราะห์โดยประมาณ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย	ถ่านชาร์
ความชื้น	6.36 ± 0.22	2.56 ± 0.25
เถ้า	15.96 ± 0.01	37.83 ± 0.17
สารระเหยได้	60.11 ± 0.20	15.89 ± 0.34
คาร์บอนคงตัว	17.57 ± 0.03	43.42 ± 0.42

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์

การวิเคราะห์แยกธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย	ถ่านชาร์
คาร์บอน (C)	46.05	47.04
ไฮโดรเจน (H)	7.09	1.95
ไนโตรเจน (N)	7.02	6.46
ออกซิเจน (O)*	22.28	2.94
ซัลเฟอร์ (S)	2.03	1.80
ซิลิกอน (Si)	3.96	8.72
โซเดียม (Na)	2.03	6.43
แคลเซียม (Ca)	1.93	4.96
ฟอสฟอรัส (P)	1.72	4.83
เหล็ก (Fe)	2.03	4.74
อะลูมิเนียม (Al)	1.69	4.29
โพแทสเซียม (K)	0.82	2.29
คลอไรด์ (Cl)	0.63	1.62
แมกนีเซียม (Mg)	0.55	1.51
ทองแดง (Cu)	0.15	0.43

* ออกซิเจนคิดจากผลต่างของธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

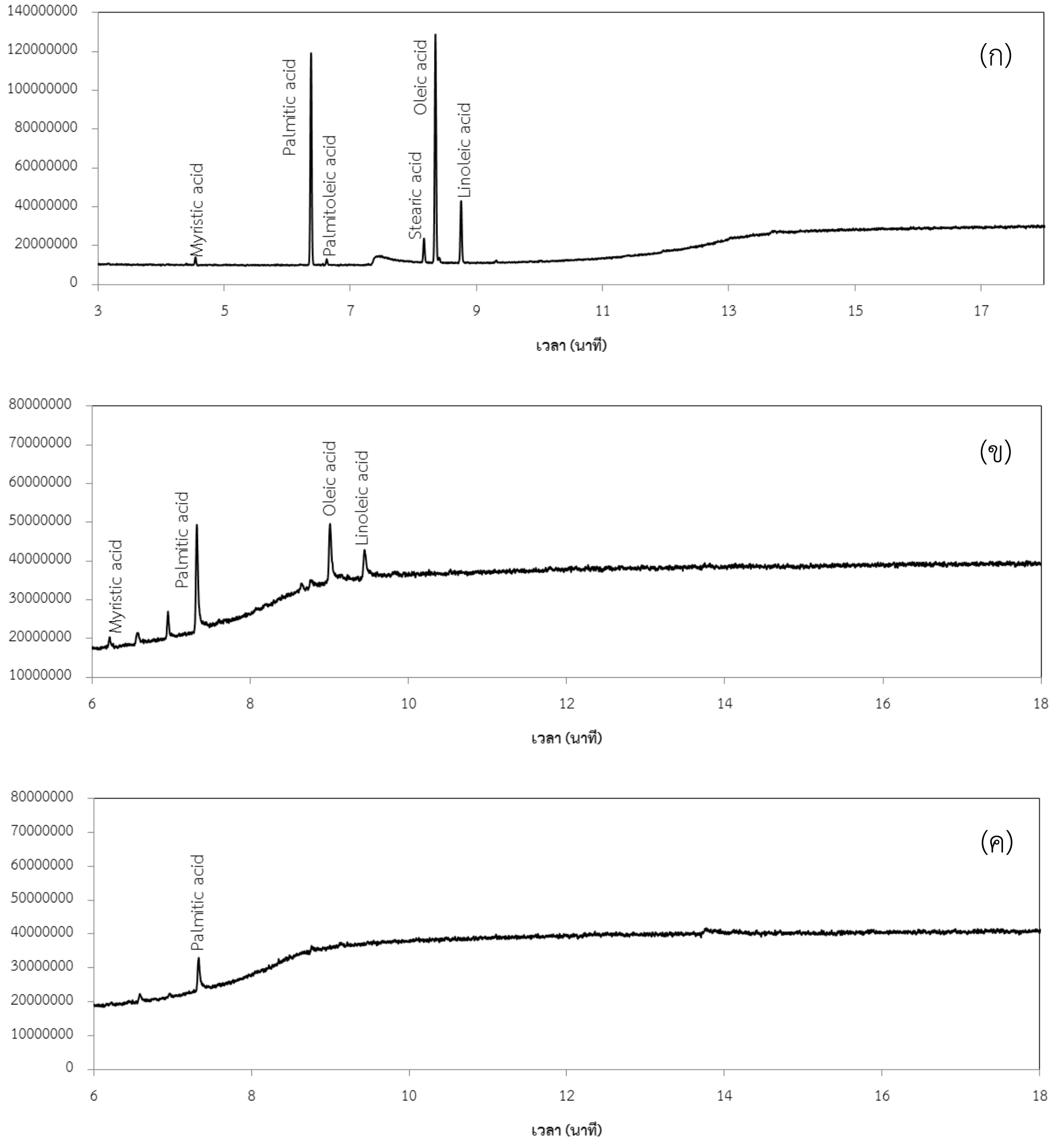
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที

องค์ประกอบ	กลีเซอรอลดิบ	กลีเซอรอลดิบปรับสภาพ	กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วย		
			ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์	ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิว
กลีเซอรอล (ร้อยละ)	38.25 ± 0.26	80.87 ± 0.22	91.41 ± 0.22	93.28 ± 1.17	93.33 ± 0.07
เถ้า (ร้อยละ)	2.67 ± 0.16	5.52 ± 0.01	6.62 ± 0.03	6.48 ± 0.02	6.55 ± 0.14
สารปนเปื้อน (ร้อยละ)	59.09 ± 0.42	13.61 ± 0.23	1.97 ± 0.25	0.24 ± 0.11	0.12 ± 0.09
สี (หน่วย Pt-Co)	33696 ± 715	9441 ± 178	2792 ± 87	1780 ± 353	3860 ± 59
ความเป็นกรด-ด่าง	10	7	7	7	7

4.1.2 สมบัติของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

กลีเซอรอลดิบเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีลักษณะกายภาพเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำ (ภาพที่ 3.2 (ก)) มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำและมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงประมาณ 10 (ตารางที่ 4.3) เมื่อนำกลีเซอรอลดิบไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี พบว่ากลีเซอรอลดิบจะประกอบด้วยกรดไขมันอิสระเป็นจำนวนมาก เช่น Myristic acid, Palmitic acid, Palmitoleic acid, Stearic acid, Oleic acid และ Linoleic acid (ภาพที่ 4.1 (ก)) เมื่อนำกลีเซอรอลดิบไปปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกรดฟอสฟอริกพบว่าสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพมีสีอ่อนลงจากเดิม (ภาพที่ 3.2 (ข)) ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเพิ่มขึ้น 2.11 เท่า และมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง (ตารางที่ 4.3) เมื่อนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี พบว่ากลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะประกอบด้วยเหลือกรดไขมันอิสระเพียง Myristic acid, Palmitic acid,

Oleic acid และ Linoleic acid (ภาพที่ 4.1 (ข)) ซึ่งกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ได้ยังคงมีความบริสุทธิ์ต่ำ จึงต้องมีการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของ (ก) กลีเซอรอลดิบ (ข) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพและ (ค) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพหลังผ่านกระบวนการดูดซับ

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะดำเนินการโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 0.5 เป็น 1.5 ทำให้สัดส่วนของความชื้น เถ้าและสารระเหยได้ลดลงส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารกระตุ้นชนิดเบสสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ทำให้อินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์หลุดออกหรือสลายตัวไปซึ่งเป็นการเพิ่มโครงสร้างรูพรุนให้กับถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์

อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว
0.50	0.67 ± 0.11	17.11 ± 0.20	12.54 ± 0.12	69.66 ± 0.21
0.75	0.93 ± 0.34	17.82 ± 0.14	10.99 ± 0.01	70.24 ± 0.47
1.00	0.86 ± 0.04	17.73 ± 0.09	11.02 ± 0.06	70.37 ± 0.11
1.25	0.24 ± 0.12	15.50 ± 0.01	9.80 ± 0.37	74.45 ± 0.23
1.50	0.65 ± 0.13	15.53 ± 0.12	8.41 ± 0.42	75.39 ± 0.17

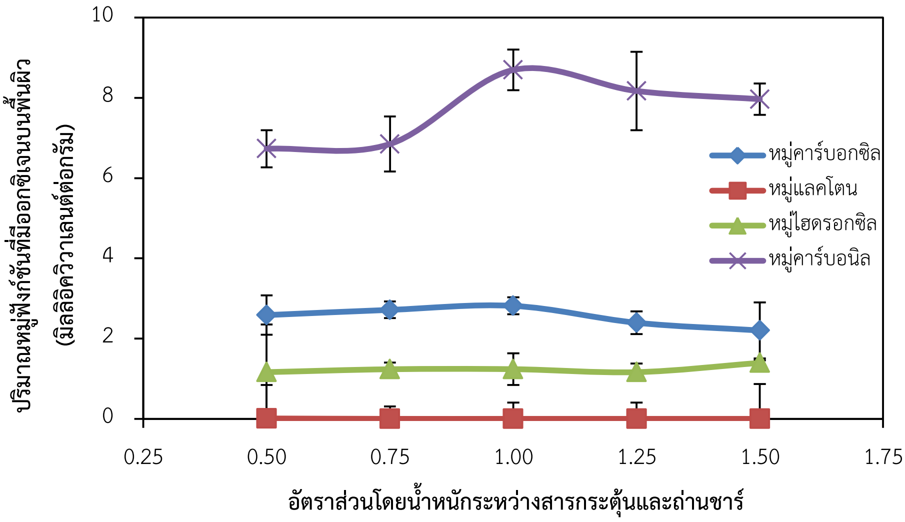
ภาพที่ 4.2 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 พบว่าหมู่คาร์บอนิลจะมีปริมาณมากกว่าหมู่อื่นๆ เนื่องจากสารที่ใช้กระตุ้นคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบส ซึ่งมีความสามารถในการเพิ่มปริมาณหมู่คาร์บอนิลซึ่งเป็นหมู่เบสบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากกว่าหมู่อื่นๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 0.5

เป็น 1.0 พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่เป็นหมู่เบส การเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสจึงเพิ่มปริมาณหมู่เบสบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ภาพที่ 4.3-4.4 แสดงผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.5 เนื่องจากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน คือ เมื่อกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำดังปฏิกิริยา (4.1) น้ำที่ได้จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับคาร์บอนดังปฏิกิริยา (4.2) เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำดังปฏิกิริยา (4.3) ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน และระเหยออกจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [29] ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

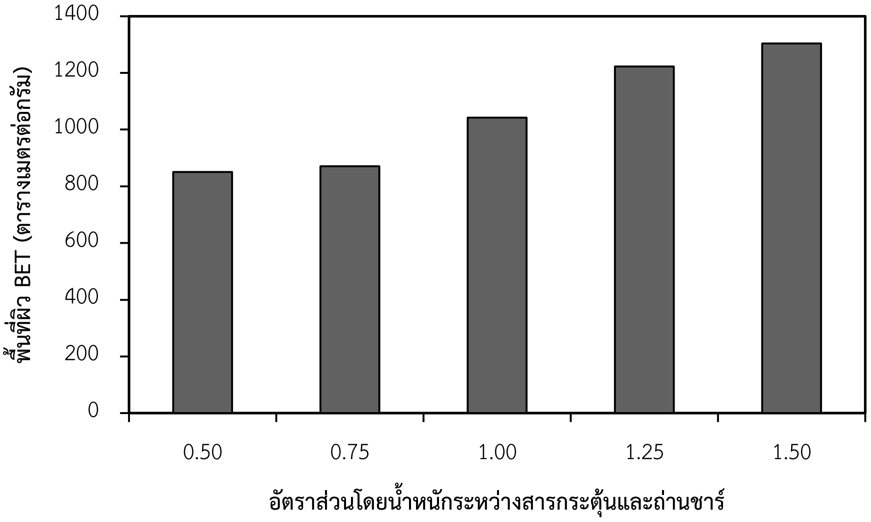
$$2KOH \xrightarrow{\triangle} K_2O + H_2O \quad \text{(ปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ)} \qquad (4.1)$$

$$C + H_2O \xrightarrow{\triangle} H_2 + CO \quad \text{(ปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน)} \qquad (4.2)$$

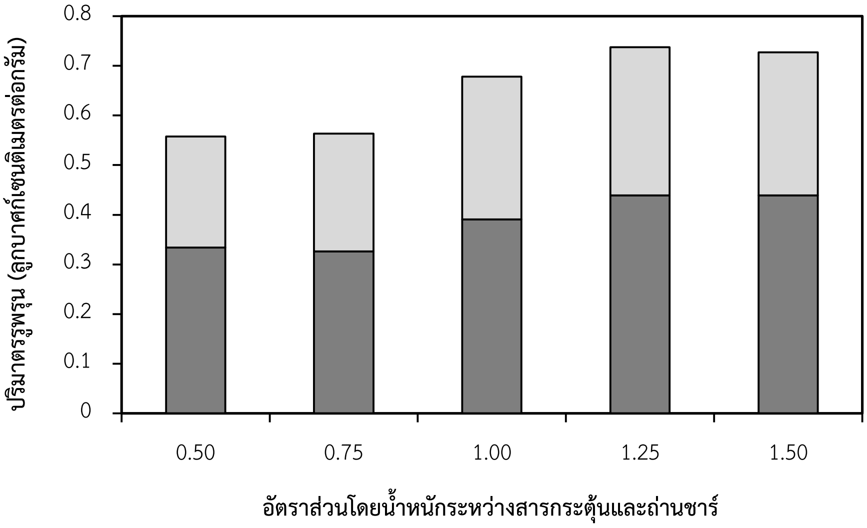
$$CO + H_2O \xrightarrow{\triangle} H_2 + CO_2 \quad \text{(ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิพ)} \qquad (4.3)$$



ภาพที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

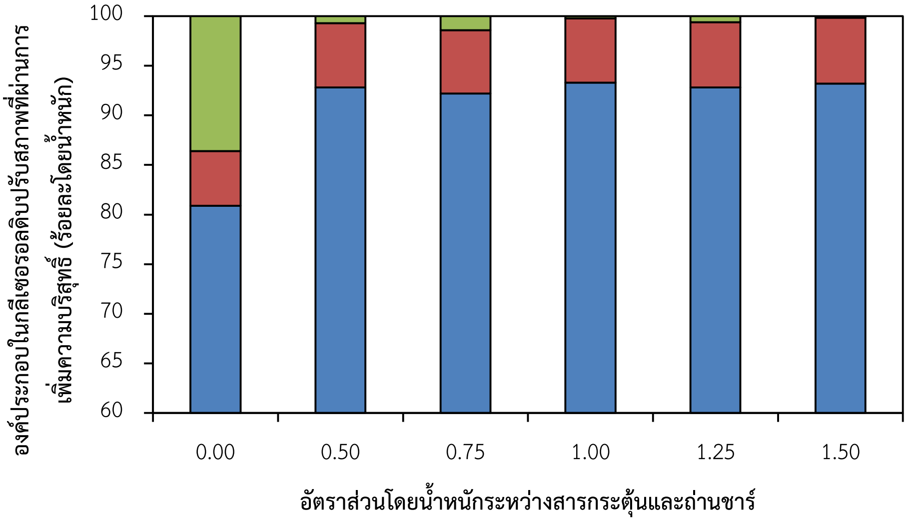


ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

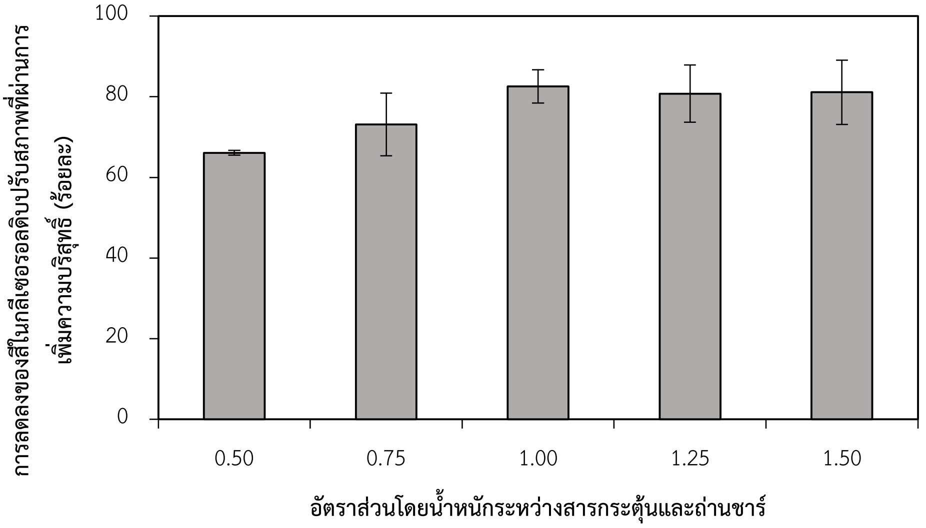


ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์

ภาพที่ 4.5 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลได้เมื่อเทียบกับกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ในช่วงที่ศึกษาส่งผลต่อการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลเล็กน้อยแต่ส่งผลทำให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.6) โดยถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์ที่ 1.00 จะทำให้เกิดการลดลงของความเข้มสีสูงสุด เนื่องจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนผิวถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 4.3) โดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลซึ่งเป็นหมู่เบสและมีสภาพผิวเป็นบวกจึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดสีโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระที่มีสมบัติทางประจุเป็นลบได้ ทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพลดลง ความเข้มสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจึงลดลง [30]



ภาพที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

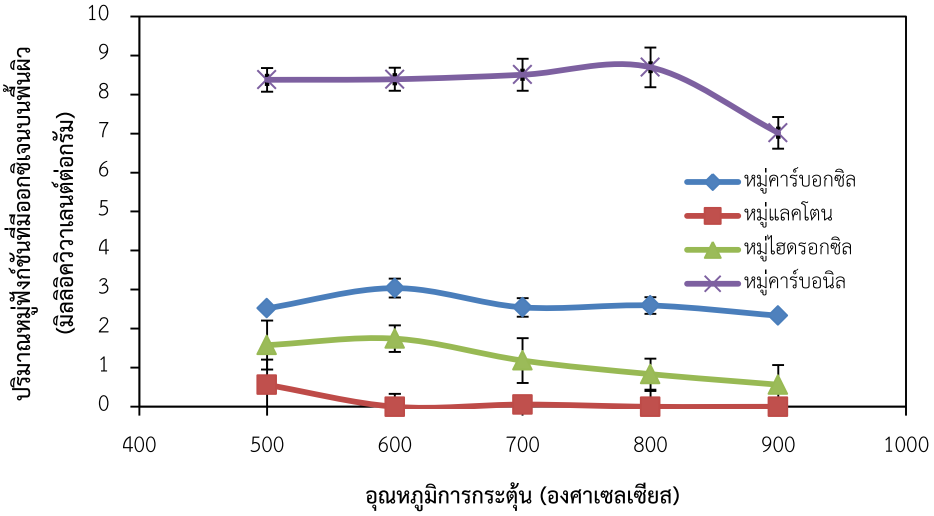
4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้น

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เป็น 1.0 ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าประมาณร้อยละ 40 การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นในช่วงดังกล่าวทำให้ปริมาณสารระเหยได้ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีพันธะไม่แข็งแรงหรืออาจทำให้โมเลกุลวงแหวนแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กๆ และหลุดออกจากโครงสร้างในรูปของสารระเหยได้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวจึงเพิ่มขึ้น [13]

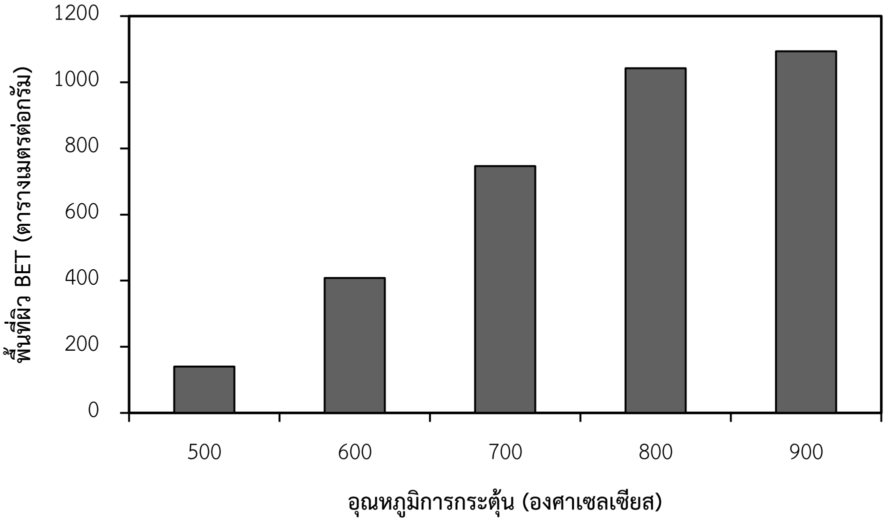
ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์

อุณหภูมิการกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว
500	0.54 ± 0.44	14.88 ± 0.14	26.28 ± 0.01	58.28 ± 0.28
600	0.59 ± 0.09	10.94 ± 0.06	18.74 ± 0.12	69.71 ± 0.18
700	0.54 ± 0.09	14.64 ± 0.02	13.82 ± 0.09	70.98 ± 0.02
800	0.65 ± 0.13	15.53 ± 0.12	8.41 ± 0.42	75.39 ± 0.17
900	0.61 ± 0.03	17.06 ± 0.07	7.43 ± 0.91	74.88 ± 0.18

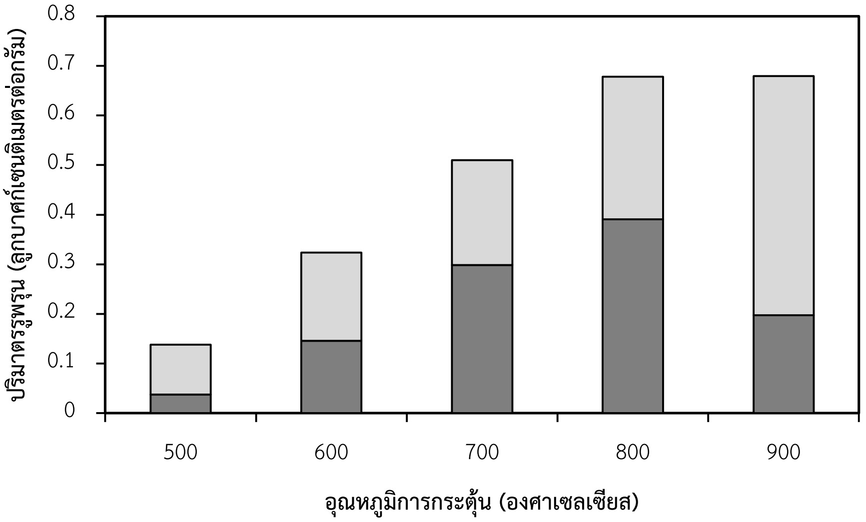
ภาพที่ 4.7 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นจาก 600 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นเป็น 900 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิล คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง [31] ภาพที่ 4.8-4.9 แสดงผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเร่งให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกิดการสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำดังปฏิกิริยา (4.1) และน้ำที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับคาร์บอนดังปฏิกิริยา (4.2) เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำดังปฏิกิริยา (4.3) ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน และระเหยออกจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [29] ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นจาก 800 เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากผนังรูพรุนแบบไมโครพอร์จะเกิดการพังทลาย ทำให้รูพรุนแบบไมโครพอร์ขยายตัวเป็นรูพรุนแบบเมโซพอร์มากขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



ภาพที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

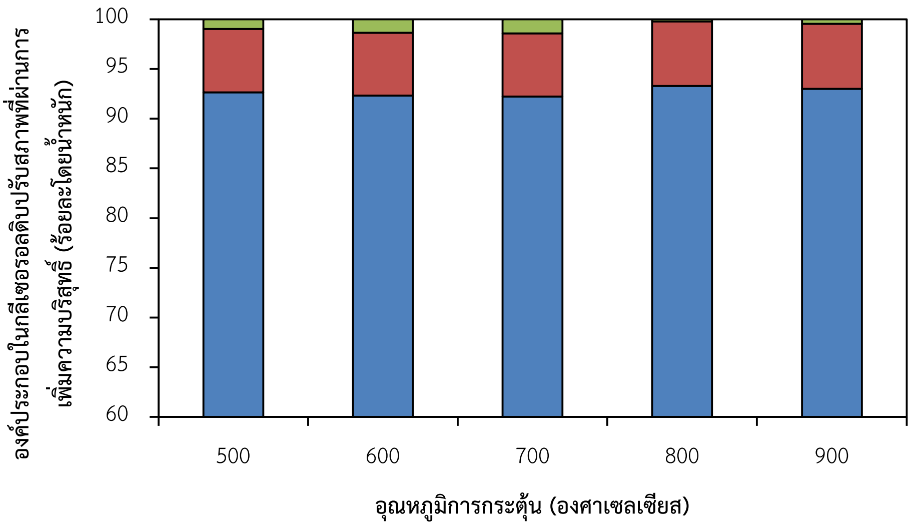


ภาพที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

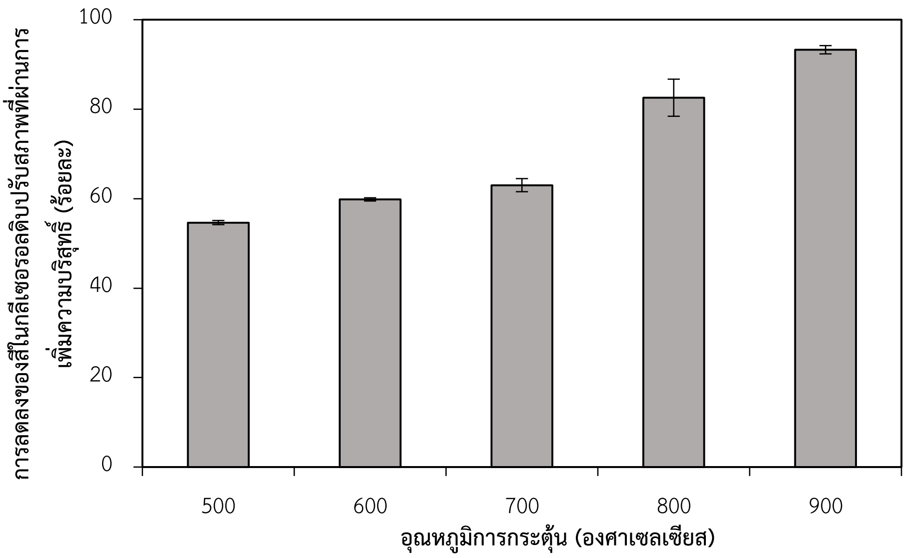


ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์

ภาพที่ 4.10 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นส่งผลต่อการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลเล็กน้อยแต่ส่งผลทำให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.11) เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น (ภาพที่ 4.8-4.9) จึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนต่างๆ ซึ่งเป็นต้นเหตุของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ส่งผลให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 900 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการลดลงของความเข้มสีสูงสุด



ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

4.3 ผลของการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์

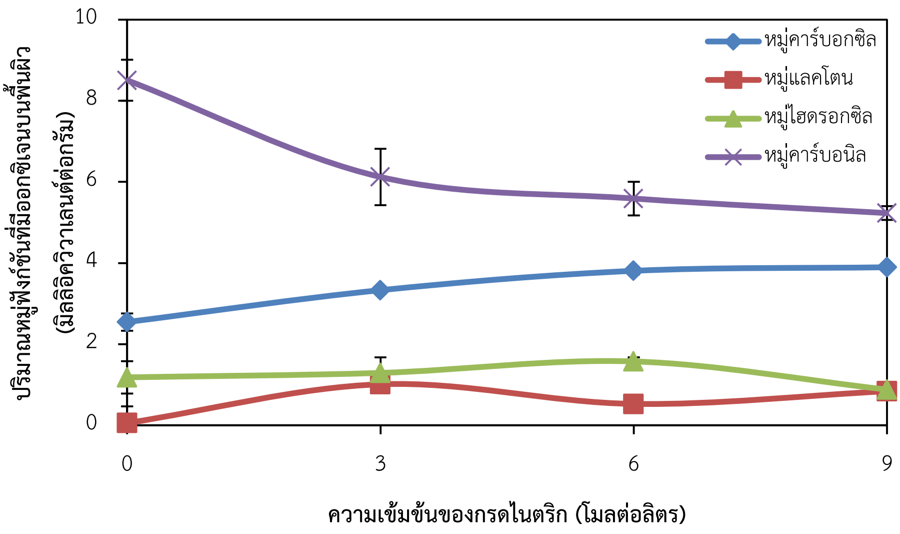
การศึกษาผลของการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ต่อสมบัติและความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะดำเนินการโดยใช้กรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 6 และ 9 โมลต่อลิตร โดยการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง [32]

4.3.1 ผลของการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก

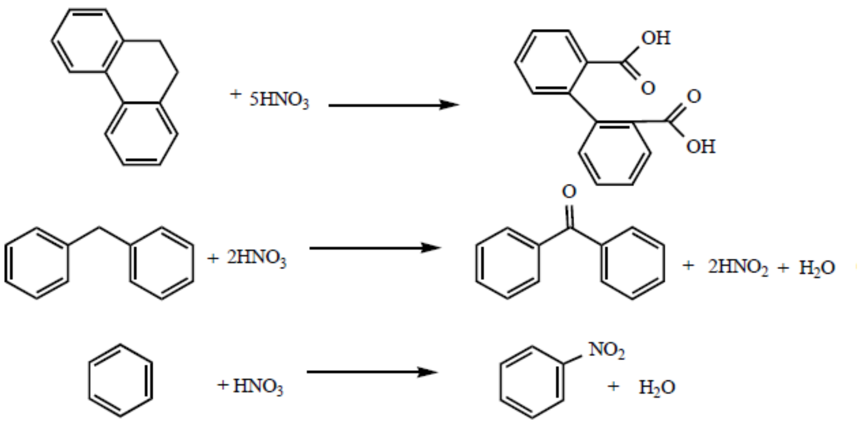
ภาพที่ 4.12 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริก พบว่าการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริกจะทำให้มีปริมาณของหมู่ออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นหมู่กรดคือหมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นตามกลไลการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดไนตริก (ภาพที่ 4.13) เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิว แต่ปริมาณของหมู่เบส ได้แก่ หมู่คาร์บอนิล มีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริก เนื่องจากความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้นจะไปทำลายปริมาณหมู่เบสที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ภาพที่ 4.14-4.15 แสดงผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกจาก 3 ถึง 9 โมลต่อลิตร ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าลดลง เนื่องจากกรดไนตริกที่มีความเข้มข้นมากเกินไปจะเข้าไปทำลายรูพรุนแบบไมโครพอร์และแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และแบบเมโซพอร์ลดลงส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงตามไปด้วย

ภาพที่ 4.16 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 3 ถึง 9 โมลต่อลิตร พบว่าการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร จะทำให้สัดส่วนกลีเซอรอลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิว เนื่องจากกรดไนตริกเข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกจะทำให้ปริมาณกลีเซอรอลลดลงได้ เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไนตริกที่มากเกินไป จะเข้าไปทำลายรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงตามไปด้วยจึงทำการดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้น้อยตามไปด้วย ภาพที่ 4.17 แสดงผลของการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริกต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าร้อยละของการลดสีจะลดลงเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกจะทำให้ร้อยละ

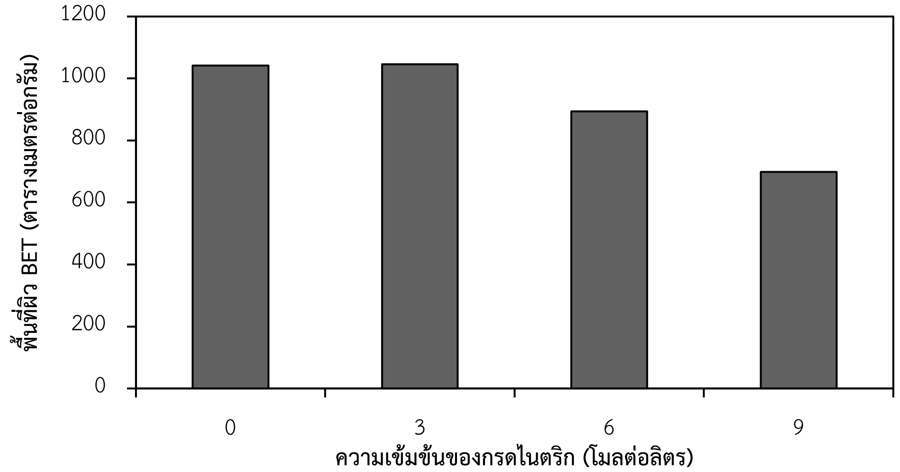
ของการลดสีลดลงตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกทำให้ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง ยังส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้มีปริมาณหมู่กรดมากขึ้น ซึ่งหมู่ดังกล่าวเป็นหมู่กรดและมีสภาพผิวเป็นลบจึงไม่สามารถดูดซับสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดสีโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระที่มีสมบัติทางประจุเป็นลบได้



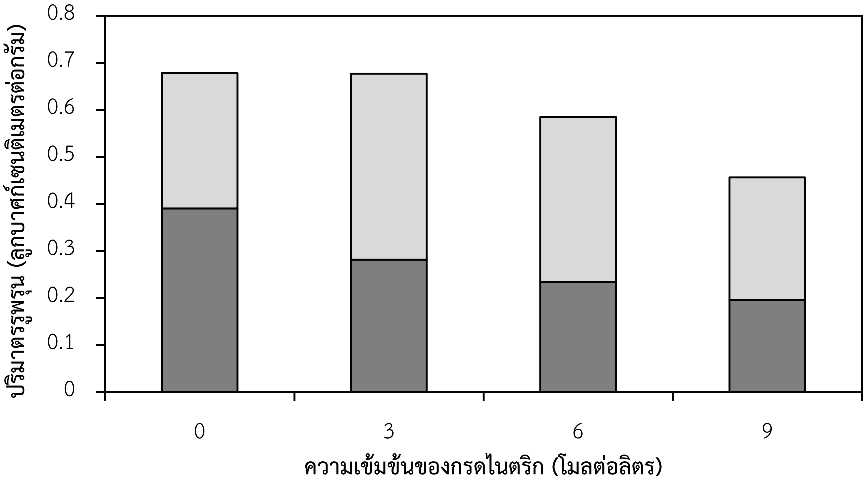
ภาพที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



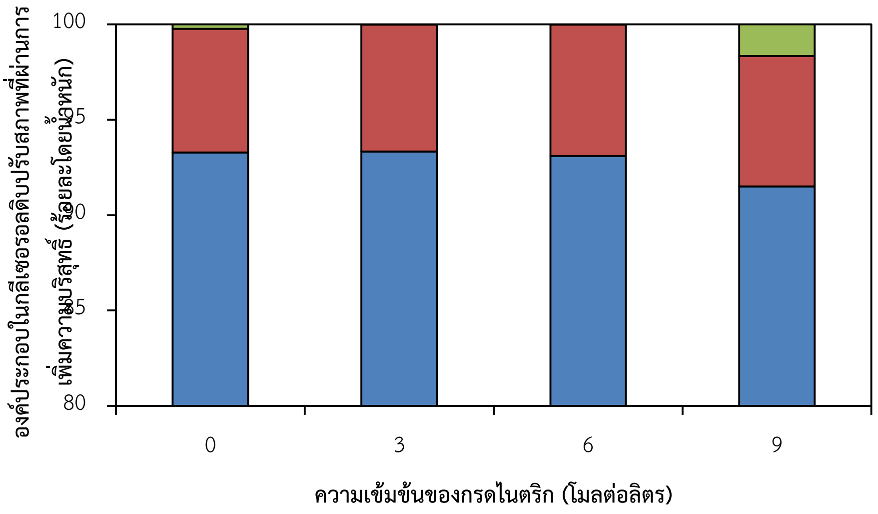
ภาพที่ 4.13 กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดไนตริก [33]



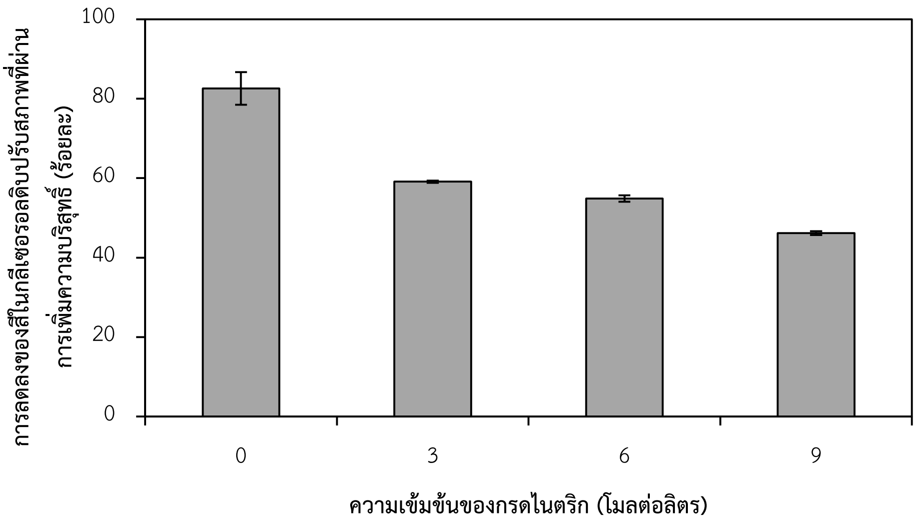
ภาพที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์



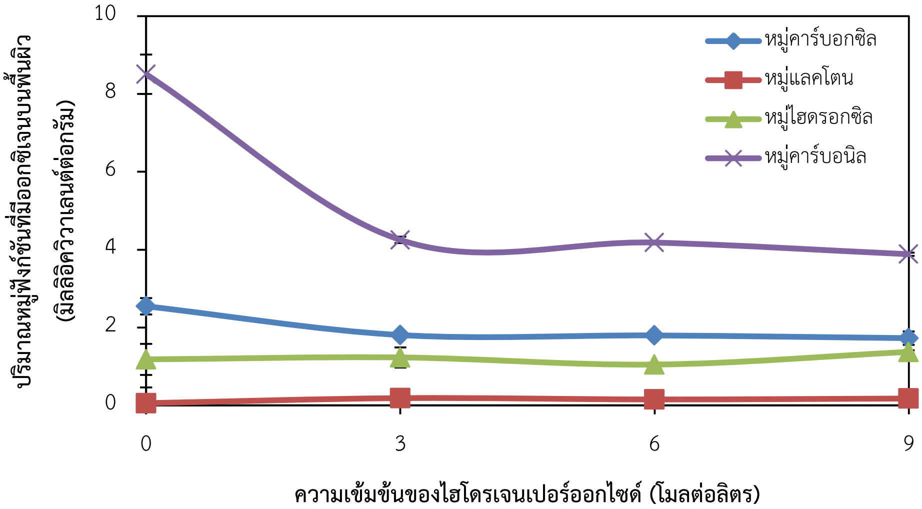
ภาพที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที



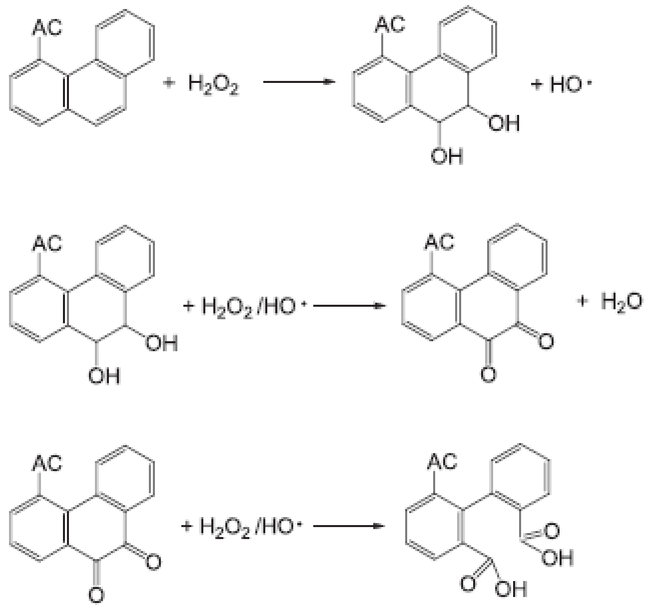
ภาพที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกกรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

4.3.2 ผลของการดัดแปรผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

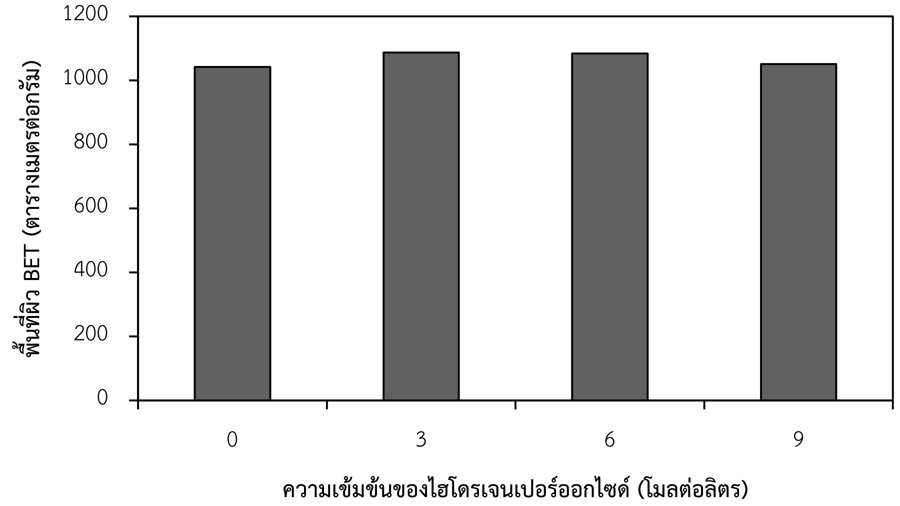
ภาพที่ 4.18 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ทั้งปริมาณหมู่กรดและหมู่เบสลดลงทั้งคู่ เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อาจจะทำปฏิกิริยากันเองได้เป็นน้ำหรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งน้ำหรือไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล (ภาพที่ 4.19) ทำให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง ภาพที่ 4.20-4.21 แสดงผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 3 ถึง 9 โมลต่อลิตร ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรผิว เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนจึงไม่สามารถทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มาก



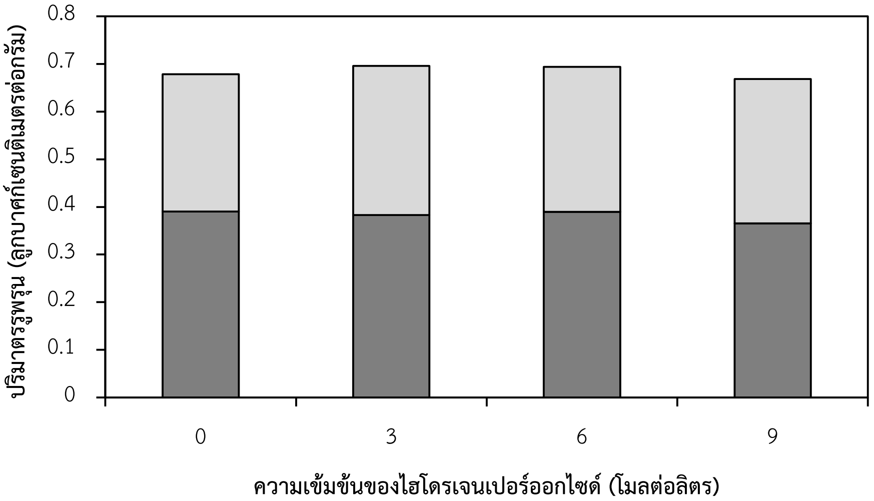
ภาพที่ 4.18 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 4.19 กลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [33]

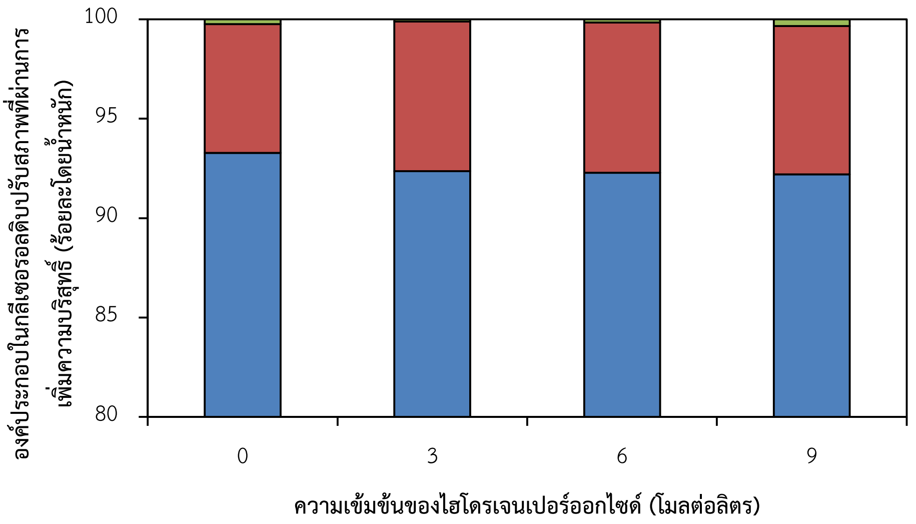


ภาพที่ 4.20 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

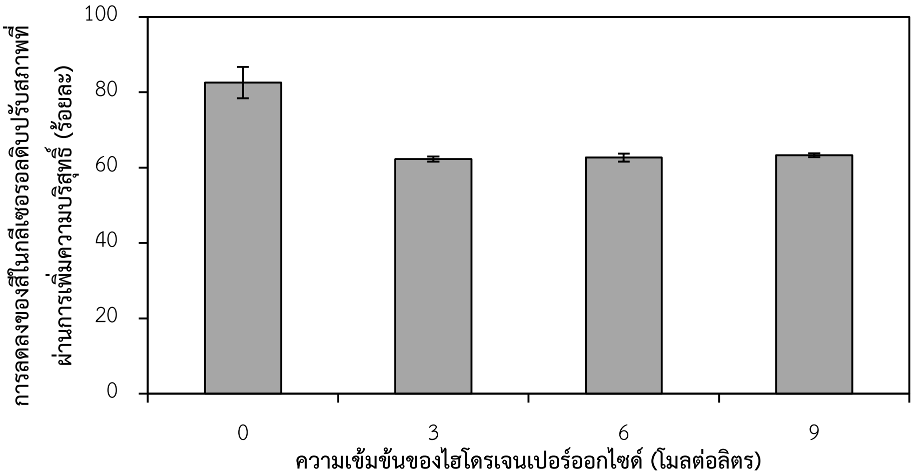


ภาพที่ 4.21 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์และ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์

ภาพที่ 4.22 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 ถึง 9 โมลต่อลิตร พบว่าการดัดแปรผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้น้อยมาก ภาพที่ 4.23 แสดงผลของการดัดแปรผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าร้อยละการลดสีลดลงเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ผ่านการดัดแปรผิว การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ เนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงที่ศึกษาไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว ปริมาตรรูพรุนและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.22 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4.23 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

4.4 ผลของภาวะในการดูดซับ

การศึกษาผลของภาวะในการดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และการลดลงของสีจะดำเนินการที่ เวลาของการดูดซับที่ 1 2 3 และ 6 ชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ 30 50 70 90 และ 110 กรัมต่อลิตร โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ผ่านการดัดแปรผิวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1 อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากการศึกษาขั้นต้นพบว่าผลของการดัดแปรผิวและไม่ดัดแปรผิวให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.4.1 ผลของเวลาในการดูดซับ

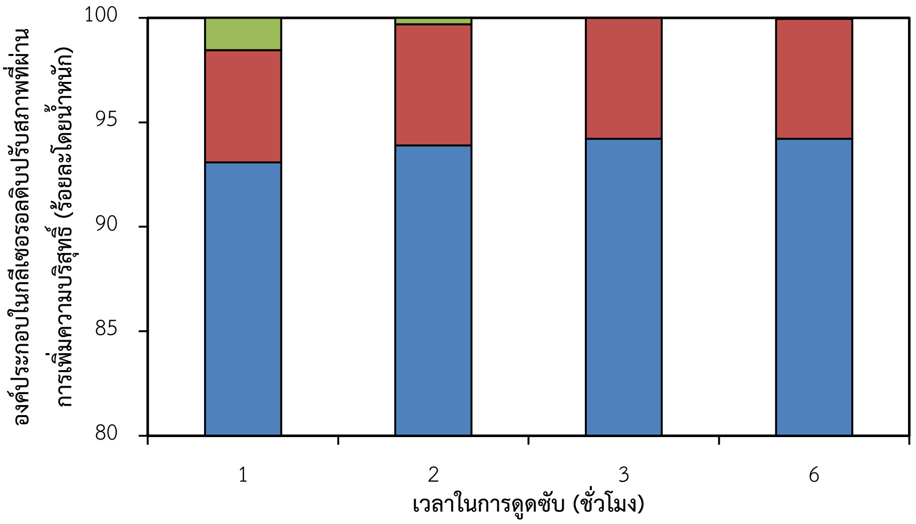
ภาพที่ 4.24 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาในการดูดซับ 1 ถึง 6 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ 70 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 3 ชั่วโมง สัดส่วนของสารปนเปื้อนจะลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 93.07 เป็นร้อยละ 94.22 เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการดูดซับให้มากขึ้นทำให้โมเลกุลของสารปนเปื้อนมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้นานขึ้น และถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาการดูดซับจาก 3 ถึง 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณกลีเซอรอลจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากถึงจุดอิ่มตัวของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนแล้ว ภาพที่ 4.25 แสดงผลของเวลาในการดูดซับต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจะทำให้ร้อยละของการลดลงของสีเพิ่มมากขึ้น

4.4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพในการดูดซับ

ภาพที่ 4.26 แสดงปริมาณกลีเซอรอล เถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ 30 ถึง 110 กรัมต่อลิตร ที่เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจาก 30 ถึง 90 กรัมต่อลิตร สัดส่วนของสารปนเปื้อนจะลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 92.65 เป็นร้อยละ 94.11 เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพให้มากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสารปนเปื้อนมากขึ้น จึงดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจาก 90 ถึง 110 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณ

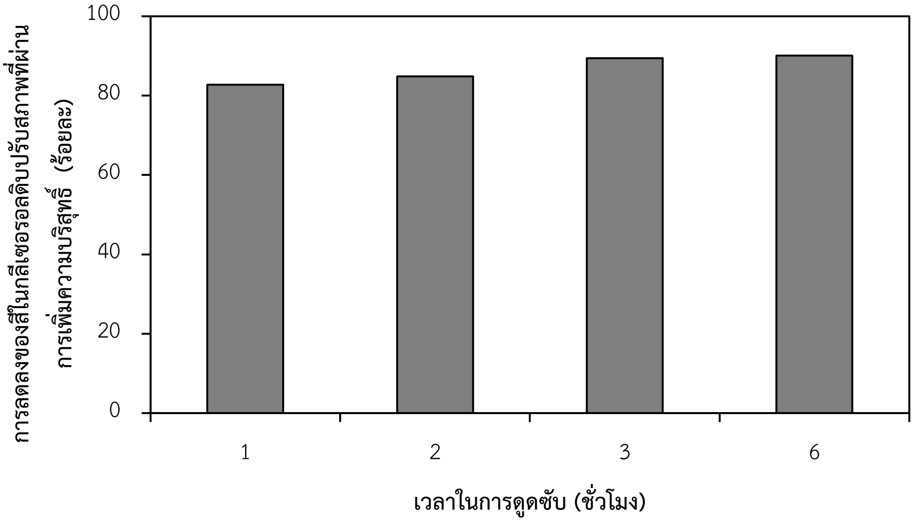
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กลีเซอรอลลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสัดส่วนของถ่านกัมมันต์ที่มากเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนของถ่านกัมมันต์เอง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารปนเปื้อนลดน้อยลง [34] ภาพที่ 4.27 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะส่งผลทำให้ร้อยละของการลดลงของสีเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ 110 กรัมต่อลิตร จะให้ร้อยละการลดสีมากถึงร้อยละ 89.93

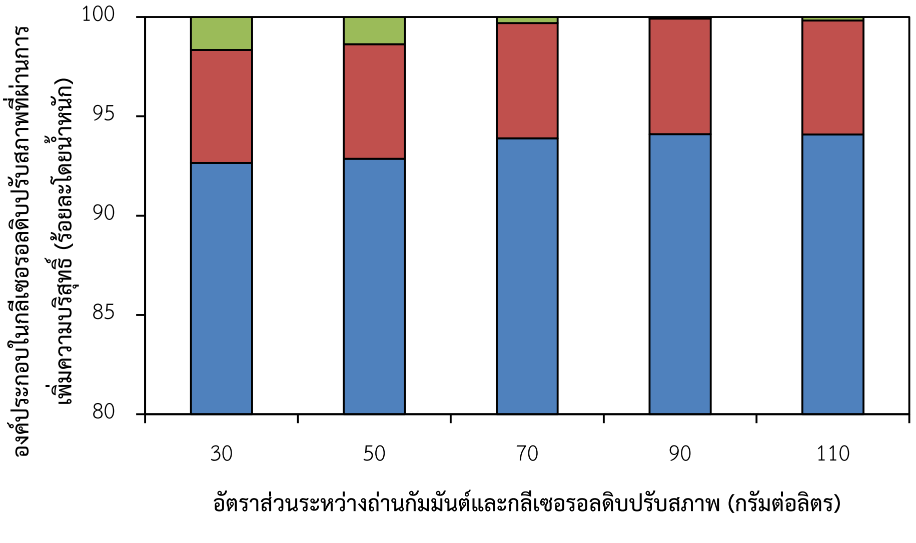


ภาพที่ 4.24 ผลของเวลาในการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน

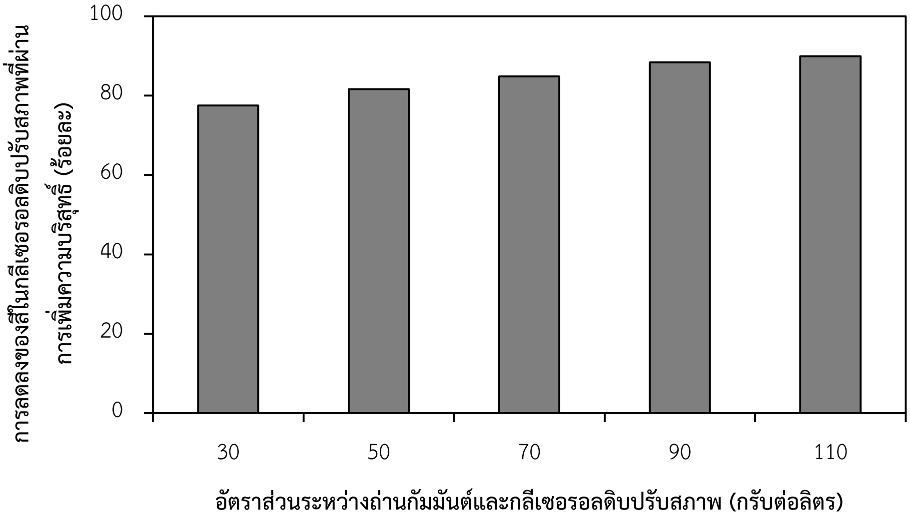
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.25 ผลของเวลาในการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์



ภาพที่ 4.26 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (■) กลีเซอรอล (■) เถ้าและ (■) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.27 ผลของอัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที ต่อการลดลงของสีในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิว และถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยสมบัติของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดอรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 1.0 อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรอลจากร้อยละ 80.87 เป็นร้อยละ 93.28 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ 1.02 เท่า โดยผลได้ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มีประมาณร้อยละ 50

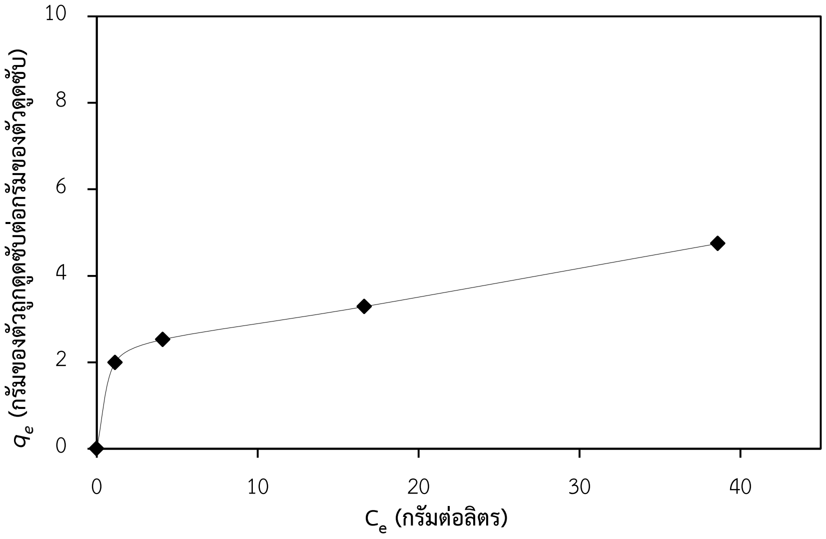
ตารางที่ 4.6 สมบัติของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

สมบัติ	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิว (มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อกรัม)			
		หมู่คาร์บอกซิล	หมู่แลคโตน	หมู่ไฮดรอกซิล	หมู่คาร์บอนิล
ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์	1152	1.45±0.12	0.28±0.05	0.90±0.07	7.16±0.08

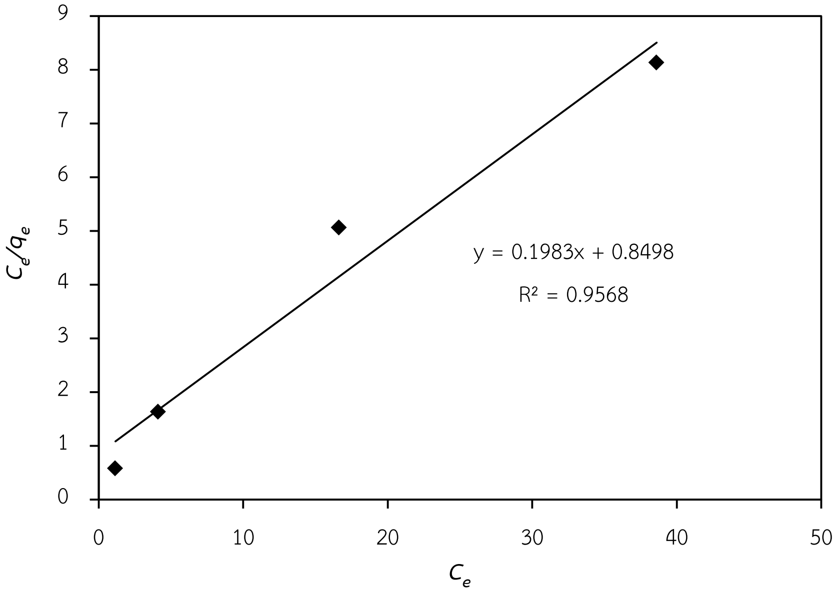
4.5 ไอโซเทิร์มของการดูดซับของถ่านกัมมันต์

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับและปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ไอโซเทิร์มที่นิยมใช้อธิบายการดูดซับมี 2 ชนิด คือ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

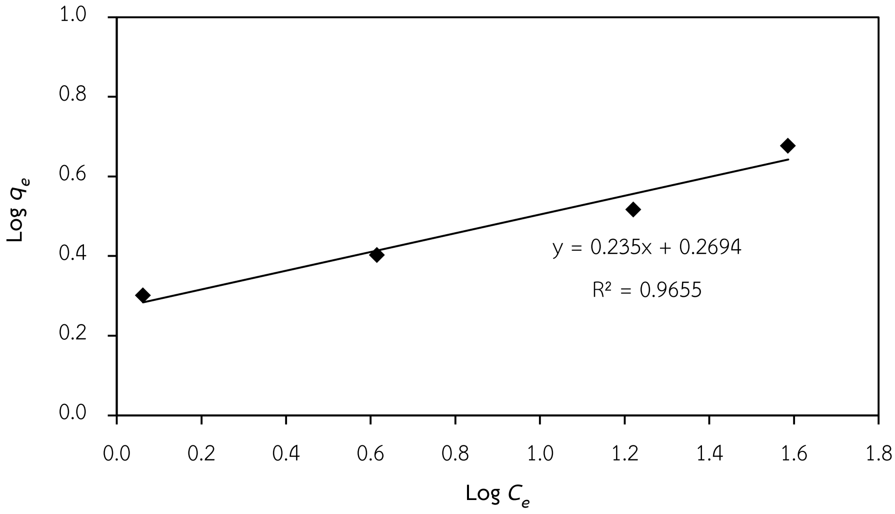
ภาพที่ 4.28 แสดงปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง ภาพที่ 4.29 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ พบว่าปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9568 ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้สูงสุด (q_0) เท่ากับ 1.17 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (k_L) เท่ากับ 4.28 ลิตรต่อมิลลิกรัม ส่วนภาพที่ 4.30 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช พบว่าปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9655 ค่า n ของการดูดซับปริมาณสารปนเปื้อนเท่ากับ 4.25 และค่าคงที่ของการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (k_F) เท่ากับ 1.85 ลิตรต่อมิลลิกรัม เมื่อทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์และฟรุนด์ลิช (ตารางที่ 4.6) พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทิร์มแบบฟรุนด์ลิชมีค่ามากกว่าแบบแลงเมียร์ แสดงว่ารูปแบบการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเป็นการดูดซับบนพื้นผิวแบบหลายชั้นและมีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอของความร้อนในการดูดซับบนพื้นผิวที่เกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้น



ภาพที่ 4.28 สมดุลของการดูดซับ



ภาพที่ 4.29 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์



ภาพที่ 4.30 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟรุนด์ลิชของการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

ตัวแปรที่ศึกษา	ค่าคงที่แลงเมียร์			ค่าคงที่ฟรุนด์ลิช		
	q_0	k_L	R^2	k_F	n	R^2
สารปนเปื้อน	1.17	4.28	0.9568	1.85	4.25	0.9655

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมและการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์ โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชาร์เท่ากับ 1.00 อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1,042 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.6783 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ถึงร้อยละ 93.28 ที่ภาวะในการดูดซับที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 70 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที และเมื่อทำการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยการรีฟลักซ์ในกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 3.0-9.0 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญ ไอโซเทิร์มการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเป็นแบบฟรุนด์ลิช ซึ่งแสดงเข้ารูปแบบการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเป็นการดูดซับบนพื้นผิวแบบหลายชั้นและมีการกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอของความร้อนในการดูดซับบนพื้นผิวที่เกิดจากการดูดซับแบบหลายชั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นแบบอื่นๆ เช่น ไอน้ำหรือแก๊สคาร์บอไดออกไซด์
- ควรศึกษาการดัดแปรผิวถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น คลื่นไมโครเวฟหรือพลาสม่า
- ควรศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับแล้ว

รายการอ้างอิง

1. Tan, H.W., A.R. Abdul Aziz, and M.K. Aroua, *Glycerol production and its applications as a raw material: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 27: p. 118-127.
2. Quispe, C.A.G., C.J.R. Coronado, and J.A. Carvalho Jr, *Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 27: p. 475-493.
3. Wikipedia. *Glycerol*. 2010; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/ Glycerol.
4. กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกลีเซอรีนบริสุทธิ์. Vol. 3187. 2547.
5. ณัฐกานต์ บุศรพงษ์พานิช และ ณรงค์ฤทธิ์ คงอยู่, การทำกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์. 2548, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. ChinA-ogpe. *Film-type evaporator*. 2016; Available from: http://www.china-ogpe.com/buyingguide_content/Film_type_evaporator_1306.html.
7. Wan Isahak, W.N.R., et al., *Recovery and Purification of Crude Glycerol from Vegetable Oil Transesterification.* Separation & Purification Reviews, 2014. 44(3): p. 250-267.
8. เจือจันทน์ เกตษา, ผลของอุณหภูมิคาร์บอไนเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. 2556, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
9. Myoung-Jun, K. and C. Gyu-Hoon, *Study on the PV Driven Dehumidifying System with Oyster Shell and Thermoelectric Device.* Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2012. 18(3): p. 287-293.
10. White, R.J., *CHAPTER 1 The Search for Functional Porous Carbons from Sustainable Precursors*, in *Porous Carbon Materials from Sustainable Precursors*. 2015, The Royal Society of Chemistry. p. 3-49.
11. นพิดา หิญชีระนันทน์ และ ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. 2556, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

12. MicrotracBel. *Adsorption Isotherm*. 1999; Available from: http://www.microtrac-bel.com/en/tech/bel/seminar02.html.

13. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. 2553, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

14. Usman, H.D., et al., *Modification of Activated Carbon for Enhancement of Gas Contaminant Removal A Review.* International Annual Symposium on Sustainability Science and Management, 2012.

15. Shen, W., Z. Li, and Y. Liu, *Surface Chemical Functional Groups Modification of Porous Carbon.* Chemical Engineering, 2008. 1(1): p. 27-40.

16. Velo-Gala, I., et al., *Surface modifications of activated carbon by gamma irradiation.* Carbon, 2014. 67: p. 236-249.

17. Zhang, L., et al., *Modification of Activated Carbon by Means of Microwave Heating and Its Effects on the Pore Texture and Surface Chemistry.* Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013. 5(5): p. 1791-1795.

18. Qu, G.-Z., et al., *Surface modification of a granular activated carbon by dielectric barrier discharge plasma and its effects on pentachlorophenol adsorption.* Journal of Electrostatics, 2013. 71(4): p. 689-694.

19. Liu, S., et al., *Adsorption of glycerol from biodiesel washwaters.* Environ Technol, 2009. 30(5): p. 505-10.

20. Monsalvo, V.M., A.F. Mohedano, and J.J. Rodriguez, *Activated carbons from sewage sludge.* Desalination, 2011. 277(1-3): p. 377-382.

21. Xianglan, Z., et al., *Surface functional groups and redox property of modified activated carbons.* Mining Science and Technology (China), 2011. 21(2): p. 181-184.

22. Mahapatra, K., D.S. Ramteke, and L.J. Paliwal, *Production of activated carbon from sludge of food processing industry under controlled pyrolysis and its application for methylene blue removal.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. 95: p. 79-86.

23. Hunsom, M. and C. Autthanit, *Adsorptive purification of crude glycerol by sewage sludge-derived activated carbon prepared by chemical activation*

with H_3PO_4, K_2CO_3 and KOH. Chemical Engineering Journal, 2013. 229: p. 334-343.

24. Castro Vasques, É., et al., *Adsorption of glycerol, monoglycerides and diglycerides present in biodiesel produced from soybean oil.* Environmental Technology, 2013. 34(16): p. 2361-2369.
25. Ozdemir, I., et al., *Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation.* Fuel Processing Technology, 2014. 125: p. 200-206.
26. Li, Y., et al., *Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk.* Advanced Powder Technology, 2016. 27(2): p. 684-691.
27. Manosak, R., S. Limpattayanate, and M. Hunsom, *Sequential-refining of crude glycerol derived from waste used-oil methyl ester plant via a combined process of chemical and adsorption.* Fuel Processing Technology, 2011. 92(1): p. 92-99.
28. Ros, A., et al., *High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors.* Chemosphere, 2006. 65(1): p. 132-40.
29. Minoda, A., et al., *Synthesis of KOH-activated porous carbon materials and study of hydrogen adsorption.* Journal of Alloys and Compounds, 2013. 580, Supplement 1: p. S301-S304.
30. Pereira, M.F.R., et al., *Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups.* Carbon, 2003. 41(4): p. 811-821.
31. Yang, R.T., *Active carbon. By H. Jankowska, A. Swiatkowski, and J. Choma, Ellis Horwood, West Sussex, England, and Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991, 280 pp.* AIChE Journal, 1992. 38(12): p. 1998-1998.
32. Figueiredo, J.L., et al., *Modification of the surface chemistry of activated carbons.* Carbon, 1999. 37(9): p. 1379-1389.
33. Gu, L., et al., *Effect of surface modification of activated carbon on its adsorption capacity for bromate.* Desalination and Water Treatment, 2013. 51(13-15): p. 2592-2601.

34. Hameed, B.H. and F.B.M. Daud, *Adsorption studies of basic dye on activated carbon derived from agricultural waste: Hevea brasiliensis seed coat.* Chemical Engineering Journal, 2008. 139(1): p. 48-55.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล

ค.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลคือ เครื่องลิควิดโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) โดยมีภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

- วัฏภาคนิ่ง ได้แก่ คอลัมน์ C-18 ชนิดวัฏภาคผันกลับ (C-18 Reverse phase) ขนาด 4.6x150 มิลลิเมตร บรรจุซิลิกาขนาดอนุภาค 5 มิลลิเมตร รุ่น Pinnacle II C18
- วัฏภาคเคลื่อนที่ ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร ในเมทานอล อัตราส่วน 99:1
- อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที
- อุณหภูมิของคอลัมน์ 40 องศาเซลเซียส
- ตัวตรวจวัดสัญญาณ คือ ตัวตรวจวัดสัญญาณความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index, RI)

สร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลายกลีเซอรอลจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลีเซอรอลและพื้นที่ใต้กราฟ จะได้สมการเพื่อนำไปหาความเข้มข้นของกลีเซอรอลตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค.2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ISO 2098-1972) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องเปล่า
2. นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมา 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ชั่งน้ำหนักไว้เรียบร้อยแล้ว
3. นำไปประเหยให้แห้งด้วยไฟอ่อนๆ (สังเกตว่าไม่มีควัน)
4. นำไปเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
5. นำออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
6. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผาและคำนวณปริมาณเถ้าในตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

ค.3 การวิเคราะห์ปริมาณสิ่งปนเปื้อน

วิธีการคำนวณ

ร้อยละสิ่งปนเปื้อน = 100 – (ร้อยละกลีเซอรอล + ร้อยละเถ้า)

ค.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง ใช้แถบวัดค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่า pH (MACHEREY-NAGEL pH-Fix 0-14)

1. จุ่มแถบวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ลงในสารละลายที่ต้องการวัดเป็นเวลา 1 วินาที ให้สารละลายสัมผัสกับแถบสีทั้งหมด
2. กำจัดสารละลายส่วนเกินโดยการสลัดออก
3. เทียบสีแถบวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง กับสเกลสี จะได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค.5 สี (Color)

การวัดสีของกลีเซอรอลใช้มาตรฐานตามหลัก ASTM D1209 ซึ่งมีสารละลายสต๊อคมาตรฐานเป็นแบบแพลทินัม-โคบอลต์ ซึ่งในการวัดครั้งนี้ใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrophotometer) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับหน่วยสีของสารละลายสีมาตรฐานซึ่งจะใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการหาหน่วยสีของกลีเซอรอลที่ต้องการวัด มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายสต๊อคสีมาตรฐาน โดยละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลทิเนต (K_2PtCl_6) 0.623 กรัม และโคบอลตัสคลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 0.50 กรัม ในน้ำกลั่นซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มของสีเท่ากับ 500 หน่วย
2. เตรียมอนุกรมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100 200 300 และ 400 หน่วย โดยทำการเจือจางปริมาตรสารละลายสต๊อคสีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 20 มิลลิลิตร
3. นำอนุกรมสีทั้งหมดมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี โดยใช้ความยาวคลื่นในการวัดคือ 384 นาโนเมตร
4. นำกลีเซอรอลตัวอย่างมาวัดค่าการดูดกลืนแสง

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture) (ASTM D 3173-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. อุ่นเตาเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
2. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
3. ชั่งถ่านกัมมันต์หนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง
4. อบสารจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และคำนวณปริมาณความชื้นในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) (ASTM D 3175-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์น้ำหนักประมาณ 1.0 กรัม ในถ้วยกระเบื้อง
3. นำไปเผาในเตาเผาแบบท่อ โดยวางไว้หน้าเตาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำเข้าไปเผาที่กึ่งกลางของเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที (อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส) นำออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผาและคำนวณปริมาณสารละเหยในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) (ASTM D 3174-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์ตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง
3. เผาถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผาและคำนวณปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

วิธีการคำนวณ

ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว = 100 – (ร้อยละความชื้น + ร้อยละเถ้า + ร้อยละสารระเหย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ตามวิธี Boehm titration ต้องใช้สารละลายทั้งหมด 4 ชนิด (Chen และคณะ, 2002) คือ

1. NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล
2. Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

โดยวิธีการเตรียมสารละลาย และวิธีวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ข.1 วิธีเตรียมสารละลาย

ข.1.1 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายที่เป็นของแข็ง

เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล (จำนวนกรัมสมมูลต่อลิตร) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ NaOH มวลโมเลกุล 40 กรัมต่อโมล

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

จะได้ Na ใน NaOH มีเลขออกซิเดชัน = (Na × 1) + (-1 × 1)

Na = 1

เพราะฉะนั้น n = 1 × 1 = 1

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

จาก น้ำหนักสมมูล = น้ำหนักสูตร / n

จะได้ น้ำหนักสมมูล = 40/1 = 40

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

จาก จำนวนกรัมสมมูล = น้ำหนักสาร x ปริมาตรที่ต้องการ

จะได้ จำนวนกรัมสมมูล = 0.05 × 1 = 0.05

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

จาก น้ำหนักสารที่ใช้ = จำนวนกรัมสมมูล × น้ำหนักสมมูล

จะได้ น้ำหนักสารที่ใช้ = 0.05 × 40 = 2 กรัม

ดังนั้น ต้องนำ NaOH 2 กรัม ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ข.1.2 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายที่เป็นของเหลว

เตรียมสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (จำนวนกรัมสมมูลต่อลิตร) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยใช้ H_2SO_4 ความเข้มข้นร้อยละ 96 ความหนาแน่น 1.84

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

จะได้	H ใน H_2SO_4 มีเลขออกซิเดชัน	=	$(H \times 1) + (-2 \times 1)$
	H	=	2
เพราะฉะนั้น	n	=	$1 \times 2 = 2$

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

จาก	น้ำหนักสมมูล	=	น้ำหนักสูตร / n
จะได้	น้ำหนักสมมูล	=	98/2 = 49

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

จาก	จำนวนกรัมสมมูล	=	น้ำหนักสาร x ปริมาตรที่ต้องการ
จะได้	จำนวนกรัมสมมูล	=	0.1×1 = 0.1

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

จาก	น้ำหนักสารที่ใช้	=	จำนวนกรัมสมมูล x น้ำหนักสมมูล
จะได้	น้ำหนักสารที่ใช้	=	0.1×49 = 4.9 กรัม
จาก	ปริมาตรสารที่ใช้	=	$\frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{ความหนาแน่น} \times \text{ความเข้มข้น}}$
จะได้	ปริมาตรสารที่ใช้	=	$4.9/(1.84 \times 0.98)$ =2.72 มิลลิลิตร

ดังนั้น ต้องนำ H_2SO_4 2.72 มิลลิลิตร ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ข.2 วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทั้งหมด 4 ขวด
2. เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล สารละลาย Na_2CO_3 และ $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวด
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อัตราเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วดูดสารละลายที่ได้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่
5. ทำการไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล บันทึกปริมาตรที่ใช้ โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแต่ละชนิดมีดังนี้ NaOH ใช้โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) Na_2CO_3 ใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phynolpthalein) และ $NaHCO_3$ ใช้เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)

ข.3 วิธีคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชัน

1. ปริมาณหมู่คาร์บอซิล (Carboxyl group) คำนวณจากปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
2. ปริมาณหมู่แลกโตน (Lactone group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ $NaHCO_3$ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaOH ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carboxyl group) คำนวณจากผลต่างของปริมาณการใช้ H_2SO_4 ของ NaOH ความเข้มข้น 0.25 นอร์มัล และ 0.05 นอร์มัล

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิชาติ ประหลาดเนตร เกิดวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสวรรค์อนันต์วิทยา จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University