

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์

นายเชาวน์วัศ อรรถานินท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM SEWAGE SLUDGE
FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION

Mister Chaowat Autthanit

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย
สำหรับการทำลิเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์

โดย

นายเชาวน์วัศ อรรถานิทธิ

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร)

เขาวนัวัศ อรรถานิติ : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์. (PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM SEWAGE SLUDGE FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION) อ. ที่ ปรี ก ษา
 วิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.มะลิ หนูสนม, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสำหรับการทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์ สารกระตุ้นที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1.0-6.0 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 5-25 ชั่วโมง และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 500-900 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่คาร์บอนิลและสมบัติทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สูงกว่าการกระตุ้นด้วยความร้อนและการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริก อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ เวลาดูดซับสารกระตุ้น และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ รวมถึงความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพอย่างชัดเจน โดยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ร้อยละ 93.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า 1.05 เท่า การเพิ่มความบริสุทธิ์ซ้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ใหม่ให้กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 96.9 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยเฮกเซนจะดีกว่าไดเอทิลอีเทอร์

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5471955823: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: SLUDGE-DERIVED ACTIVATED CARBON / CRUDE GLYCEROL/ CARBONYL GROUP / ADSORPTION

CHAOWAT AUTTHANIT: PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM SEWAGE SLUDGE FOR CRUDE GLYCEROL PURIFICATION. ADVISOR: ASSOC. PROF. MALI HUNSOM, Ph.D., 134 pp.

This work was carried out to investigate the effect of parameters on the preparation of activated carbon from sewage sludge for crude glycerol purification. Types of activating agent (KOH, K_2CO_3 and H_3PO_4), weight ratio of activating agent to char (1.0-6.0 w/w), impregnation time (5-25 hrs) and carbonization temperature (500-900 °C) were explored. The results showed that the purity of crude glycerol depended significantly on either the quantity of carbonyl group or the surface properties. The KOH activation can enhance the quantity of oxygen functional groups and the BET surface area than the solely thermal treatment, the K_2CO_3 - and H_3PO_4 activations. Weight ratio of activating agent to char, impregnation time and carbonization temperature affected the quantity of carbonyl group and the surface properties as well as the ability to purify crude glycerol. Among the as-prepared sludge-derived activated carbon, the activated carbon prepared by KOH at the weight ratio between KOH to char of 5, impregnation time of 25 hr and carbonization temperature of 800 °C for 30 min by using the dose of activated carbon of 67 g/l with 120 min adsorption time and shaking rate of 250 rpm exhibited appropriate surface properties to enhance the purity of pre-treated crude glycerol up to 93.0 wt. %, which was greater than that by commercial activated carbon of around 1.05-fold. The repetitive purification can enhance the purity of pre-treated crude glycerol up to 96.9 wt.%. The regeneration of sludge-derived activated carbon by hexane was better than diethyl ether.

Department : Chemical Technology Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หนูผสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร ที่กรุณามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ความเมตตาและเอาใจใส่แก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์กลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล บริษัทนันทยางการทออุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีเทคนิค เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และนิสิตปริญญาโททุกท่านที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดการศึกษาและทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ความเอื้ออาทร กำลังใจ และให้ทุนสนับสนุนการเรียนและการวิจัยแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กลีเซอรอล.....	4
2.1.1 สมบัติของกลีเซอรอล.....	4
2.1.2 ประโยชน์ของกลีเซอรอล.....	6
2.1.2.1 การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรม.....	6
2.1.2.2 การใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้น เพื่อเปลี่ยนเป็นสารเพิ่มมูลค่า.....	8
2.1.3 การจำแนกคุณภาพและการวิเคราะห์กลีเซอรอล.....	9
2.1.3.1 กลีเซอรอลสำหรับอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพเคมี.....	9
2.1.3.2 กลีเซอรอลสำหรับอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพไดนาไมต์.....	9
2.1.3.3 กลีเซอรอลสำหรับชั้นคุณภาพอุตสาหกรรม.....	9
2.1.3.4 กลีเซอรอลสำหรับชั้นคุณภาพยา.....	10
2.2 กระบวนการผลิตกลีเซอรอล.....	13

	หน้า
2.2.1 การผลิตกลีเซอรอลจากการแตกตัวของไขมัน และน้ำมันด้วยความดันสูง.....	14
2.2.2 การผลิตกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของพอลิแอลกอฮอล์.....	14
2.2.3 การผลิตกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาการหมักน้ำตาล.....	14
2.2.4 การผลิตกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน.....	14
2.2.5 การผลิตกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	15
2.3 ปริมาณการผลิตกลีเซอรอลในประเทศไทย.....	17
2.4 กระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล.....	20
2.4.1 กระบวนการปรับสภาพกลีเซอรอลด้วยการสลายสบู่.....	20
2.4.2 การนำกลีเซอรอล.....	20
2.4.3 การกลั่นด้วยไอน้ำ.....	20
2.4.4 การกลั่นสุญญากาศ.....	21
2.4.5 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	21
2.4.6 กระบวนการดูดซับ.....	21
2.5 กระบวนการดูดซับ.....	21
2.5.1 กลไกการดูดซับ.....	23
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	24
2.6 ตัวดูดซับ.....	25
2.6.1 ซีโอไลท์.....	26
2.6.2 อะลูมินากัมมันต์.....	26
2.6.3 ซิลิกาเจล.....	26
2.6.4 ถ่านกัมมันต์.....	26
2.7 ถ่านกัมมันต์.....	27
2.7.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	27
2.7.2 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	28
2.7.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	29
2.7.4 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	31
2.8 หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	35

	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	42
3.1.1 การไฟโรไลซิสกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์.....	42
3.1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มประสิทธิภาพ ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ.....	42
3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอล.....	43
3.2 วัสดุดิบ.....	43
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	44
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	45
3.4.1 การปรับสภาพเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบ.....	45
3.4.2 การเตรียมตัวอย่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	46
3.4.3 การไฟโรไลซิสกากตะกอน.....	46
3.4.4 การกระตุ้นถ่านชาร์.....	47
3.4.5 การเพิ่มประสิทธิภาพของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	50
3.4.6 การเพิ่มประสิทธิภาพของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ โดยการดูดซับซ้ำ.....	50
3.4.7 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	52
4.1 สมบัติของวัสดุดิบ.....	52
4.1.1 สมบัติของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ.....	52
4.1.2 สมบัติของกากตะกอนและถ่านชาร์.....	55
4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ.....	56
4.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ.....	56

	หน้า
4.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางเคมี.....	62
4.2.2.1 ผลของสารกระตุ้นและอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างสารกระตุ้นและถ่านซาร์.....	63
4.2.2.2 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์.....	74
4.2.2.3 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์.....	79
4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	89
4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารปนเปื้อนจาก กลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	92
4.3.1 ผลของเวลาในการดูดซับ.....	92
4.3.2 ผลของความเร็วยวรอบในการเขย่า.....	94
4.3.3 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ โดยการดูดซับซ้ำ.....	97
4.4 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล.....	117
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ.....	123
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	125
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	134

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปรียบเทียบการนำกลีเซอรอลไปใช้ในอุตสาหกรรม ในปี ค.ศ. 1995 และ 2006..... 7
2.2	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ..... 10
2.3	สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอลบริสุทธิ์..... 11
2.4	ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี..... 23
2.5	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง..... 31
2.6	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด..... 31
2.7	สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์..... 35
4.1	องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่ใช้น้ำมันใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์..... 54
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส..... 56
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน..... 57
4.4	ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ ต่อองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์..... 63
4.5	สมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบ..... 91
ก.1	แสดงข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลของสารละลายที่ไรตัวอย่าง..... 118
ก.2	ข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลของสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร ที่ใช้ในการไทเทรตกลีเซอรอลตัวอย่าง..... 118
ค.1	ตัวอย่างการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์..... 128
ง.1	การประมาณน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน..... 133

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล.....	5
2.2	ปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน.....	15
2.3	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	16
2.4	ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2550-2555.....	18
2.5	กำลังการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลดิบของประเทศไทย ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2556.....	19
2.6	กลไกการดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน.....	24
2.7	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	29
2.8	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ (ก) ไม่เป็นแกรไฟต์ (ข) เป็นแกรไฟต์บางส่วน และ (ค) เป็นแกรไฟต์.....	29
2.9	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	33
2.10	กระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	34
2.11	หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บนขอบของระนาบชั้นแกรไฟิน.....	36
3.1	(ก) กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย และ (ข) กากตะกอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว.....	43
3.2	กลีเซอรอลดิบที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดย ใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น.....	44
3.3	(ก) การปรับสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยกรดฟอสฟอริก และ (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร.....	46
3.4	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการไพโรไลซิสกากตะกอน และการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์.....	47
4.1	ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่ใช้น้ำมันใช้แล้วเป็นสารตั้งต้น.....	53
4.2	ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร.....	55

ภาพที่	หน้า
4.3 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน.....	58
4.4 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน.....	59
4.5 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน.....	59
4.6 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์.....	60
4.7 การลดลงของสีของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	61
4.8 ชนิดของสารในในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส.....	62
4.9 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก.....	65
4.10 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	67
4.11 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	67
4.12 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	68

ภาพที่	หน้า
4.13 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบใน กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	70
4.14 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อ องค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต	71
4.15 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบใน กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ด้วยกรดฟอสฟอริก	71
4.16 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อปริมาณ กลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก	72
4.17 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อการลดสีของ กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก	73
4.18 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	75
4.19 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต	75
4.20 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก	76
4.21 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	77
4.22 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับ สภาพผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมคาร์บอเนต	78

ภาพที่	หน้า
4.23 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก.....	78
4.24 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก.....	79
4.25 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	81
4.26 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	81
4.27 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก.....	82
4.28 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก.....	84
4.29 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก.....	85
4.30 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	86
4.31 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย โพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	87
4.32 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก.....	87

ภาพที่	หน้า
4.33 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนที่ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก.....	88
4.34 ผลของเวลาในการดูดซับต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	93
4.35 ผลของเวลาในการดูดซับต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	94
4.36 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	95
4.37 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	96
4.38 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะที่เหมาะสม.....	97
4.39 สีของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	98
4.40 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 2.....	99
4.41 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ ด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์.....	101

ภาพที่	หน้า
4.42 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์.....	103
4.43 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์.....	103
4.44 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน.....	105
4.45 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์.....	105
4.46 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์.....	106
ก.1 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความหนืดสารละลาย.....	120

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กลีเซอรอลหรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นสารเคมีบริสุทธิ์ที่มีกลีเซอรอลตั้งแต่ร้อยละ 95 ขึ้นไป (กิตติยา อธิภาชน, 2545) มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) มีสูตรทางเคมีเป็น $C_3H_5(OH)_3$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 92.09 โดยมีสัดส่วนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 39.1 โดยน้ำหนัก ออกซิเจนร้อยละ 52.2 โดยน้ำหนัก และไฮโดรเจนร้อยละ 8.7 โดยน้ำหนัก กลีเซอรอลเป็นสารมีขั้วจึงสามารถละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์ ลักษณะของกลีเซอรอลเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน และถูกจัดให้เป็นสาร GRAS (Generally recognized as safe) จากสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 (U.S. Food and Drug Administration, 2010 : online)

กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เพื่อผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซล 100 ลิตร จะทำให้เกิดกลีเซอรอลดิบประมาณ 10 ลิตร (กรมธุรกิจพลังงาน, 2553) โดยประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกกลุ่มผลิตภัณฑ์กลีเซอรอลสูงกว่ามูลค่าการนำเข้าตั้งแต่ปี 2545 แสดงว่าประเทศไทยสามารถผลิตกลีเซอรอลได้มากกว่าความต้องการใช้ภายในประเทศ และจากการที่มีโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลขนาด 100 ตันต่อวัน ผลิตกลีเซอรอลได้ 3,000 ตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 9 ของปริมาณไบโอดีเซล ส่งผลให้ราคากลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 4-10 บาทต่อกิโลกรัม (Dasari, 2007) แต่กลีเซอรอลดิบที่เกิดขึ้นจะยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสบู่ น้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยา และกรดไขมันที่เหลืออยู่จากปฏิกิริยา ส่งผลให้กลีเซอรอลดิบมีราคาตกต่ำและอาจตกค้างเป็นของเสียในธรรมชาติ การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบจึงเป็นแนวทางที่กำลังได้รับความสนใจ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (ณัฐกานต์ บุศรพงษ์พานิช และ ณรงค์ฤทธิ์ คงอยู่, 2548) ได้แก่ การปรับสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยการละลายสบู่ โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ในการสะเทิน หรือการกลั่นโดยนำกลีเซอรอลมากำจัดน้ำที่ปนเปื้อนอยู่ออกจนหมดภายใต้อุณหภูมิที่ควบคุม จากนั้นนำเข้าสู่ระบบหอกลั่นกลีเซอรอลจนได้กลีเซอรอลที่บริสุทธิ์ตามต้องการ และจะนำไปผ่านการกำจัดสี แต่มีข้อเสียคือต้องดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยมีค่าใช้จ่ายในการใช้อุปกรณ์ที่สูงมาก

อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ในการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์คือ การดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีความพรุนเนื่องจากวิธีการนี้สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ค่าใช้จ่ายต่ำสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของตัวแปรต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย และศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ความร้อนและการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมี และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. วิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียโดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)
4. การไพโรไลซิสโดยการให้ความร้อนอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที

5. ศึกษาผลของตัวแปรในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียต่อความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่
 - ชนิดของสารกระตุ้น คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก
 - อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 1 ถึง 6
 - เวลาดูดซับสารกระตุ้นในช่วง 5 ถึง 25 ชั่วโมง
 - อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส
6. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพที่ผ่านการไพโรไลซิสและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ พื้นที่ผิว (BET surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameters) ด้วยวิธี Nitrogen Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (Boehm titration) และความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ (Iodine number)
7. ศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 90 นาที
8. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ตัวแปรที่ศึกษา คือ
 - เวลาในการดูดซับอยู่ในช่วง 60-180 นาที
 - ความเร็วรอบในการเขย่าอยู่ในช่วง 150-300 รอบต่อนาที
9. ศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับซ้ำ
10. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
11. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

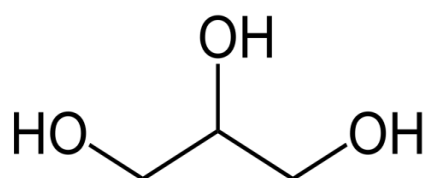
2.1 กลิเซอรอล

กลีเซอรอลมีการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1779 โดย Scheele พบว่ากลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาการผลิตสบู่ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว และเรียกกลีเซอรอลว่า "Sweet principle of fat" ต่อมาในปี ค.ศ.1823 Chevreul พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในไขมันซึ่งอยู่ในรูปของกลีเซอรอลเอสเทอร์ของกรดไขมันจึงเรียกว่ากลีเซอรอล กลีเซอรอลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมครั้งแรกเมื่อ ปี ค.ศ.1866 โดย Alfred Noble ได้นำกลีเซอรอลมาใช้ในการผลิตระเบิดไดนาไมต์ หรือไนโตรกลีเซอริน (Nitroglycerine) ต่อมาช่วงปลายปี ค.ศ.1930 Farben ได้พัฒนาและสังเคราะห์กลีเซอรอลโดยใช้สารตั้งต้นเป็นโพรเพน และตั้งแต่นั้นปี ค.ศ.1980 จนถึงปัจจุบันการผลิตกลีเซอรอลส่วนใหญ่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์มากถึงร้อยละ 75 และจากการสังเคราะห์โพรเพน (Propene) ร้อยละ 25 กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งคือ เป็นสารที่ไม่มีพิษ ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น มีการใช้กลีเซอรอลในรูปแบบต่างๆ เช่น เป็นสารรักษาความชื้น เป็นพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers) ที่ช่วยเก็บรักษาความยืดหยุ่นและความเหนียวของพลาสติก เป็นสารอิมัลชันและสารเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภทมาการีน น้ำสลัด และลูกกวาด ใช้กลีเซอรอลรักษาความชื้นให้กับยาสูบและเป็นส่วนผสมในไส้กรอง ทำให้บุหรี่ยึดไฟช้า ใช้เป็นส่วนผสมของยาหลายชนิด สารละลายกลีเซอรอลฟีนอล (Glycerolphenol) ใช้ในการล้างหู ใช้ผสมในเครื่องสำอางประเภทครีมและโลชั่นเพื่อทำให้ผิวชุ่มชื้น ใช้เพื่อป้องกันไม่ให้ยาสีฟันแห้งแข็งตัวในหลอด ใช้ห่อเนื้อและทำกระดาษชนิดพิเศษ ใช้เป็นสารหล่อลื่น เนื่องจากมีความเหนียวสูงและไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ใช้เป็นสารประกอบซีเมน สารอิมัลชันไฟเออร์ในยางรถถนน เซรามิกและกาว เป็นต้น (ณัฐมน ดีปะติ, 2552; The Soap and Detergent Association, 1990)

2.1.1 สมบัติของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวใสเหนียว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และมีรสหวาน โครงสร้างโมเลกุลเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล 3 กลุ่มมารวมกัน (-OH) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบสำคัญของไตรกลีเซอไรด์

(Triglycerides) เช่น ไขมัน และน้ำมัน ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้งฟีนอลไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอโรไซคลิก ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลเอสเทอร์และไดออกเซน ไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาวและตัวทำละลายจำพวกแฮโลเจน ดังนั้นกลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายชนิด กลีเซอรอลมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล (Science Technology Engineering and Mathematics, 2012: online)

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ด้านนอกจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงกลาง ภายใต้ภาวะที่เป็นกลางหรือเบสกลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดเป็นอะโครลีน (Acrolein) ในทางตรงกันข้ามในภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะเกิดอะโครลีนอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.4 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส กลีเซอรอลจะดีไฮเดรตเกิดเป็นอีเทอร์ลิงค์พอลิกลีเซอรอล (Ether-linked polyglycerol) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลควรทำในภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นเบส และที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยที่อะตอมคาร์บอนด้านนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิลและอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล สมบัติของกลีเซอรอลที่สำคัญมีดังนี้ (วิภา, 2546)

1. กลีเซอรอลไม่สามารถถูกออกซิไดซ์จึงมีความคงตัวสูง (High stability)
2. ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและกลิ่นรส เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน

3. ละลายได้ดีในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท
4. สามารถเกิดภาวะการเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooling) และทนต่อภาวะการแช่เยือกแข็งและการละลาย
5. มีความข้นหนืด จึงสามารถนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด (Thickening agent) หรือสารเพิ่มเนื้อสัมผัส (Body) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเจล
6. มีรสชาติหวานเล็กน้อย โดยมีค่าความหวานประมาณร้อยละ 55-75 ของระดับความหวานน้ำตาลซูโครส (ขึ้นกับระดับความเข้มข้นที่ใช้)
7. ไม่มีกลิ่นรุนแรง จึงสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมหวานได้ดีโดยไม่มีผลต่อกลิ่นรส
8. กลีเซอรอลนอกจากเป็นสารให้ความชื้น (Humectant) แล้วยังมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ จึงช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงความนุ่มนวล มีความหยุ่นตัวดี (Flexibility) มีลักษณะ creaminess และยังช่วยยืดอายุของผลิตภัณฑ์อีกด้วย
9. มีความดันไอต่ำ และไม่ระเหยที่อุณหภูมิปกติ เป็นสารไม่มีพิษต่อระบบการย่อยอาหาร ผิวหนังและเนื้อเยื่ออ่อน
10. ไม่มีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม
11. กลีเซอรอลได้รับการจัดให้เป็นสาร GRAS จากสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 และจัดอยู่ในรายการของสารที่มีสมบัติหลากหลาย (Multipurpose)

2.1.2 ประโยชน์ของกลีเซอรอล

2.1.2.1 การใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรม

เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ทำให้กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่าปริมาณความต้องการใช้กลีเซอรอลในอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1995 ถึง 2006 (Ayoub และ Abdullah, 2012) นอกจากนี้กลีเซอรอลยังเป็นสารฮิวแมคแทนท์ประเภทสารอินทรีย์ (Organic Humectant) จำพวกพอลิไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ซึ่งมีสมบัติในการดูดเก็บความชื้นจากอากาศได้ดี และยังมี ความหนืดที่ทำให้สารละลายมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อม (Syrup) จากข้อดีดังกล่าวกลีเซอรอลจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการนำกลีเซอรอลไปใช้ในอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1995 และ 2006
(Ayoub และ Abdullah, 2012)

อุตสาหกรรมการผลิต	ความต้องการใช้กลีเซอรอล ในปี ค.ศ. 1995 (ร้อยละ)	ความต้องการใช้กลีเซอรอล ในปี ค.ศ. 2006 (ร้อยละ)
กระดาษแก้ว หรือกระดาษใสใช้ห่อ ของหรืออาหาร (Cellophane)	4	2
ระเบิด (Explosives)	-	2
ผงซักฟอก (Detergents)	-	2
ยาสูบ (Tobacco)	4	6
การสังเคราะห์อัลคิเดเรซิน (Alkyd resins)	6	8
ไตรอะซีติน (Triacetin)	-	10
ผลิตภัณฑ์อาหาร (Food product)	8	11
เอสเตอ์ (Esters)	11	14
ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในชีวิตรประจำวัน (Personal Care) และยา	26	34
อื่นๆ	12	11

- อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง กลีเซอรอลถูกใช้เป็นส่วนผสมในยาหลายชนิดเพื่อเพิ่มความชื้นและทำให้ยามีลักษณะเป็นน้ำเชื่อม สารละลายกลีเซอรอล-ฟีนอล (Glycerol-phenol) ใช้ในการล้างหู ในเครื่องสำอางมีการผสมกลีเซอรอลในครีม ทำให้ผิวชุ่มชื้นและนุ่ม และยังเป็นส่วนผสมที่ทำให้ยาสีฟันเป็นมันวาว

- อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม สามารถใช้แทนคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบของน้ำเชื่อมในลูกอมและน้ำตาลไอซิ่ง (Icing) ใช้เป็นตัวทำละลายสารแต่งกลิ่นและสีต่างๆ เช่น วานิลลาและเป็นสารหล่อลื่นเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารและการบรรจุหีบห่อ

- บุหรี่เป็นส่วนสำคัญในการขึ้นรูปบุหรี่ปกก่อนบรรจุ ทำให้บุหรี่ปกติดไฟง่าย

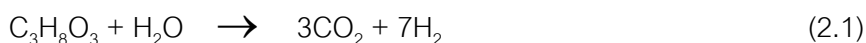
- สารหล่อลื่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นไม่ได้ เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารที่มีความหนืดสูงและไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ กลีเซอรอลนิยมใช้ในการอัดออกซิเจนเพราะทนปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่ามีเนอรอลออยล์ (Mineral oil)

- อุตสาหกรรมพลาสติก (Alkyd resins) ใช้ในการเคลือบพื้นผิวเป็นส่วนผสมเพื่อให้พลาสติกนุ่มและยืดหยุ่นได้ดียิ่งขึ้น

2.1.2.2 การใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนเป็นสารเพิ่มมูลค่า

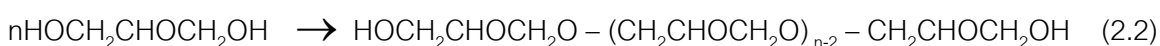
กลีเซอรอลเป็นสารเคมีที่สามารถเปลี่ยนเป็นสารเพิ่มมูลค่าได้หลายชนิด เช่น แก๊สไฮโดรเจน โพรเพนไดออกไซด์ หรือพอลิกลีเซอรอล เป็นต้น

ก.) การเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นแก๊สไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเฟสน้ำ (Aqueous-Phase reforming) เป็นกระบวนการรีฟอร์มมิงขั้นต้นเดียวซึ่งผลิตแก๊สไฮโดรเจนที่ง่ายต่อการทำบริสุทธิ์ต่อไปด้วยการทำปฏิกิริยาของกลีเซอรอลกับน้ำซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจน (สมการ 2.1)



กระบวนการนี้ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ และก่อให้เกิดสารประกอบแอลเคน มีเทน อีเทน และโพรเพน ขึ้นแต่จะมีความเข้มข้นที่ต่ำ ปฏิกิริยาการก่อเกิดสารประกอบแอลเคนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งจะช่วยในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และมีการประมาณการว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยกระบวนการนี้จะเท่ากับ 3.04 ปอนด์ต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าการผลิตจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นสารป้อนซึ่งมีราคา 2.66 ปอนด์ต่อกิโลกรัม แต่ก็ต่ำกว่าการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ซึ่งมีต้นทุนอยู่ที่ 4.94 ปอนด์ต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน

ข.) การเกิดพอลิเมอร์ของกลีเซอรอลสามารถเกิดได้ในภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสสูง (กรณีใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส) โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของกลีเซอรอลได้เป็นพอลิกลีเซอรอล (สมการ 2.2) (Jungermann, 1991)



พอลิกลีเซอรอลเกิดได้โดยการให้ความร้อนกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 200-275 องศาเซลเซียส ในภาวะปกติหรือลดความดัน โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมหรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมอะซิเตท ภายใต้บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีรายงานการวิจัยในการผลิตสารเพิ่มมูลค่าจากกลีเซอรอลอีกมากมาย เช่น กรดซัคซินิก (Succinic acid) สารประกอบอะซิเตท (Acetate) กรดซิตริก (Citric acid) และ 1,3-โพรเพนไดออล (1,3-propanediol) เป็นต้น อย่างไรก็ตามกลีเซอรอลที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนเป็นสารเพิ่มมูลค่านั้นต้องมีความบริสุทธิ์พอที่จะไม่ไปทำลายกัมมันตภาพตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแบคทีเรีย การประยุกต์ใช้สารเพิ่มมูลค่านั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ร่วมกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.3 การจำแนกคุณภาพและการวิเคราะห์กลีเซอรอล

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแบ่งกลีเซอรอลออกเป็น 2 ประเภท คือ กลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ โดยกลีเซอรอลที่ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์จะมีคุณลักษณะเหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยา อาหาร บุหรี่ วัตถุระเบิด และอุตสาหกรรมอื่นๆ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพเคมี (Chemical grade) ชั้นคุณภาพไดนาไมต์ (Dynamite grade) ชั้นคุณภาพอุตสาหกรรม (Technical grade) และชั้นคุณภาพยา (Pharmaceutical grade) โดยกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการ คือ ลักษณะทั่วไปต้องเป็นของเหลวชั้น และปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ นอกจากนี้ยังกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีตามเกณฑ์กำหนดชั้นคุณภาพกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

2.1.3.1 กลีเซอรอลสำหรับอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพเคมี มีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารประกอบพอลิออล (Polyol) สำหรับผลิตโฟม พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) ใช้เป็นองค์ประกอบในสารเคลือบและสี ใช้ผสมกับสารคอลลอยด์ ใช้เป็นสารให้ความนุ่มแก่โซโลเฟน

2.1.3.2 กลีเซอรอลสำหรับอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพไดนาไมต์ มีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก โดยกลีเซอรอลจะทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก (HNO_3) เกิดเป็นไนโตรกลีเซอริน (Nitroglycerin, $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$) หรือระเบิดไดนาไมต์

2.1.3.3 กลีเซอรอลสำหรับชั้นคุณภาพอุตสาหกรรม มีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เช่นมีการใช้กลีเซอรอลสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารให้ความหวาน ใช้เป็นตัวทำละลายให้แก่วานิลิน ใช้เป็นสารให้ความนุ่มในทอฟฟี่

เค้ก ชีส ใช้เป็นตัวอิมัลซิไฟเออร์โดยผลิตเป็นมอนอหรือไดกลีเซอไรต์ ใช้เป็นตัวเติม (Filler) แก่อาหารที่มีไขมันต่ำ เช่น คุกกี้ และใช้เป็นสารให้ความข้น (Thickening agent)

2.1.3.4 กลีเซอรอลสำหรับชั้นคุณภาพยา มีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก กลีเซอรอลใช้เป็นองค์ประกอบในตัวยาที่ต้องการความชุ่มชื้นแก่ผิวแห้ง เช่น ครีมทาผิว เป็นส่วนประกอบยาแก้ไอ เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน และน้ำยาบ้วนปาก

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกลีเซอรอลดิบ (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2538)

ลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีการทดสอบ
	กลีเซอรอลดิบ	กลีเซอรอลดิบ	
	จากการแยก สลายไขมัน	จากอุตสาหกรรม สุญ่	
กลีเซอรอล ไม่น้อยกว่า (ร้อยละ)	88.0	80.0	BS 5711:Part 3
เถ้า ไม่เกิน (ร้อยละ)	1.0	10.0	ISO 2098
น้ำ ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	10.0	ISO 2097
สารอินทรีย์ที่ไม่ใช่กลีเซอรอล ไม่เกิน (ร้อยละ)	1.5	2.5	ISO 2464
สารหนู ไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	2.0	2.0	มอก.1281
โพรเพน 1,3-ไดออกอล ไม่เกิน (ร้อยละ)	0.5	0.5	BS 5711:Part 11
น้ำตาล	ต้องไม่พบ	ต้องไม่พบ	BS 5711:Part 18

หมายเหตุ BS = British Standard

ISO = International Organization for Standardization

ตารางที่ 2. 3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2538)

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
		ชั้นคุณภาพ เคมี	ชั้นคุณภาพ ไดนาไมต์	ชั้นคุณภาพ อุตสาหกรรม	ชั้นคุณภาพ ยา
1	ค่าของสีไลอิวบอนด์สเกล ในเซลล์ขนาด 113 มิลลิเมตร ไม่เกิน	-	(5.0Y+1.2R)	(5.0Y+1.2R)	(5.0Y+1.2R)
2	กลิ่น	ต้องไม่มีกลิ่น แปลกปลอม	ต้องไม่มีกลิ่น แปลกปลอม	ต้องไม่มีกลิ่น แปลกปลอม	ต้องไม่มีกลิ่น แปลกปลอม
3	กลีเซอรอล ร้อยละโดย น้ำหนักไม่น้อยกว่า	99.0	99.0	99.0	95.0
4	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	1.261 ถึง 1.264	1.261 ถึง 1.264	1.261 ถึง 1.264	1.249
5	ความเป็นเบสหรือความ เป็นกรด ไม่เกิน (มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อ 100 กรัม)	0.064	0.32	0.32	-
6	เถ้าซัลเฟต ไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	0.01	0.01	0.01	0.01
7	สารหนู ไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	2.0	-	-	1.5
8	ตะกั่ว ไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	1.0	-	-	-
9	โลหะหนักทั้งหมด (เทียบเป็นตะกั่ว) ไม่เกิน มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	5.0	-	-	5.0

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (ต่อ)

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
		ชั้นคุณภาพ เคมี	ชั้นคุณภาพ ไดนาไมต์	ชั้นคุณภาพ อุตสาหกรรม	ชั้นคุณภาพ ยา
10	คลอไรด์ โดยน้ำหนักไม่เกิน (ร้อยละ)	-	0.01	0.01	0.001
11	ขีดจำกัดปริมาณคลอไรด์ (Chloride limit)	สารละลายที่ได้ ต้องไม่ขุ่น	-	-	-
12	ขีดจำกัดปริมาณคลอไรด์ อินทรีย์	สารละลายที่ได้ ต้องไม่ขุ่นกว่า สารละลาย อินทรีย์	-	-	-
13	สารประกอบคลอรีน (คำนวณเป็นคลอไรด์) โดยน้ำหนักไม่เกิน (ร้อยละ)	-	-	-	0.003
14	เหล็ก ไม่เกิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	-	-	2.0	-
15	ซัลเฟต ไม่เกิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	-	0.002
16	น้ำตาล	ต้องไม่พบ	-	-	-
17	ขีดจำกัดปริมาณสารรีดิวซ์	สีของ สารละลายต้อง ไม่เข้ม กว่าสีของ สารละลาย มาตรฐาน	สีของ สารละลาย ต้องไม่เข้ม กว่าสีของ สารละลาย มาตรฐาน	-	-

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (ต่อ)

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
		ชั้นคุณภาพ เคมี	ชั้นคุณภาพ ไดนาไมต์	ชั้นคุณภาพ อุตสาหกรรม	ชั้นคุณภาพ ยา
18	แซพอนิฟิเคชัน (Saponification) ไม่เกิน (มีลลิอควิวาเลนต์ต่อ 100 กรัม)	0.64	0.64	-	-
19	กรดไขมันและเอสเทอร์	-	-	-	ทำปฏิกิริยา พอดีกับ สารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อ ลิตร ไม่เกิน 1 ลบ.ซม.

2.2 กระบวนการผลิตกลีเซอรอล

กลีเซอรอลอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลในธรรมชาติและกลีเซอรอลสังเคราะห์ กลีเซอรอลในธรรมชาติไม่พบในรูปแบบอิสระแต่จะอยู่ในรูปเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ มักเกิดปฏิกิริยาเป็นเอสเทอร์ ปริมาณกลีเซอรอลในไขมันและน้ำมันจะอยู่ระหว่างร้อยละ 8 ถึง 14 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมัน การจะได้กลีเซอรอลนั้นต้องทำให้ไขมันและน้ำมันแตกตัวก่อนการทำปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชันและการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ในขณะที่กลีเซอรอลสังเคราะห์จะได้จากการสังเคราะห์โพพีน นอกจากนี้ยังมีกระบวนการผลิตกลีเซอรอลด้วยวิธีอื่น เช่น การหมักน้ำตาล และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่นิยม

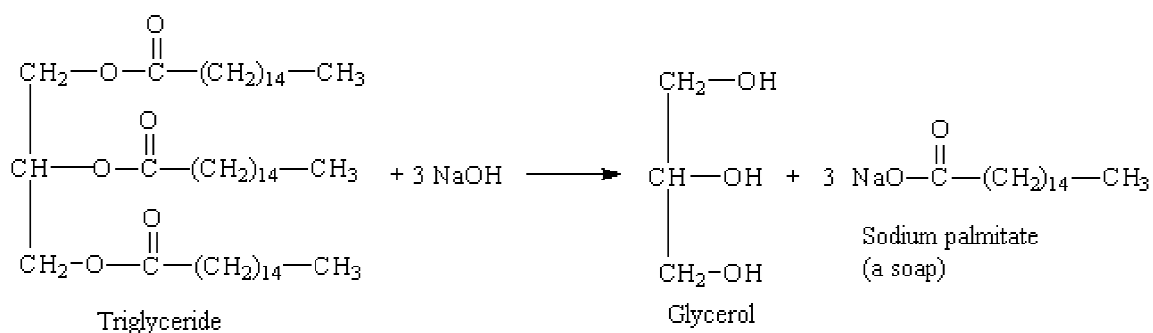
ในทางอุตสาหกรรม กลิเซอรอลที่จำหน่ายทางการค้าเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตสบู่ และกระบวนการไฮโดรไลซิสของไขมันและน้ำมัน ปัจจุบันมีการสังเคราะห์ กลิเซอรอลจากสารประเภทไฮโดรคาร์บอนกลุ่มโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งกลิเซอรอลที่ได้จะมีหลายเกรด โดยเกรดที่ดีที่สุดจะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา ปัจจุบันเมื่อกล่าวถึงกลิเซอรอลจะหมายถึงสารเคมีบริสุทธิ์ที่มีปริมาณของกลิเซอรอลมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 95

2.2.1 การผลิตกลิเซอรอลจากการแตกตัวของไขมันและน้ำมันด้วยความดันสูง วิธีนี้ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1854 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง น้ำและไขมันจะถูกป้อนเข้าไปสู่หม้อต้ม แล้วเกิดการแตกตัวแบบการไหลสวนทาง ที่ความดัน 5 ถึง 6 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 250 ถึง 260 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายกลิเซอรอลในน้ำร้อยละ 15 เรียกว่า สวีทวอเตอร์ (Sweet water)

2.2.2 การผลิตกลิเซอรอลจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของพอลิแอลกอฮอล์ การทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของพอลิแอลกอฮอล์ เช่น เซลลูโลส แป้ง หรือน้ำตาล ทำให้เกิดสารผสมของกลิเซอรอล ซึ่งสามารถแยกได้ด้วยวิธีการกลั่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง โคบอลต์ โครเมียม และ ทังสเทน รวมทั้งออกไซด์ของแลนทานัมบางตัว

2.2.3 การผลิตกลิเซอรอลจากปฏิกิริยาการหมักน้ำตาล เป็นปฏิกิริยาการเกิดกลิเซอรอล โดยการหมักแอลกอฮอล์ ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ.1858 โดย Paster ซึ่งการหมักจะถูกควบคุมในขั้น กลิเซอรินดีไฮด์ที่รีฟอสเฟต (Glyceraldehyde 3-phosphate) ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) แล้วเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้กลิเซอรอลฟอสเฟต (Glycerol phosphate) และได้กลิเซอรอล ร้อยละ 25 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) กระบวนการนี้ไม่เป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรม

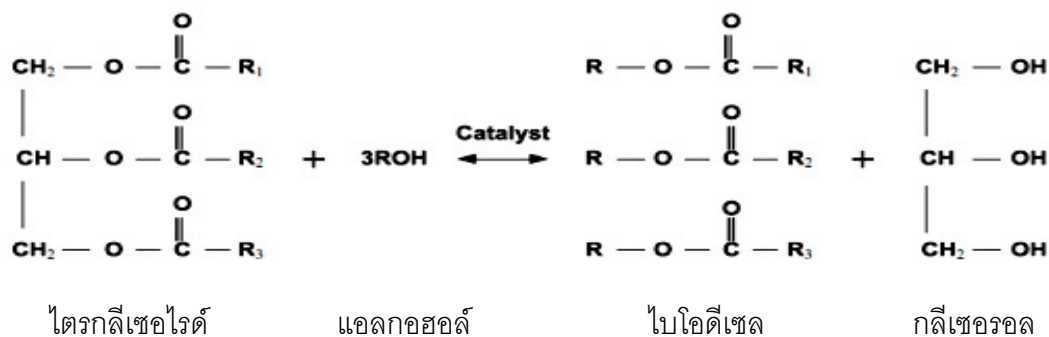
2.2.4 การผลิตกลิเซอรอลจากปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเบสเกิดเป็นสบู่ และได้กลิเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมดั้งแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน (Louisiana Tech University, 2012: online)

2.2.5 การผลิตกลีเซอรอลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (Alkoxyl group, RO-) ของไตรกลีเซอไรด์ด้วยแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลเล็ก (ภาพที่ 2.3) เรียกว่าปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยแอลกอฮอล์ (Alcoholysis reaction) ปฏิกิริยานี้จะใช้เตรียมเอสเทอร์ในกรณีที่ไม่สามารถเตรียมได้ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification reaction) ได้โดยตรง จึงถูกนำมาใช้เตรียมเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน สำหรับแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ได้จะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอม ส่วนมากจะเป็นเมทานอลและเอทานอล ซึ่งเมทานอลจะมีข้อดีคือราคาที่ไม่สูงมาก และการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเนื่องจากมีโมเลกุลขนาดเล็ก ส่วนเอทานอลมีข้อดีคือสามารถผลิตได้จากการเกษตรและสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ประกอบกับมีอันตรายน้อยกว่าเมทานอล ส่วนใหญ่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันต้องการอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์ คือ 3 ต่อ 1 แต่ในทางปฏิบัติต้องการอัตราส่วนที่มากเกินไป โดยมีรายงานว่า มีการใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์ เท่ากับ 7 ต่อ 1 เพื่อผลักดันสมดุลของปฏิกิริยาให้เกิดเป็นเอสเทอร์มากที่สุด (Ma และ Hanna, 1999) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ได้คือ กรด เบส และเอนไซม์ ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยาจะแตกต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เช่น โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) โซเดียมเมทอกไซด์ (CH₃ONa) โซเดียมเอทอกไซด์ (C₂H₅ONa) และโซเดียมบิวทอกไซด์ (C₄H₉ONa) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เช่น กรดซัลฟูริก (H₂SO₄) กรดซัลฟิวริก (H₂SO₃) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ ได้แก่ เอนไซม์ไลเปส ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากสามารถ

เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ส่วนตัวเร่งที่เป็นเอนไซม์จะใช้เวลานานที่สุด (Lotero และคณะ, 2005)



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Jehad และคณะ, 2010)

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน มีหลายปัจจัยดังนี้

(1) ปริมาณกรดไขมันอิสระ ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส ไตรกลีเซอไรด์หรือน้ำมันควรมีค่ากรดไขมันอิสระไม่เกินร้อยละ 1 เนื่องจากกรดไขมันที่สูงจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงคือปฏิกิริยาแซพอนิฟิเคชัน ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง การเกิดสบู่เป็นสาเหตุให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเจลและยากต่อการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรอลและเอสเทอร์ของกรดไขมัน

(2) แอลกอฮอล์ ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีหลายชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล ไอโซโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้คือ เมทานอล และเอทานอล โดยเฉพาะเมทานอลนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก ขนาดโมเลกุลเล็ก และมีขั้วสูงทำให้สามารถละลายตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย อย่างไรก็ตามในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันควรใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปเพื่อให้สมดุลของปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวา และทำให้ได้ร้อยละผลได้ (Yield) สูง

(3) ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์มีหลายชนิด ได้แก่ กรด เบส และเอนไซม์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมใช้มากที่สุดคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่า

ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสชนิดอื่น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาในการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

(4) อุณหภูมิและเวลา ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันและแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในปี ค.ศ.1984 Feedman และคณะ ได้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิและเวลามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับกาเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยอุณหภูมิและเวลาที่ต่างกันจะให้ร้อยละผลได้ที่ต่างกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะให้ผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย

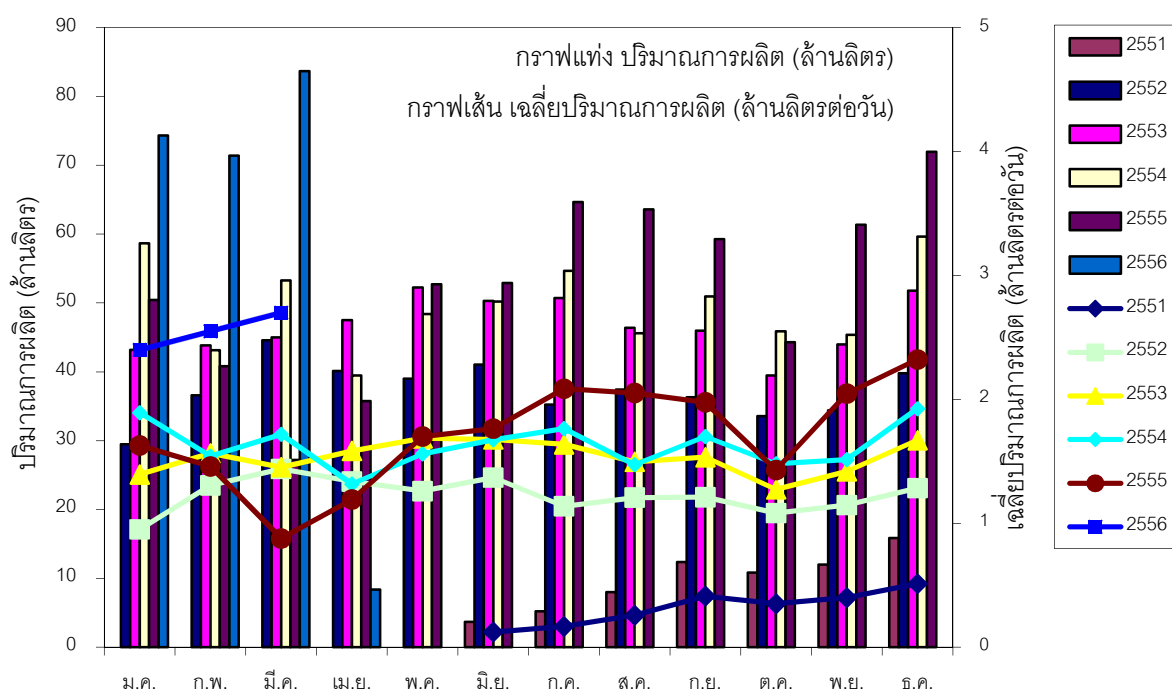
(5) การกวนผสม เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของของเหลว สารตั้งต้นระหว่างน้ำมันกับ แอลกอฮอล์ จะละลายเข้ากันได้ดีจึงต้องอาศัยการกวน และเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

2.3 ปริมาณการผลิตกลีเซอรอลในประเทศไทย

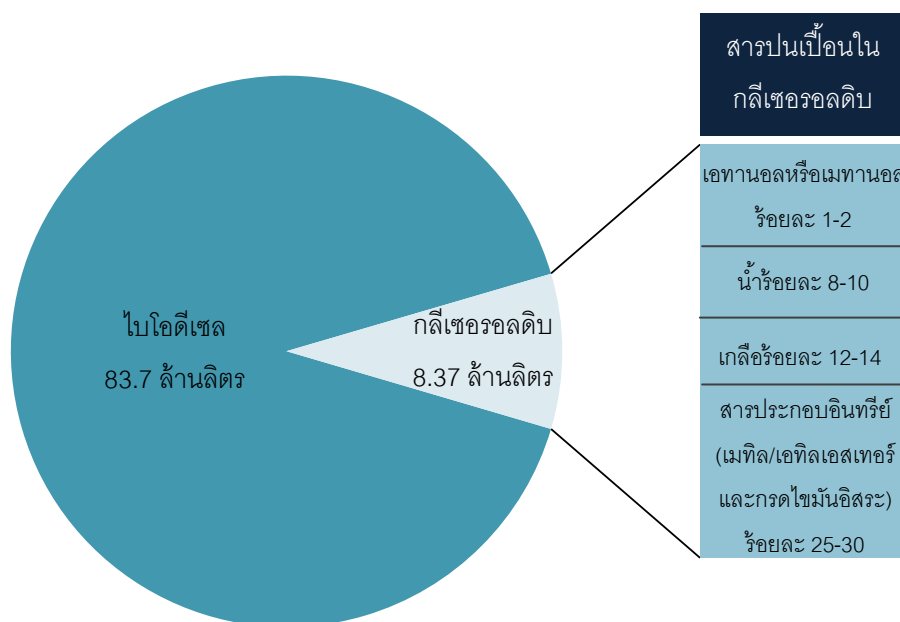
ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงานและราคาน้ำมันในตลาดโลกที่ผันผวนขึ้นลงตลอดเวลา ส่งผลกระทบต่อทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และความมั่นคงของประเทศต่างๆ ทั่วโลก ประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว เนื่องจากมีแหล่งพลังงานจำกัด ต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราเป็นมูลค่ามหาศาลในการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ประกอบกับราคาน้ำมันสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ประเทศไทยในทุกภาคส่วนโดยเฉพาะในระบบเศรษฐกิจของประเทศได้รับผลกระทบอย่างมาก อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้มาจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน โดยเฉพาะการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาภาวะโลกร้อน

จากการที่ประเทศไทยพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ทำให้ประเทศต้องประสบปัญหาสูญเสียเงินตราในการนำเข้าน้ำมันดิบเป็นมูลค่ามหาศาล เช่น ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2553 มีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงภายในประเทศ 3,527 ล้านลิตร หรือ 117.6 ล้านลิตรต่อวัน มีการนำเข้าน้ำมันดิบ 4,528 ล้านลิตร หรือ 150.9 ล้านลิตรต่อวัน มูลค่า 76,344 ล้านบาท และนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป 240 ล้านลิตร หรือ 8 ล้านลิตรต่อวัน มูลค่า 3,264 ล้านบาท

พลังงานส่วนใหญ่ใช้ในภาคคมนาคมขนส่งและภาคอุตสาหกรรม โดยประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลสูงสุดประมาณวันละ 51.7 ล้านลิตร หรือประมาณร้อยละ 44 ของการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด (กรมธุรกิจพลังงาน, 2553) และยังคงพบว่ามีความต้องการน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะเดียวกันการใช้พลังงานส่วนใหญ่มาจากปิโตรเลียม ทำให้ประเทศไทยต้องประสบปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัญหาเหล่านี้ทำให้รัฐบาลหันมาดำเนินนโยบายใช้พลังงานทดแทน นั่นคือการผลิตไบโอดีเซลเพื่อทดแทนการนำเข้าน้ำมันดีเซลจากต่างประเทศ โดยกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นจะให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้คือกลีเซอรอล โดยกลีเซอรอลจะมีปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยกระทรวงพลังงานได้รายงานว่าประเทศไทยมีกำลังการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2556 ประมาณวันละ 2.7 ล้านลิตรต่อวัน หรือประมาณ 83.7 ล้านลิตรต่อเดือน (ภาพที่ 2.4) ซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้คือกลีเซอรอลประมาณ 8.37 ล้านลิตรต่อเดือน นับเป็นปริมาณที่สูงมาก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.), 2556)



ภาพที่ 2.4 ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2550-2555 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.), 2556)



ภาพที่ 2.5 กำลังการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลดิบของประเทศไทยในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2556
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556; Cvengros และ Povazance, 1996)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ประกอบด้วยเอสเทอร์ กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา และไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จึงต้องผ่านกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้ ซึ่งกลีเซอรอลดิบที่เกิดขึ้นจะยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสนุ่ น้ำ เกลือ ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารประกอบอินทรีย์ (เมทิลเอทิลเอสเทอร์ และกรดไขมันอิสระ) ที่เหลืออยู่จากปฏิกิริยา (ภาพที่ 2.5) (Cvengros และ Povazance, 1996) ทำให้กลีเซอรอลดิบมีราคาตกต่ำและเหลือทิ้งในธรรมชาติ โดย Yong และคณะ (2001) ได้ศึกษาการนำกลับ (Recovery) กลีเซอรอลดิบจากกลีเซอรอลเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในของผลปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil) พบว่าส่วนที่นำกลับได้ประกอบด้วยกลีเซอรอลดิบร้อยละ 33.9 กรดไขมันอิสระ ร้อยละ 10.5 และเกลือร้อยละ 65.2 ซึ่งใน กลีเซอรอลดิบที่ได้นั้นมีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 51.4 เถ้าร้อยละ 13.8 น้ำร้อยละ 8.9 และสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่กลีเซอรอลร้อยละ 25.9 ดังนั้นหากสามารถนำกลีเซอรอลดิบมาทำการบำบัด

หรือทำให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นจะเป็นแนวทางในการนำกลีเซอรอลที่ได้ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ และช่วยให้กระบวนการผลิตมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากยิ่งขึ้น

2.4 กระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลมีส่วนผสมของเมทานอล สารเร่งปฏิกิริยา เอสเทอร์ของกรดไขมัน ไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมัน และสิ่งเจือปนอื่นๆ จึงต้องใช้กระบวนการต่างๆ ในการเพิ่มความบริสุทธิ์ซึ่งประกอบด้วย (ณัฐกานต์ บุศรพงษ์พานิช และ ณรงค์ฤทธิ์ คงอยู่, 2548)

2.4.1 กระบวนการปรับสภาพกลีเซอรอลด้วยการสลายสบู่ (Soap splitting)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์จะเกิดสบู่ในปริมาณมากในวัฏภาคของกลีเซอรอล ดังนั้นขั้นตอนแรกจะเป็นการสะเทินตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่ที่มีอยู่ในกลีเซอรอลด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น เพราะกรดซัลฟูริกมีน้ำปนอยู่น้อยกว่ากรดเกลือและจะไม่ใช้กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) เพราะเสี่ยงต่อเกิดไนโตรกลีเซอริน (Nitroglycerin, $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$) นอกจากนี้ยังสามารถใช้กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) เกรดการค้าได้ แต่กรดดังกล่าวจะแตกตัวไม่ดีเท่ากรดซัลฟูริกและจะได้เกลือฟอสเฟตซึ่งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมจะได้เกลือโพแทสเซียมฟอสเฟตซึ่งใช้เป็นปุ๋ยได้

2.4.2 การนำกลับแอลกอฮอล์ (Alcohol recovery)

การแยกแอลกอฮอล์ออกจากกลีเซอรอลสามารถทำได้ด้วยการระเหยแบบแฟลช (Flash evaporation) หรือใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (Climbing film evaporation) คุณสมบัติในการนำกลับแอลกอฮอล์ต้องไม่สูงมากเกินไป เพราะกลีเซอรอลสามารถสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านขั้นตอนการระเหยแอลกอฮอล์แล้ว ความเข้มข้นของกลีเซอรอลจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 85

2.4.3 การกลั่นด้วยไอน้ำ (Steam distillation)

การกลั่นด้วยไอน้ำนิยมใช้กันมากในกรณีที่ต้องการแยกสารไม่บริสุทธิ์ที่ไม่ระเหยออกจากสารซึ่งมีจุดเดือดสูงและสลายตัวได้ง่าย หรือของผสมที่มีสมบัติการนำความร้อนไม่ดี เนื่องจากมีการพ่นไอน้ำเข้าไปสัมผัสกับของเหลวที่อยู่ในหม้อกลั่นโดยตรง วิธีนี้จึงเหมาะที่จะใช้กับสารที่ละลายน้ำได้ยาก ไอน้ำที่ใช้มีบทบาทเป็นทั้งตัวกลางให้ความ

ร้อนและทั้งช่วยลดจุดเดือดและความดันย่อยของสารที่จะกลั่นแยกในขณะเดียวคือ วิธีการกลั่นโดยพ่นไอน้ำเข้าไปในหอกลั่น มีข้อดีคือทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นต่ำลง จึงเหมาะสำหรับใช้แยกสารที่สลายตัวง่าย

2.4.4 การกลั่นสุญญากาศ (Vacuum Distillation) กลีเซอรอลเป็นสารที่มีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท การกลั่นบริสุทธิ์กลีเซอรอลให้มีประสิทธิภาพต้องใช้ระบบการกลั่นสุญญากาศที่มีความดันเพิ่มเข้ามาในระบบ เพื่อให้กลีเซอรอลระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ทำได้โดยวิธีการระเหยแบบแฟลชภายใต้สุญญากาศ (10-15 กิโลพาสคาล) ด้วยระบบไอน้ำ ซึ่งจะทำให้การแยกกลีเซอรอลออกจากสิ่งเจือปนได้ง่ายขึ้น

2.4.5 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซึ่งจะดำเนินการในคอลัมน์ที่มีสารไอออนประจุบวกกับไฮโดรเจนไอออน และในคอลัมน์ที่มีสารไอออนประจุลบซึ่งจะแลกเปลี่ยนประจุกับไฮดรอกไซด์ไอออน การทำบริสุทธิ์กลีเซอรอลด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกเกลืออินทรีย์ ไนมัน สบู์ สี และกลิ่นออกได้

2.4.6 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 ภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.5

2.5 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับเรียกว่าตัวดูดซับ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบระหว่างวัฏภาค (Phase) ต่างๆ ทั้งสามวัฏภาค คือ ของเหลว (Liquid) แก๊ส (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว แก๊ส-ของเหลว แก๊ส-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดย

ในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะอยู่กับผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากตัวดูดซับไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในตัวดูดซับจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการดูดซับได้ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ปัจจัยสำคัญในการระบุชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย ตัวดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลตัวดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวดูดซับละลายในสารละลาย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม และมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล การกำจัดตัวดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible reaction) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

ตารางที่ 2.4 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี (Kenneth, 1992)

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ดูดซับแบบชั้นเดียว และดูดซับได้หลายชั้น	ดูดซับแบบชั้นเดียว
8. อัตราเร็วการดูดซับ	เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	เกิดขึ้นอย่างช้าๆ

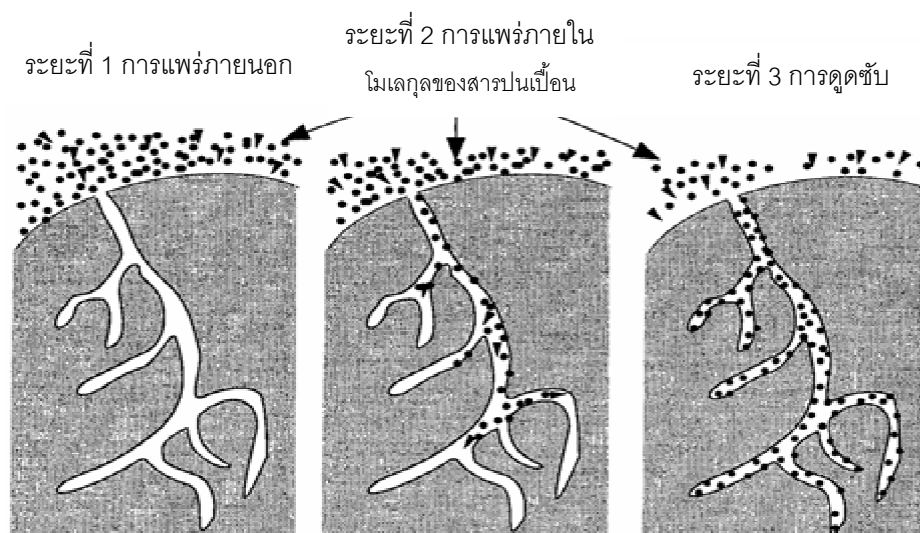
2.5.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะต่อเนื่องกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับเป็นระยะที่ตัวถูกดูดซับเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน



ภาพที่ 2.6 กลไกการตรึงสารป็นบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน (นภาพพร พานิช และคณะ, 2547)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ก.) **ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ** อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน แต่ถ้าสารดูดซับนั้นมีรูพรุนอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ สารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย จากการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของตัวดูดซับเล็กน้อย หรือขนาดของโมเลกุลเข้าโพรงได้พอดี เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะหลุดเข้าไปในโพรงก่อนและตามด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่

ข.) **ความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนสารละลาย** ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำจะส่งผลให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีความหนา เนื่องจากไม่ถูกรบกวนจึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ

ค.) **ค่าความเป็นกรด-เบส** มีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเบสในการดูดซับ สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ถ้าสารดูดซับมีค่าความเป็นกรด-เบสสูงจะให้การดูดซับมากขึ้น

ง.) **อุณหภูมิของระบบ** เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับทางเคมีจะมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่ช่วยเร่งสร้างพันธะเคมีให้เกิดเร็วขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าลดลง เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิมิมีผลต่อค่าการละลายของตัวถูกละลาย สำหรับตัวถูกละลายบางชนิดจะมีค่าการละลายเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความสามารถในการดูดซับของตัวถูกละลายประเภทนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าของอุณหภูมิ

จ.) **ระยะเวลาที่ของไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ** การดูดซับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ของไหลสัมผัสกับตัวดูดซับจนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุดและมีค่าคงที่เมื่อเวลามากขึ้น

ฉ.) **ตัวทำละลาย** ผลของตัวทำละลายต่อการดูดซับอาจเกิดขึ้นมาจากแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลายหรือแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลายและตัวดูดซับ และแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับผิวของตัวดูดซับ

ช.) **หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว** ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีจะมีลักษณะทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวแตกต่างกัน โดยหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดจะพบเมื่อคาร์บอนทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสจะพบเมื่อบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนมีการปลดปล่อยสารประกอบต่างๆ ออกมาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.8

2.6 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ หมายถึง สารที่มีอำนาจดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขึ้นกับลักษณะและความมีขรุขระของผิวซึ่งสามารถแบ่งสารดูดซับเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดมีขรุขระ ได้แก่ ซีโอไลท์ (Zeolite) อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina, Al_2O_3) ซิลิกาเจล (Silica gel, SiO_2) เป็นต้น และชนิดไม่มีขรุขระ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) สารพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (Super absorbent polymer - SAP) เป็นต้น โดยชนิดของตัวดูดซับมีดังนี้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2544)

2.6.1 **ซีโอไลท์** เป็นสารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) ประกอบด้วยซิลิกอน 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบในประเทศญี่ปุ่นและประเทศไต้หวัน นิยมใช้ในการดูดซับความชื้น กลิ่น เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์รวมทั้งแยกไอออนของแอมโมเนียหรือธาตุของโลหะหนักออกจากน้ำและสารสังเคราะห์ มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมาก สามารถดูดซับสารที่ขนาดเล็กกว่า 4 อังสตรอม

2.6.2 **อะลูมินากัมมันต์** สังเคราะห์ขึ้นโดยกำจัดน้ำออกจากอะลูมินาไฮเดรต ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) มีพื้นที่ผิวประมาณ 150-500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 15-60 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดซับความชื้นหรือแก๊สที่มีขั้วออกจากแก๊สไฮโดรคาร์บอน

2.6.3 **ซิลิกาเจล** สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยากำจัดน้ำออกจากกรดซิลิซิก (Silicic acid) หรือปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) กับกรดซัลฟูริก ในทางการค้ามี 2 แบบ คือ แบบ A มีพื้นที่ผิวประมาณ 650 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2-3 อังสตรอม และแบบ B มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 450 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 7 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากแก๊ส

2.6.4 **ถ่านกัมมันต์** สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่าน ถ่านหิน กะลาตาลโตนด เป็นต้น ในทางการค้ามี 4 แบบคือ แบบผงมีขนาดอนุภาคประมาณ 15-25 ไมโครเมตร นิยมใช้เพื่อกำจัดสีออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายขาว การผลิตน้ำดื่ม เป็นต้น แบบเม็ดมีขนาดอนุภาคประมาณ 4-6 มิลลิเมตร นิยมใช้เพื่อดูดซับแก๊สหรือของเหลวได้ เช่น ใช้ในการฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ ใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น แบบโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมากเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผงหรือเป็นเม็ดก็ได้ มักใช้เพื่อดูดซับแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สออกซิเจนจากอากาศ และแบบไฟเบอร์ สังเคราะห์จากฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) พอลิไธคลิกรีน (Polyacrylic resin) วิสโคสเรยอน (Viscous rayon) ลักษณะทั่วไปคล้ายตาข่ายที่มีช่องว่างประมาณ 7-15 ไมโครเมตร นิยมใช้ผลิตหน้ากากหรือใช้ในการนำสารละลายที่ใช้แล้วกลับใช้ใหม่ ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดต่อไปในหัวข้อ 2.7

2.7 ถ่านกัมมันต์

2.7.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

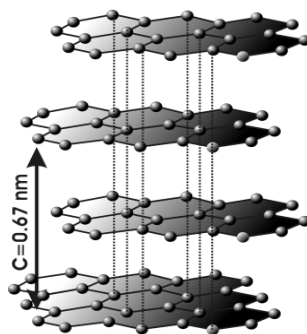
สมบัติในการดูดสีในของเหลวของถ่านกัมมันต์เป็นที่ทราบกันมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 15 และสมบัติในการดูดแก๊สมีผู้บันทึกไว้ในปี ค.ศ.1785 ในปี ค.ศ.1811 มีนักวิทยาศาสตร์ท่านหนึ่งพบว่าถ่านที่ได้จากการเผากระดูกสัตว์สามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านซึ่งได้มาจากไม้ จึงนิยมนำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวบริสุทธิ์กันมาก และได้มีการพัฒนาต่อจนกระทั่งปี ค.ศ.1822 มีผู้พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาของผลสมระหว่างเลือดสัตว์กับขี้เถ้า (Potash) มีสมบัติในการดูดสีมากกว่าถ่านกระดูกประมาณ 20-50 เท่า แต่ไม่สามารถผลิตได้มากพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานได้ ต่อมาประมาณ ค.ศ.1900 นักวิทยาศาสตร์ชื่อ Ostreyko ชาวโปแลนด์ คิดค้นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใหม่โดยเผาถ่านในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกวิธีหนึ่งใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา ซึ่งนับเป็นผู้ริเริ่มให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ชื่อต่างๆ เช่น เอฟพอนิท (Eponit) ผลิตขึ้นในยุโรปในปี ค.ศ.1909 นอริท (Norit) ผลิตในปี ค.ศ. 1911 และคาร์โบราฟฟิน (Carboraffin) ผลิตในปี ค.ศ.1915 และในอเมริกาได้ผลิตฟิลท์ชาร์ (Filtchar) ขึ้นในปี ค.ศ.1913 และได้มีการปรับปรุงและเปลี่ยนชื่อเรียกใหม่ไปเรื่อยๆ ถ่านที่ผลิตขึ้นเหล่านี้ได้มีการศึกษาถึงการนำไปใช้ในการดูดสี ฟอกสี ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งใช้ได้ดีกว่าถ่านกระดูกมาก

สมบัติในการดูดกลิ่นและแก๊สของถ่านกัมมันต์ เริ่มเป็นที่สนใจกันในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ซึ่งมีการนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ จากจุดนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจในสมบัติการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดลองโดยวิธีต่างๆ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันแก๊สพิษ เพราะมีลักษณะพองและเบา และจำเป็นต้องใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผู้พยายามผลิตถ่านชนิดใหม่ที่มีความหนาแน่นมากขึ้น สำหรับใช้ดูดซับแก๊สโดยเฉพาะ ซึ่งต่อมาเมื่อสงครามสิ้นสุดลง การค้นคว้าก็บรรลุผลสำเร็จ และมีผู้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นการดูดไอของสารละลาย ดูดไอเบนซินจากแก๊สอื่นๆ โดยถ่านที่ผลิตจากไม้ขี้เลื่อย ฟิท ลิกไนท์ และกากที่เหลือจากการทำเยื่อกระดาษจากเยเซลลูโลส จะได้ถ่านที่มีลักษณะพองและเบาเหมาะสำหรับการทำน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้ฟอกของเหลว ส่วนกะลามะพร้าวจะได้ถ่านที่ใช้ในการดูดซับแก๊สได้ดี (Chemviron Carbon, 2013: online)

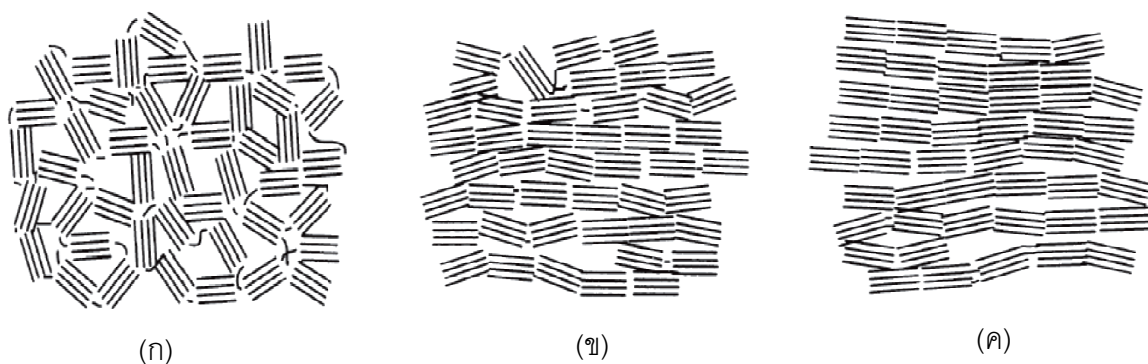
2.7.2 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีชื่อภาษาอังกฤษว่า แอคทีฟคาร์บอน (Active carbon) หรือ แอกทีเวตเตดคาร์บอน ซึ่งเป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน แต่ถ้าหากศึกษาด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) หรือศึกษาโครงสร้างจากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุ โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึกอยู่บ้าง แต่ไม่สมบูรณ์เหมือนกับแกรไฟต์ จากสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์แตกต่างจากถ่านชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านลิกไนท์ ถ่านโค้ก ถ่านไม้ หรือแกรไฟต์ ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก มีความจุในการดูดซับสูง โครงสร้างเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous structure) และมีความว่องไวในการดูดซับสูง โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นที่ผิวหน้าและการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ประกอบด้วยแผ่นระนาบชั้นแกรฟีน (Graphene layers) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างอะตอมคาร์บอนรูปหกเหลี่ยม แสดงดังภาพที่ 2.7 ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ เช่น ซิลิกาเจล จึงทำให้ดูดซับสารปนเปื้อนได้มากกว่า (ปรินทร, 2551)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับภาวะในการผลิต เช่น อุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ความร้อน โดยแฟรงคลิน (Franklin) ได้แบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างผลึก ได้แก่ โครงสร้างที่ไม่เป็นแกรไฟต์ (Non-graphitizing (isotropic)) โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์บางส่วน (Partially graphitizing) และโครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ (Graphitizing) ที่อุณหภูมิการกระตุ้นมากกว่า 2,500 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2.8 (Mochida และคณะ 2006) โดยถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้รูพรุนหรือโครงสร้างภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสูง และมีความสามารถในการดูดซับสูงด้วยกัน การวัดพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดไว้ หรือการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Desotec Activated Carbon, 2013: online)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ (ก) ไม่เป็นแกรไฟต์ (ข) เป็นแกรไฟต์บางส่วน และ (ค) เป็นแกรไฟต์ (Mochida และคณะ 2006)

2.7.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์ ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ

ก.) ชนิดของตัวกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน
- การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ มักมีรูพรุนขนาดเล็ก

ข.) ขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 2 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย
- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และผลิตยา

ค.) ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดซับสารในสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์
- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษหรือไอระเหย

ง.) ชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (Gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท Hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ หรือถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง
- สำหรับดูดซับสี (Color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้เผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านจากแกลบ ถ่านหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล
- สำหรับดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่างๆ เช่น ทอง เงิน แพททินัม และแร่ เป็นต้น ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านหินลิกไนต์เป็นส่วนใหญ่

จ.) รูปร่างลักษณะ

- ชนิดผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรกร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นในสารละลาย ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 แสดงดังตารางที่ 2.5

- ชนิดเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

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

หมายเหตุ AWWA = American Water Works Association

ตารางที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

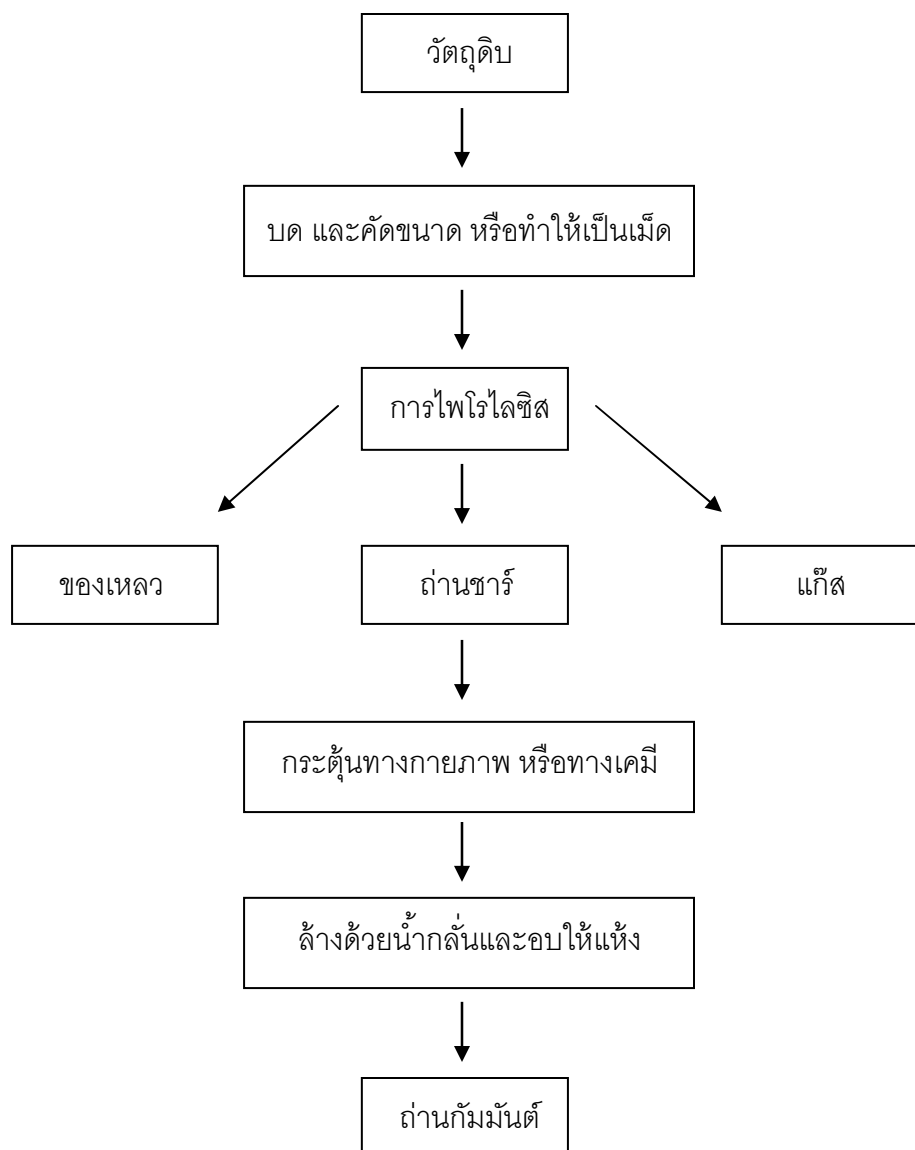
คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	
ความชื้น ร้อยละ 5 ไม่เกิน	8	
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20	AWWA B600
ความแข็ง (Abration resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	

2.7.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น ไม้ ถ่านหินลิกไนต์ และกะลามะพร้าว เป็นต้น โดยทั่วไปกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น (Activation)

ก.) **วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์** วัสดุที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ชี้เลื่อย ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูกหรือเขาสัตว์ เป็นต้น การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยากก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปทำการคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาด

วัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจคือกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ซึ่งวิธีจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ การฝังกลบ การเผา และการนำมาทำปุ๋ยสำหรับการเกษตร ซึ่งมีข้อเสีย เช่น การฝังกลบจะมีปัญหาด้านการไม่มีที่ดินมากเพียงพอสำหรับการฝังกลบ และถ้าพื้นที่บริเวณดังกล่าวเป็นทางผ่านของน้ำใต้ดินอาจจะก่อให้เกิดปัญหาจากการนำน้ำใต้ดินนั้นมาใช้ในการบริโภค รวมทั้งการฝังกลบต้องคำนึงถึงการรั่วของระบบซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ตามมาอีกด้วย จึงมีแนวความคิดที่จะหาวิธีการใหม่เพื่อลดข้อด้อยของวิธีการเหล่านั้น คือ การสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดการ และลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นแก่สิ่งแวดล้อม วิธีการที่น่าสนใจก็คือ “กระบวนการไพโรไลซิส” เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้ความร้อนสูง ในภาวะไร้อากาศ ทำให้เกิดการแตกของพันธะในโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาวกลายเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่สั้น ส่วนที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนระเหยได้กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง บางส่วนที่สามารถควบแน่นก็กลายเป็นของเหลวซึ่งเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Bio oil) ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ส่วนองค์ประกอบคาร์บอนที่ระเหยไม่ได้ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งจะกลายเป็นถ่านชาร์ และถ่านนำถ่านชาร์ไปกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีแล้ว ก็จะกลายเป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับทั้งของเหลวและแก๊สได้เป็นอย่างดี (Izrail และ Mathai, 2006)

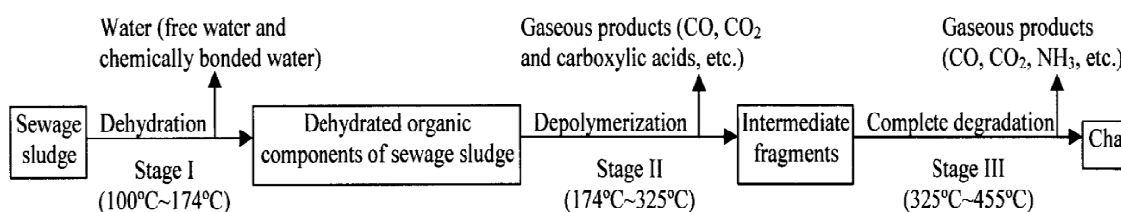


ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Demirbas, 2009)

ข.) การทำให้เป็นถ่านหรือการไพโรไลซิส ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส (ภาพที่ 2.9) อาจกล่าวได้ว่าการไพโรไลซิสเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น ทำได้ง่ายโดยการเผาในภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส การไพโรไลซิสเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็น

ขั้นตอนที่เริ่มทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีความพรุน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน (ภาพที่ 2.10) ดังนี้

- การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 174 องศาเซลเซียส
- การไพโรไลซิสโดยเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์ในโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิ 174 ถึง 325 องศาเซลเซียส
- การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก เกิดในช่วงอุณหภูมิ 325 ถึง 455 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.10 กระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย (Xiaoge และ Jeyaseelan, 2001)

ลักษณะของถ่านชาร์หรือถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการไพโรไลซิสควรมีลักษณะคือ มีสีดำสม่ำเสมอ (Uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp) และปราศจากผงฝุ่นและซี้ไถ้

ค.) การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวของถ่านมีความว่องไวมากขึ้นโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุที่เป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active centers) และทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน ประสิทธิภาพในการกระตุ้นขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนการกระตุ้น (Mukherjee และคณะ, 1947) การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการกระตุ้นโดยการใช้สารเคมี ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในภาวะที่มีออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียคือต้องล้าง

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นแสดงดังตารางที่ 2.7

- 2) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ การเปลี่ยนแปลงขนาดรูพรุน เป็นต้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น แก๊สที่นิยมใช้ในการออกซิไดส์ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (Superheated steam) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สไนโตรเจน (N₂) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวก็ได้ แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดส์ ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นทางเคมี (700-1,200 องศาเซลเซียส)

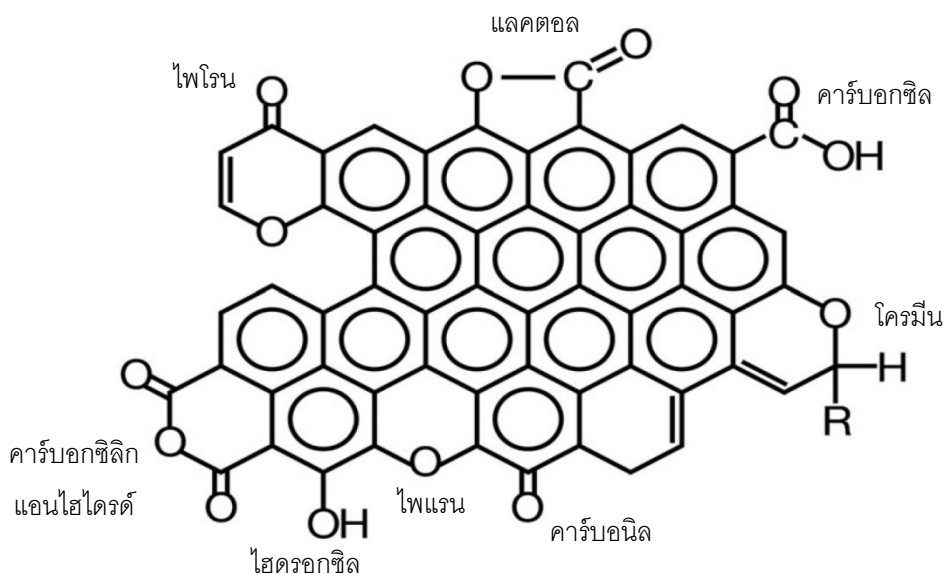
ตารางที่ 2.7 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ (Carrott และคณะ, 2005; Smith และคณะ, 2009)

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K ₂ CO ₃)
กรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K ₂ S)
กรดไนตริก (HNO ₃)		โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)		ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl ₂)
กรดบอริก (H ₃ BO ₃)		

2.8 หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนของถ่านกัมมันต์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.5.2 แล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะและหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (Oxygen containing surface functional groups) กล่าวคือถ้าบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐานซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะเกิดเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะมีความสามารถในการดูดซับได้

แต่ก็มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่ายเช่นเดียวกัน แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแกร่งกว่าหรือมีพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โอกาสที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า (Carlos และ Jose, 2001)



ภาพที่ 2.11 หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บนขอบของระนาบชั้นแกรไฟน์ (Carlos และ Jose, 2001)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในภาวะที่ไม่เสถียร ซึ่งพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะก่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันหลาย หมู่บนขอบ (Edge) ของระนาบชั้นแกรไฟน์ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพพื้นผิวเป็นกรด (Acidic oxygen functional groups) จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิล (Carboxyl) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) แลคโตน (Lactone) และคาร์บอกซิลิกแอนไฮไดรด์ (Carboxylic anhydride) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวก (Positive charge) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพผิวเป็นเบส (Basic oxygen functional groups) จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (Carbonyl) โครมีน (Chromene) ไพแรน (Pyran) อีเทอร์ (Ether) และแลคตอล (Lactol) โดยมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับที่มีประจุลบ (Negative charge) (Pereira และคณะ, 2003)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงแตกต่างกัน กล่าวคือหมู่คาร์บอกซิลและหมู่แลคโตนจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟีนอล (Phenol) ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 700 องศาเซลเซียส หมู่คาร์บอนิลและอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอนิลจะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และหมู่ไฮดรอกซิลจะสลายตัวเป็นโมเลกุลของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส (Jankowska และคณะ, 1991; Faria และคณะ, 2004) ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์ให้มีความเฉพาะเจาะจงมากขึ้นก็จะทำให้ลดปริมาณการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ ซึ่งจะเป็นการลดขนาดของระบบบำบัดและลดการสูญเสียถ่านกัมมันต์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Carrott และคณะ (2005) ศึกษาการควบคุมขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกไม้โอ๊ค (Cork oak) ด้วยวิธีไพโรไลซิสภายใต้ภาวะที่แตกต่างกัน สารกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ผลของสารกระตุ้นทั้ง 5 ชนิด ความเข้มข้นของสารกระตุ้น อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่านกัมมันต์ ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการไพโรไลซิส จากผลการทดลองพบว่าเปลือกไม้โอ๊คที่นำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรของรูพรุนสูงซึ่งอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น ความกว้างรูพรุนจาก 0.7 นาโนเมตรเพิ่มขึ้นเป็น 2.2 นาโนเมตร แต่เมื่อใช้สารกระตุ้นชนิดเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต) จะมีความกว้างของรูพรุนอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1.3 นาโนเมตร เนื่องจากสารกระตุ้นที่ชนิดเบส จะไม่มีการเชื่อมโยงของโครงสร้างเพื่อให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขนาดใหญ่ (Large gabs) แต่จะเกิดการสลายตัวของคาร์บอนอะตอมที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของชั้นแกรไฟิน ทำให้ความกว้างของรูพรุนมีขนาดน้อยกว่าแต่มีการกระจายตัวของรูพรุนสูง ในส่วนของการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิส จะทำให้ปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้สารกระตุ้นชนิดเบส และเมื่อใช้สารกระตุ้นชนิดกรดฟอสฟอริก ปริมาตรรูพรุนจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์ควรเตรียมให้เหมาะสมกับงานที่นำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับ

ตัวอย่างเช่นการดูดซับของเหลวต้องมีการกระจายรูพรุนของไมโครพอร์จำนวนมาก โดยการใช้สารกระตุ้นชนิดกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิต่ำเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

Liu และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับกลีเซอรอลจากน้ำที่ได้จากการล้างไบโอดีเซลโดยใช้ตัวดูดซับต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ แร่ดินเหนียว (Clay minerals) ซีโอไลต์จากธรรมชาติและสังเคราะห์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีการดูดซับกลีเซอรอลสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส และวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดไนตริกต่อความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอล จากผลการทดลองพบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลิก ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล แลคโตนิก และฟีนอลิก แต่การปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส จะเป็นการทำลายหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้และเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริกจะมีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวเพิ่มมากขึ้นและเมื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอล พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริก และเมื่อนำไปหาไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นไอโซเทอมแบบแลงเมียร์หรือเป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบชั้นเดียว พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_{max}) ของถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยวิธีการให้ความร้อนสูงที่ 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ปรับปรุงพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริก เท่ากับ 1.84, 1.29 และ 0.77 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ

Manosak และคณะ (2010) ศึกษาการเพิ่มควมบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี โดยทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อแยกกรดไขมัน กลีเซอรอลและเกลือ จากนั้นนำกลีเซอรอลที่ได้จากการแยกชั้นมาสกัดด้วยสารมีซิว และทำการกำจัดสีโดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาพบว่าการใช้กรดฟอสฟอริกปรับความเป็นกรด-เบสเป็น 2.5 และใช้โพพานอลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 ในการสกัด จะได้ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 95.7 และเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 200 กรัมต่อลิตร พบว่าจะได้ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 96.2

Lim และคณะ (2011) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนแบบเมโซพอร์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์ม (Palm shell) นำมาปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยกรดฟอสฟอริก โดยเน้นการศึกษาปริมาตรของรูพรุน และความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ การกระตุ้น

ด้วยสารเคมีจะทำภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน (Self-generated atmosphere) และทำการคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 นาที อัตราส่วน 3:1 (กรดฟอสฟอริกต่อถ่านกัมมันต์) พบว่าถ่านกัมมันต์ให้ผลได้ร้อยละ 48 ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1.9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว BET เท่ากับ 1,956 ตารางเมตรต่อกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวรูพรุนแบบเมโซพอร์ทั้งหมดร้อยละ 75 โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมนี้มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดเท่ากับ 438 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับเมทิลีนบลูจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเข้าได้กับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งมี R^2 เท่ากับ 0.9998 ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีการดูดซับบนพื้นผิวเป็นการดูดซับทางเคมี

Gurten และคณะ (2012) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ได้จากของเสียในการผลิตไบชาโดยใช้สารกระตุ้นโพแทสเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนท์ เวลาในการคาร์บอนไนท์ อัตราส่วนและเวลาในการกระตุ้น พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 1.0 และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนท์ที่ 900 องศาเซลเซียส จะมีพื้นที่ผิว BET สูงสุดเท่ากับ 1,722 ตารางเมตรต่อกรัม แต่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนท์ที่ 800 องศาเซลเซียส จะให้สัดส่วนรูพรุนแบบไมโครพอร์มากที่สุด จึงเลือกใช้อุณหภูมินี้เป็นพารามิเตอร์ในการศึกษาตัวแปรต่อไป โดยพบว่าเวลาในการคาร์บอนไนท์ที่ 1 ชั่วโมงและเวลาในการกระตุ้นสารเคมี 24 ชั่วโมง ให้ผลผลิตของถ่านกัมมันต์พื้นที่ผิวเท่ากับ 1,125 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 900 องศาเซลเซียส สัดส่วนรูพรุนแบบเมโซพอร์จะเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนท์และอัตราส่วนของสารกระตุ้นส่งผลต่อการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

Mahapatra และคณะ (2012) ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากการไพโรไลซิสกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วย ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ผสมกรดซัลฟิวริก และซิงค์คลอไรด์ผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนของสารกระตุ้น เวลาในการกระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนท์ จากผลการทดลองพบว่า สารกระตุ้นทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองทำให้เกิดรูพรุนแบบไมโครพอร์ สารกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดความกว้างรูพรุนแบบไมโครพอร์สูง ในขณะที่การใช้สารกระตุ้นซิงค์คลอไรด์จะทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์ขนาดเล็กจำนวนมาก โดยให้ผลได้ร้อยละ 64.2

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 531.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่าการใช้สารกระตุ้นชนิดอื่นๆ เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 23.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 14.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 208.3 มิลลิกรัมต่อกรัม

Agrafioti และคณะ (2013) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสจาก 300 เป็น 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์จะลดลงจากร้อยละ 62.5 เป็นร้อยละ 28.5 พื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 13.92 ตารางเมตรต่อกรัม การกระตุ้นด้วยถ่านชาร์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 0.5 พื้นที่ผิว BET จะเพิ่มจาก 18.04 เป็น 89.92 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากการใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นสารกระตุ้นจะทำให้องค์ประกอบของเซลลูโลสในโครงสร้างของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียเกิดการสลายพันธะ ซึ่งเป็นการสร้างพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ให้มีความพรุนเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นจะมีพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นจะทำให้โครงสร้างของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียเกิดการเชื่อมโยงเป็นสารประกอบออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) และผลิตภัณฑ์พลอยได้ชนิดอื่น ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดรูพรุนแบบไมโครพอร์ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโทรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต จะมีความสามารถในการชะละลาย (Leaching) โลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 87

Gao และคณะ (2013) ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากน้ำยางดำ (Black liquor) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือลิกนิน (Lignin) โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ และเวลาในการคาร์บอนไนซ์ จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากน้ำยางดำจะมีพื้นที่ผิว BET สูงสุดเท่ากับ 2,943 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำยางดำเท่ากับ 3 อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 750 องศาเซลเซียส และเวลาในการคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง เมื่อนำไป

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีเพื่อหาชนิดของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) จะปรากฏพีคหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล แต่มีความเข้มพีคที่ต่ำกว่าน้ำยาดำที่ใช้เป็นวัสดุดิบ เนื่องจากสารกระตุ้นชนิดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อาจเกิดการระเหยหรือสลายตัวไปที่อุณหภูมิสูง โดยหมู่ฟังก์ชันที่มีความเข้มพีคสูงได้แก่หมู่อีเทอร์ (Ether) ซึ่งอาจเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดโครมิน และไพแรน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบปรับสภาพให้มากกว่าร้อยละ 95 โดยในการทดลองได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ และภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้รวมถึงขั้นตอนการทดลองแสดงได้ดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 การไฟโรไลซิสกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและการคาร์บอนในซ์ถ่านชาร์

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

3.1.2 การกระตุ้นถ่านชาร์และการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

1. เครื่องเขย่าแนวราบ (Orbital shaker) ยี่ห้อ CTL รุ่น SK3
2. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Binder รุ่น ED115
3. ตะแกรงร่อน (Sieve) เบอร์ 10 (2 มิลลิเมตร) เบอร์ 18 (1 มิลลิเมตร) เบอร์ 60 (0.25 มิลลิเมตร)
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Sibata รุ่น WJ-20
6. กรวยกรองแบบสุญญากาศ (Buchner funnel)

7. ขวดกรอง (Suction flask)
8. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
9. ขวดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 100 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
10. กรวยแยกสาร (Separatory funnel) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
11. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และ เบอร์ 42
12. กระดาษลิตมัส ยี่ห้อ MACHEREY-NAGEL pH-Fix 0-14
13. โกร่งบดสาร

3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอล

1. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี Bruner-Emmet-Teller (BET) ยี่ห้อ Quantachrome Corporation รุ่น Autosorb-1
2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V530
3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890A

3.2 วัสดุดิบ

กากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากบริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 (ก) กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย และ (ข) กากตะกอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว

กลีเซอรอลดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำ แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 กลีเซอรอลดิบที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

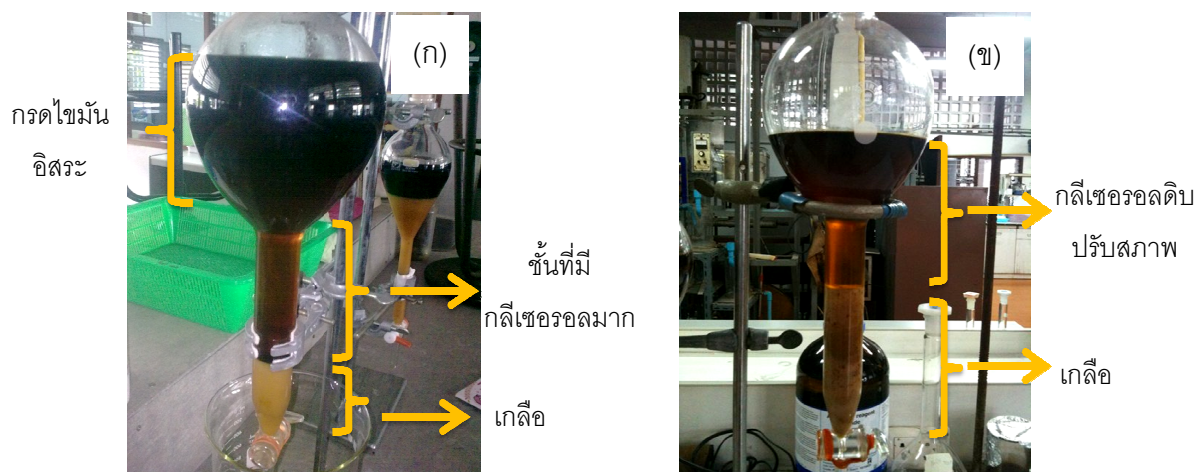
1. แก๊สไนโตรเจน (N_2 , 99.99%, Praxair)
2. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, AR grade, Ajax Finechem)
3. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4 , 85%, AR grade, Qrec)
4. โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3 , AR grade, Loba Chemie)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, Carlo Erba)
6. โซเดียมเมตาเพอร์ไอโอดีต ($NaIO_4$, AR grade, Fisher Chemical)
7. เอทิลีนไกลคอล ($C_2H_6O_2$, AR grade, Qrec)
8. โซเดียมฟอร์มเมต ($NaCHO_2$, AR grade, Ajax Finechem)
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, AR grade, Carlo Erba)
10. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3 , AR grade, Loba Chemie)
11. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$, AR grade, Loba Chemie)

12. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4 , 96%, Mallinckrodt Chemical)
13. โซเดียมไทโอซัลเฟต ($(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$, AR grade, Ajax Finechem)
14. ไอโอดีน (I_2 , AR grade, Ajax Finechem)
15. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI, AR grade, Ajax Finechem)
16. โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3 , AR grade, Ajax Finechem)
17. เฮกเซน (C_6H_{14} , AR grade, Qrec)
18. ไดเอทิลอีเทอร์ ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, AR grade, Qrec)
19. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
20. โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue)
21. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phynolphthalein)
22. เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)
23. ถ่านกัมมันต์ทางการค้า จากบริษัท Panreac Quimica UK

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การปรับสภาพเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบ

กลีเซอรอลดิบที่ใช้ในการศึกษานี้จะผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2.5 (ภาพที่ 3.3(ก)) เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้น จากนั้นเทแยกสารชั้นบนและกรองแยกเกลือชั้นล่างออกจะได้สารชั้นที่มีกลีเซอรอลมาก (Glycerol-rich layer) จากนั้นนำสารดังกล่าวมาปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เท่ากับ 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร (ภาพที่ 3.3(ข)) กรอกแยกตะกอน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพไปวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปน ความเข้มข้น ความหนาแน่น และความหนืด (ภาคผนวก ก)



ภาพที่ 3.3 (ก) การปรับสภาพกลีเซอรอลดิบด้วยกรดฟอสฟอริก และ (ข) โซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร

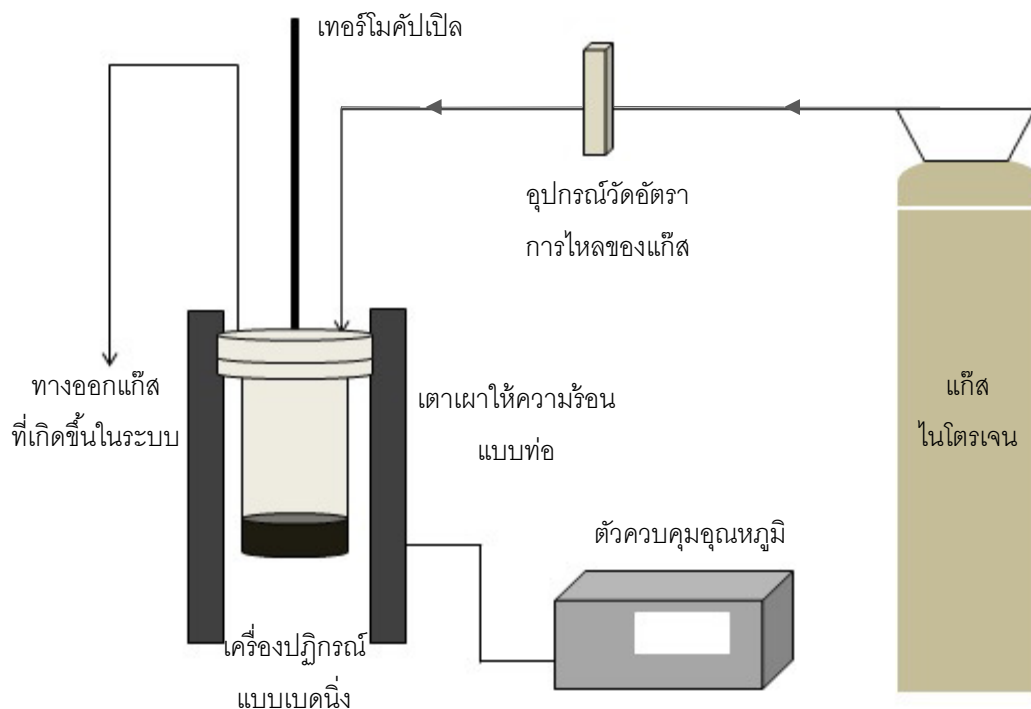
3.4.2 การเตรียมตัวอย่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งถูกปั่นเป็อนด้วยกรวดทรายขนาดเล็ก (ภาพที่ 3.1(ก)) นำมาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาสิ่งปนเป็อนดังกล่าวออก และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ (ภาพที่ 3.1(ข)) จากนั้นนำมาบดให้มีขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 18

3.4.3 การไพโรไลซิสกากตะกอน

1. ชั่งน้ำหนักกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการทำความสะอาดและอบให้แห้งแล้วในหัวข้อ 3.4.2 ประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ภาพที่ 3.4)
2. ทำการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ จาก 105 องศาเซลเซียส ไปที่ 400 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ทิ้งให้เย็นก่อนนำออกจากเตาเผา
3. นำถ่านชาร์ที่ได้มาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร และร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 60

4. อบถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บในโถดูดความชื้น เพื่อนำไปทำการกระตุ้นต่อไป
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชาร์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3172-3175) เพื่อหาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว (ภาคผนวก ข)



ภาพที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสำหรับการไฟโรไลซิสกากตะกอนและการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาร์

3.4.4 การกระตุ้นถ่านชาร์

การกระตุ้นเป็นวิธีการเพิ่มรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน หรือพื้นที่ผิวให้กับถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระตุ้นเรียกว่าถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้ทำการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้ความร้อน และการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้สารเคมี 3 ชนิด วิธีดำเนินงานมีดังนี้

1. การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน

- (ก) นำถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในหัวข้อ 3.4.3 ไปคาร์บอนไนซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนต่อเนื้อที่อุณหภูมิดังกล่าว เป็นเวลา 30 นาที
- (ข) ทิ้งตัวอย่างให้เย็นก่อนนำออกจากเตาเผา แล้วนำมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีค่าความเป็นกรด-เบส คงที่
- (ค) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน
- (ง) วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ (ภาคผนวก ข) ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (oxygen-containing surface functional groups) โดยใช้วิธี Boehm titration (Chen และคณะ, 2002) (ภาคผนวก ค) ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตาม ASTM D4607-94(2006) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธี Bruner-Emmet-Teller (BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ปริมาณรูพรุนรวม (Total pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameters) ด้วยวิธี Nitrogen Adsorption Isotherm ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน
- (จ) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เป็น 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส

2. การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางเคมี

- (ก) ชั่งน้ำหนักถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในหัวข้อ 3.4.3 ประมาณ 10 กรัม บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- (ข) เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์โดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนัก 10.0 กรัม (คิดเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และ

- ถ่านชาร์เท่ากับ 1) ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วปรับให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร
- (ค) เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มี ถ่านชาร์อยู่ และนำไปเขย่าที่อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง
- (ง) กรองแยกถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ
- (จ) นำถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารเคมีไปคาร์บอนไนซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ให้ความร้อนภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตรา การให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ ให้ความร้อนต่อเนื่องที่อุณหภูมิดังกล่าว เป็นเวลา 30 นาที
- (ฉ) ทิ้งตัวอย่างให้เย็นก่อนนำออกจากเตาเผา แล้วนำมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความ เข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนมีค่าความเป็นกรด-เบส คงที่
- (ช) นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่าน กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี
- (ซ) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ (ภาคผนวก ข) วิเคราะห์หาปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของ ถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ค) วิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ง) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET
- (ฌ) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ เป็น 2 3 4 5 และ 6 และเปลี่ยนสารที่ใช้กระตุ้นเป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ กรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้นเป็น 5 10 15 และ 25 ชั่วโมง และอุณหภูมิใน การคาร์บอนไนซ์เป็น 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4.5 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

1. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ได้จากการแยกชั้นในขั้นตอนที่ 3.4.1 มาเติมถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่
2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 90 นาที
3. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับมากรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากกลีเซอรอล
4. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มาวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปน ค่าความเข้มข้น ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด (ภาคผนวก ก)
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเวลาในการดูดซับเป็น 60 120 และ 180 นาที และความเร็วรอบในการเขย่าเป็น 150 200 และ 300 รอบต่อนาที

3.4.6 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับซ้ำ

1. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับครั้งที่ 1 มาใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วเติมถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ที่อัตราส่วนระหว่าง KOH และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร ที่อัตราเร็วรอบและเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม
2. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 2 มากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากกลีเซอรอล
3. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับครั้งที่ 2 ไปทำการดูดซับซ้ำเป็นครั้งที่ 3 ในลักษณะเดิมด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH เช่นเดียวกับข้อ 1
4. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับมากรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากกลีเซอรอล

5. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับซ้ำครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 มาวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปน ค่าความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด (ภาคผนวก ก)

3.4.7 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1. นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่ในเฮกเซน (Hexane) และไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 ถึง 3
2. นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยกถ่านกัมมันต์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1
3. อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ
4. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพในขั้นตอนที่ 3.4.1 มาเติมถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที และเวลาในการดูดซับ 120 นาที
5. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับมากรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากกลีเซอรอล
6. นำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งเจือปน ความชื้น ค่าความหนาแน่น และค่าความหนืด (ภาคผนวก ก) ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาคผนวก ค) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี BET

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

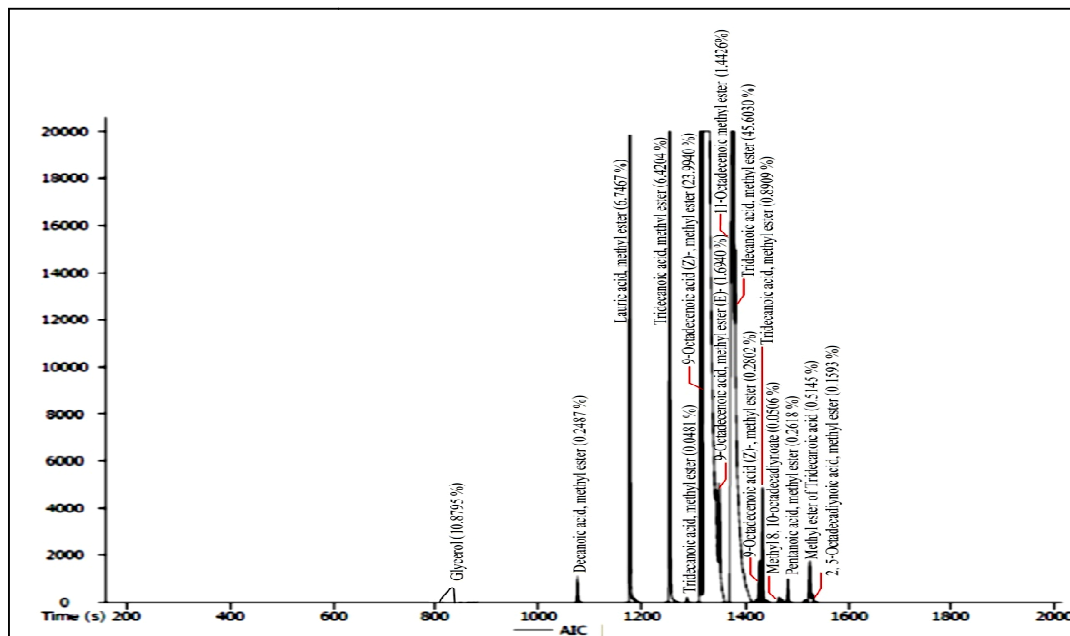
งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรม สิ่งทอ ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ความร้อนและการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ เวลาดูดซับสารกระตุ้น และอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า นอกจากนี้ยังศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดด้วยกันคือ กลีเซอรอลดิบที่มาจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ใช้แล้วเป็นสารตั้งต้น และกากตะกอนบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งมีสมบัติดังนี้

4.1.1 สมบัติของกลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

ลักษณะทางกายภาพของกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้นจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำ มีค่าความเป็นกรด-เบส สูงในช่วง 8.0-9.0 (ตารางที่ 4.1) มีความหนาแน่นและความหนืดต่ำ มีปริมาณกลีเซอรอลต่ำ มีปริมาณสารปนเปื้อนและเถ้าสูงกว่ามาตรฐาน BS 2621:1979 ประมาณ 3.66 และ 3.62 เท่า ตามลำดับ กลีเซอรอลดังกล่าวจึงยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อนำกลีเซอรอลดิบไปทดสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรเมตรีเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบ พบว่ากลีเซอรอลดิบจะประกอบด้วยกรดไขมันอิสระและอนุพันธ์ของกรดไขมันอิสระเป็นจำนวนมาก ได้แก่ Tridecanoic acid, Oleic acid, Lauric acid, Elaidic acid, Pentanoic acid, Decanoic acid, 11-Octadecenoic methyl ester, 2,5-Octadecadienoic acid methyl ester และ Methyl 8,10-octadecadienoate (ภาพที่ 4.1)



ภาพที่ 4.1 ชนิดของสารในกลุ่มลิเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันใช้แล้วเป็นสารตั้งต้น

เมื่อนำกลีเซอรอลดิบมาทำการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นตามงานวิจัยของ Manosak และคณะ (2010) โดยการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2.5 พบว่ากลีเซอรอลดิบที่ผ่านการปรับปรุง (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “กลีเซอรอลดิบปรับปรุง”) เมื่อเปรียบเทียบกับกลีเซอรอลดิบจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน มีความเข้มข้นลดลง 1.12 เท่า ความหนืดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 57.4 เซนติสโตกส์ ตามลำดับ มีค่าลดลงเล็กน้อย และปริมาณสารปนเปื้อนลดลง 1.04 เท่า (ตารางที่ 4.1) โดยชนิดของกรดไขมันอิสระในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงจะมีเพียง Tridecanoic acid, Oleic acid, Lauric acid, Decanoic acid และ 11-Octadecenoic methyl ester (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากกรดที่เติมในกลีเซอรอลดิบจะแตกตัวให้โปรตอนและเข้าไปแทนที่โซเดียมในสารประกอบสบู่ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจึงแยกชั้นออกจากกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารมีขั้ว โดยกรดไขมันอิสระและอนุพันธ์ของกรดไขมันอิสระที่ตรวจพบจะเป็นองค์ประกอบหลักที่พบได้ในน้ำมันพืชที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามแม้ว่าการปรับปรุงกลีเซอรอลดิบด้วยกรดจะสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบได้ แต่กลีเซอรอลดิบปรับปรุงที่ได้ยังคงมีความบริสุทธิ์ต่ำกว่ามาตรฐาน BS 2621:1979 จึงต้องมีการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นและกลีเซอรอลดิบปรับสภาพปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์

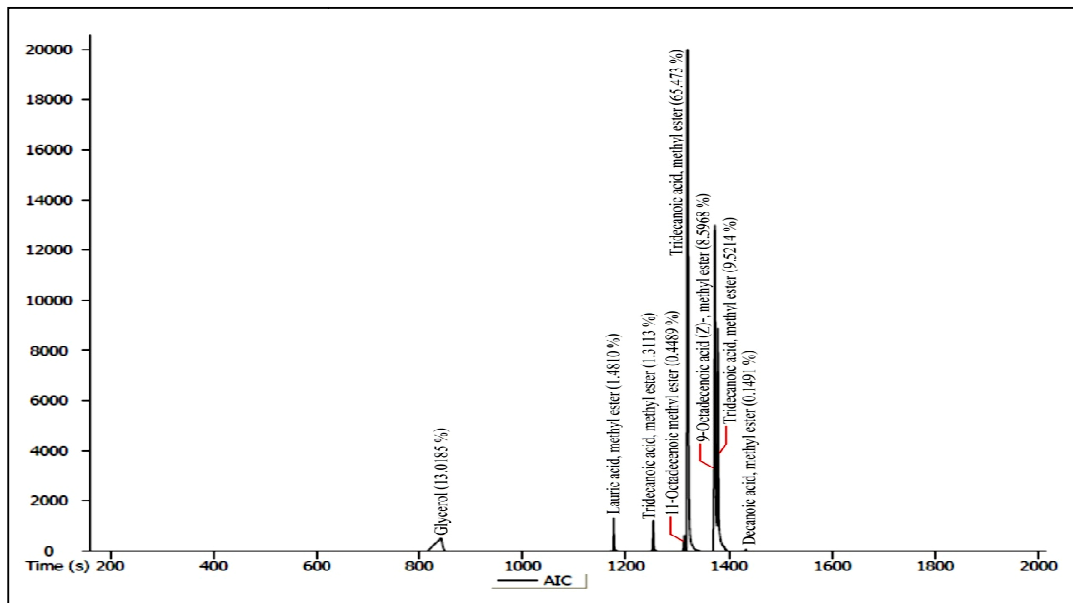
องค์ประกอบ	BS 2621:1979 (Ooi และ คณะ, 2001)	กลีเซอรอลดิบ	กลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพ ¹	กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความ บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วย		กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่ม ความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วย	
				ถ่านกัมมันต์ทาง การค้า ²	ถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากตะกอนบำบัดน้ำ เสีย ³	การดูดซับซ้ำ ครั้งที่ 1 ³	การดูดซับซ้ำ ครั้งที่ 2 ³
ความเป็นกรด-เบส		8.0-9.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
กลีเซอรอล (ร้อยละ)	≥ 80	27.2 ± 0.84	35.7 ± 0.27	88.6 ± 0.63	93.0 ± 0.57	95.09 ± 0.35	96.9 ± 1.34
เถ้า (ร้อยละ)	≤ 10	36.2 ± 0.20	29.1 ± 0.51	11.4 ± 1.03	7.0 ± 0.82	4.91 ± 0.15	3.1 ± 1.2
สารปนเปื้อน (ร้อยละ)	≤ 10	36.6 ± 0.64	35.2 ± 0.78	-	-	-	-
ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.261	1.01 ± 0.062	1.21 ± 0.02	1.264 ± 0.006	1.277 ± 0.006	1.270 ± 0.023	1.275 ± 0.027
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)		49.2 ± 0.20	57.4 ± 1.03	89.6 ± 0.79	104.7 ± 0.54	105.8 ± 0.38	106.9 ± 0.14
สี (หน่วยสี Pt-Co)		172,857 ± 5,580	154,038 ± 4,477	3,654 ± 22	2,314 ± 141	713 ± 74	673 ± 68

¹ กลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 2.5 และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7

² ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที

³ ถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนในซีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาดูดซับ 120 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

⁴ ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.2 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบที่ปรับปรุงสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 12.5 โมลต่อลิตร

4.1.2 สมบัติของกากตะกอนและถ่านชาร์

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส พบว่าสมบัติของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะมีปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) และเถ้าเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณมาก ส่วนคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และความชื้น (Moisture) จะมีปริมาณต่ำ เมื่อนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียไปผ่านการไพโรไลซิสจะทำให้ความชื้นและสารระเหยได้ในกากตะกอนเกิดการสลายตัว ถ่านชาร์ที่ได้จึงมีความชื้นและปริมาณสารระเหยได้ลดลง ส่งผลให้มีปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคือความชื้นและปริมาณสารระเหยได้จะลดลง 2.91 และ 2.58 เท่า ในขณะที่ปริมาณเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น 1.31 และ 7.37 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

การวิเคราะห์โดยประมาณ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	ถ่านชาร์
ความชื้น	9.53 ± 0.44	3.27 ± 0.55
เถ้า	24.40 ± 0.63	32.06 ± 0.85
สารระเหยได้	60.50 ± 0.89	23.45 ± 0.98
คาร์บอนคงตัว	5.57 ± 0.16	41.22 ± 0.44

4.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

การกระตุ้นเป็นวิธีการในการเพิ่มรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน หรือพื้นที่ผิวให้ถ่านชาร์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระตุ้นเรียกว่าถ่านกัมมันต์ งานวิจัยนี้ทำการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางกายภาพโดยใช้ความร้อน และการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งให้ผลการวิจัยดังนี้

4.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ

การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางกายภาพจะดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ภาพที่ 3.4) ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที อุณหภูมิการกระตุ้น 500-900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่ออนาที

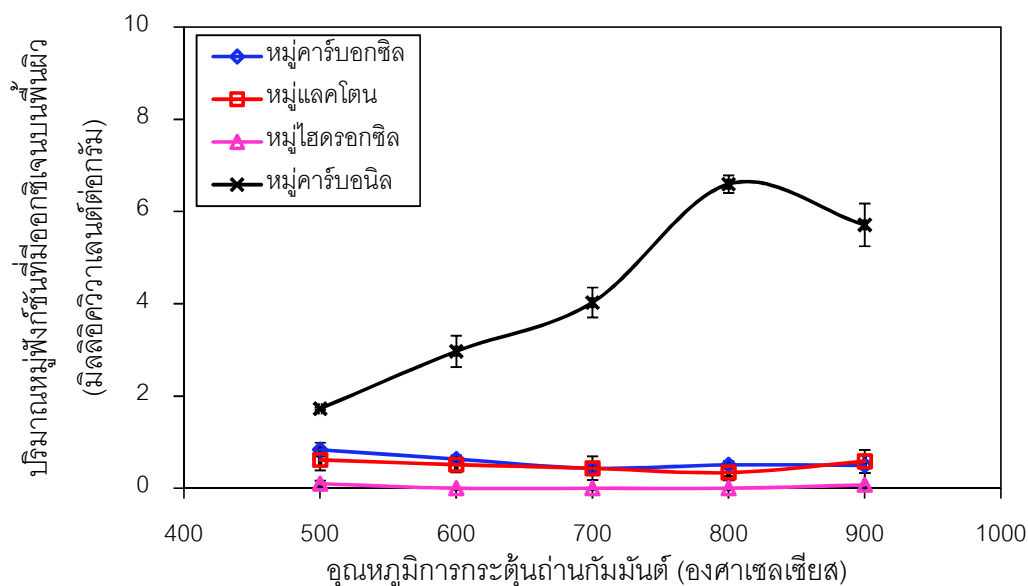
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าการเพิ่มความอุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะทำให้ความชื้น เถ้า และสารระเหยได้ลดลงจากร้อยละ 0.34 เป็น 0.17 จากร้อยละ 2.65 เป็น 1.73 และจากร้อยละ 0.95 เป็น 0.52 ตามลำดับ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่มีพันธะไม่แข็งแรงและหลุดออกไปในรูปของสารระเหยได้ ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก

โครงสร้างวงแอมติกหลักที่เหลือจะกลายเป็นโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 96.1 เป็นร้อยละ 97.6

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน

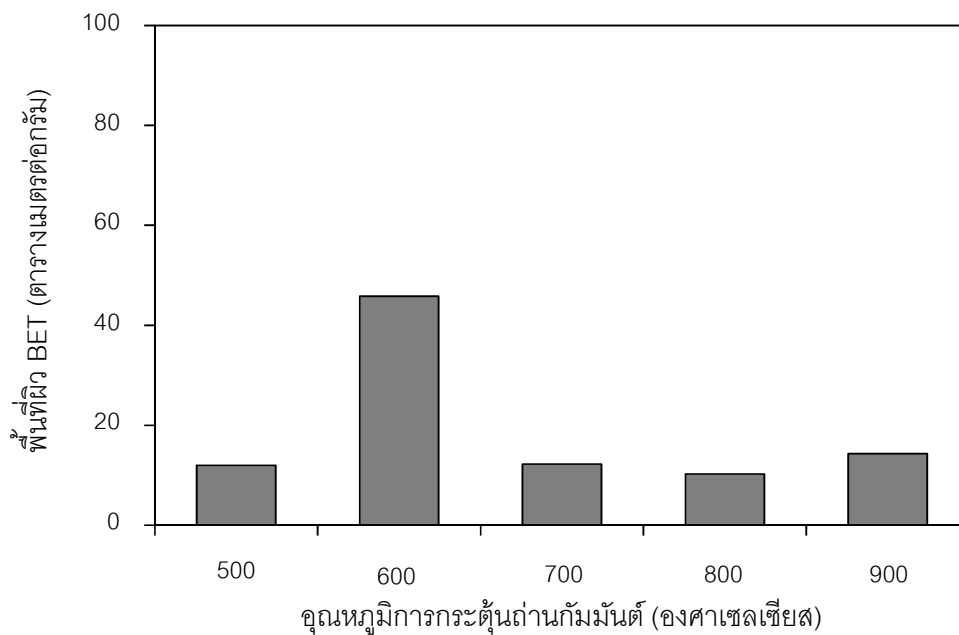
อุณหภูมิการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
500	0.34 ± 0.05	2.65 ± 0.15	0.95 ± 0.01	96.1 ± 0.11
600	0.30 ± 0.01	2.31 ± 0.04	0.83 ± 0.03	96.6 ± 0.05
700	0.26 ± 0.04	1.92 ± 0.03	0.43 ± 0.12	97.4 ± 0.13
800	0.23 ± 0.02	1.82 ± 0.03	0.49 ± 0.06	97.5 ± 0.07
900	0.17 ± 0.08	1.73 ± 0.01	0.52 ± 0.03	97.6 ± 0.04

ภาพที่ 4.3 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส พบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนที่ทุกอุณหภูมิจะให้หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่เบสหรือหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) มากกว่าหมู่กรดหรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และหมู่แลคโตน (Lactone) เนื่องจากการให้ความร้อนจะทำให้เกิดการออกซิเดชันของลิวิสออกซิเจน (Lewis oxygen) ที่อยู่ในระนาบชั้นแกรไฟเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่เบสมากกว่าหมู่กรด (Pereira และคณะ, 2003) โดยการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มจาก 1.7 เป็น 6.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 800 องศาเซลเซียส พบว่าหมู่คาร์บอนิลจะลดลง เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลจะเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิมากกว่า 850 องศาเซลเซียส (Pereira และคณะ, 2003)

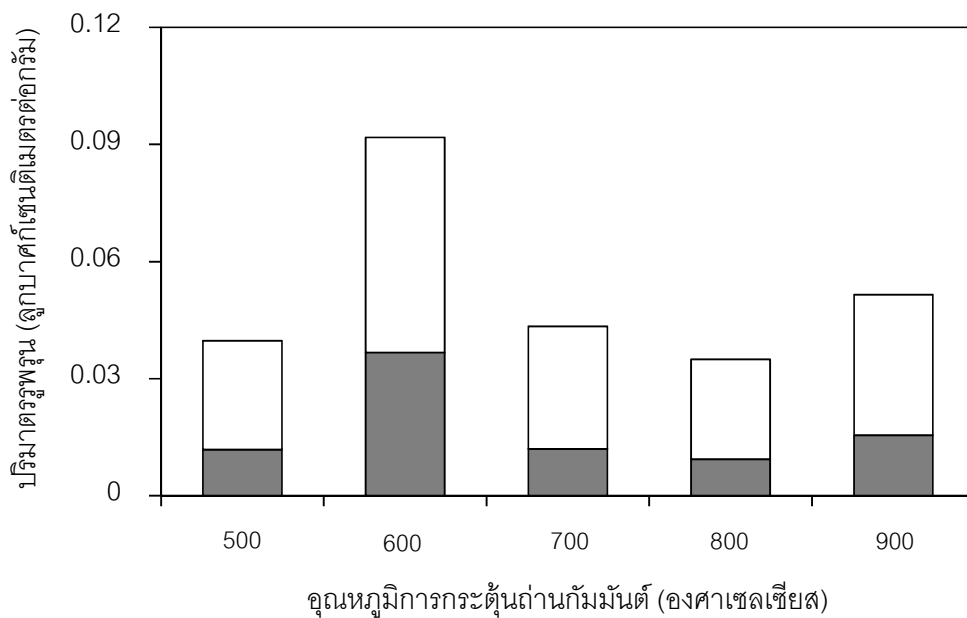


ภาพที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน

ภาพที่ 4.4-4.5 แสดงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส พบว่าการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อนไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ให้มีค่าสูงในทุกภาวะของอุณหภูมิการกระตุ้น โดยที่อุณหภูมิการกระตุ้น 600 องศาเซลเซียส ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนมีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุดเท่ากับ 45.83 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.059 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และจากภาพที่ 4.5 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์กับปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ แสดงว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้นได้



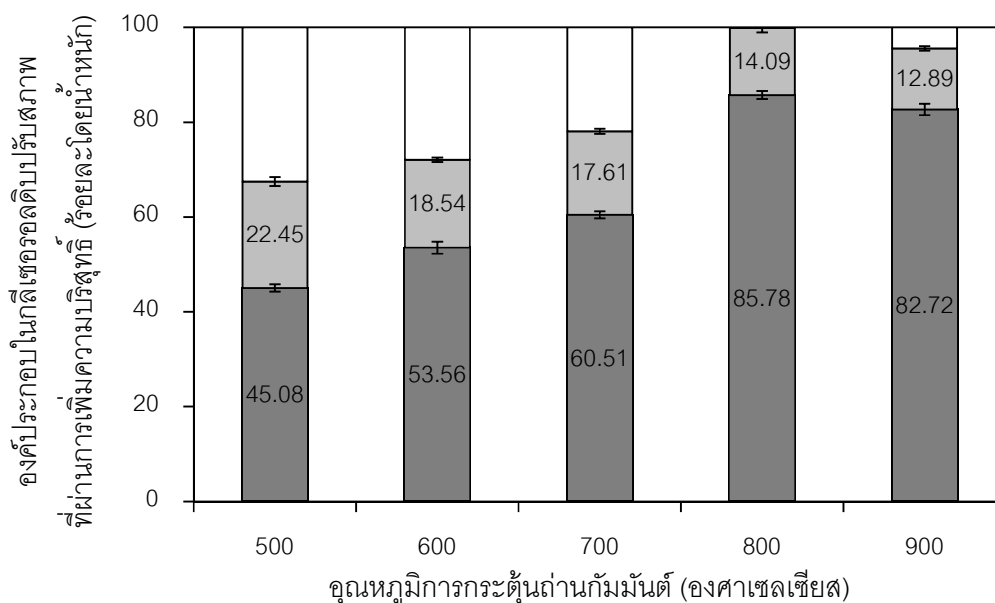
ภาพที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน



ภาพที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อ (■) ปริมาตรรื้อพูนแบบไม่ไอออน และ (□) ปริมาตรรื้อพูนแบบไอออน ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน

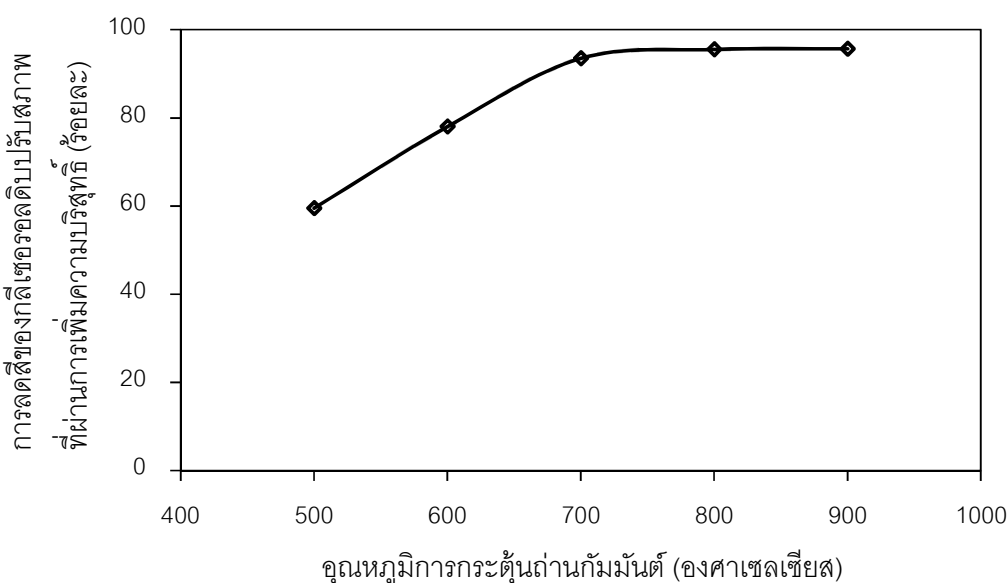
ภาพที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส จะทำให้เถ้าลดลงจากร้อยละ 22.45 เป็นร้อยละ 14.09 และสารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 32.47 เป็นร้อยละ 0.13 แต่การเพิ่มอุณหภูมิของการกระตุ้นเป็น 900 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพลดลงเหลือร้อยละ 82.72

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์กับสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละกลีเซอรอลจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่คาร์บอนิลอย่างเด่นชัด กล่าวคือเมื่อปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นร้อยละกลีเซอรอลก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ที่มีสมบัติในการรับอิเล็กตรอนได้ดี (Electron acceptor) (Epiotis, 1946; Yu และคณะ, 2005) จึงสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวหรือประจุลบ (Anionic charge) จากกรดไขมันอิสระ (R-COO⁻) ที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ ทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพลดลงความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลจึงเพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่กรดจะมีความสามารถทางประจุเป็นลบจึงไม่ส่งผลการดูดซับกรดไขมันอิสระ แต่จะดูดซับปริมาณเถ้าหรือสารประกอบจำพวกเกลือที่มีความสามารถทางประจุเป็นบวกได้ (Puziy และคณะ, 2002) ทำให้ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มลดลง



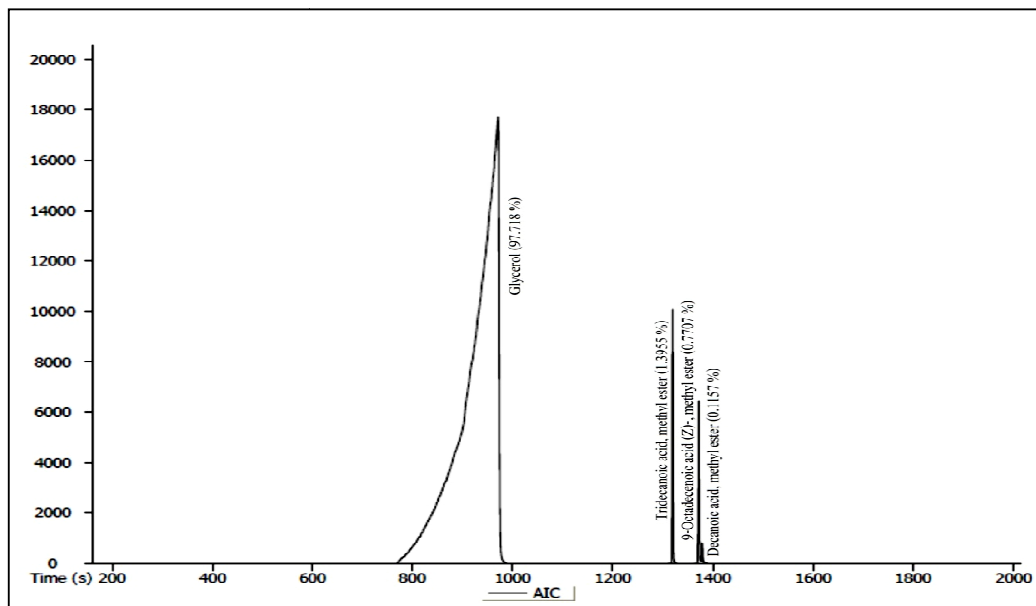
ภาพที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์: (■) กลีเซอรอล (■) เถ้า และ (□) สารปนเปื้อน

ภาพที่ 4.7 แสดงผลของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อนต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ พบว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนจะมีสีลดลงมากกว่าร้อยละ 59.5 โดยกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส จะมีการลดลงของสีมากกว่าร้อยละ 95.6 เนื่องจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณสารปนเปื้อนต่ำนั่นเอง



ภาพที่ 4.7 การลดลงของสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรมิเตอร์ พบว่ากลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะประกอบด้วย Tridecanoic acid, Oleic acid และ Decanoic acid (ภาพที่ 4.8) โดยจะเห็นได้ว่ากรดไขมันอิสระในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ จะมีชนิดลดลงเมื่อเทียบกับกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับ



ภาพที่ 4.8 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส

4.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางเคมี

4.2.2.1 ผลของสารกระตุ้นและอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์

การศึกษาชนิดของสารกระตุ้นและอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะดำเนินการโดยใช้สารกระตุ้น 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ในช่วง 1 ถึง 6 อัตราการเขย่าระหว่างการกระตุ้นเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซินเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

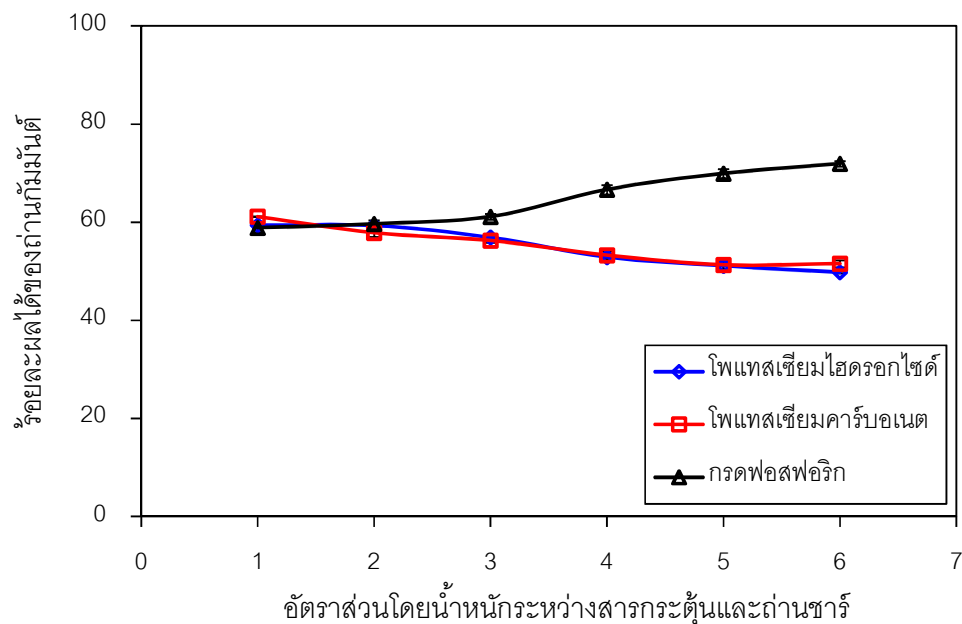
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์

สารกระตุ้น	สารกระตุ้น:ถ่านชาร์ต	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
		ความชื้น	เถ้า	สารระเหย	คาร์บอนคงตัว
KOH	1	0.40 ± 0.45	3.08 ± 0.03	0.82 ± 0.11	95.70 ± 0.23
	2	0.37 ± 0.23	2.79 ± 0.07	0.56 ± 0.03	96.27 ± 0.34
	3	0.31 ± 0.07	2.33 ± 0.19	0.46 ± 0.26	96.90 ± 0.22
	4	0.23 ± 0.05	1.94 ± 0.28	0.35 ± 0.37	97.48 ± 0.14
	5	0.21 ± 0.02	1.71 ± 0.31	0.53 ± 0.12	97.55 ± 0.56
	6	0.30 ± 0.13	1.24 ± 0.42	0.54 ± 0.33	97.92 ± 0.28
K ₂ CO ₃	1	0.34 ± 0.22	2.44 ± 0.04	0.73 ± 0.10	96.49 ± 0.59
	2	0.37 ± 0.09	2.24 ± 0.46	0.96 ± 0.26	96.44 ± 0.20
	3	0.33 ± 0.06	1.72 ± 0.58	0.81 ± 0.32	97.14 ± 0.27
	4	0.24 ± 0.12	1.42 ± 0.32	0.52 ± 0.07	97.82 ± 0.09
	5	0.23 ± 0.08	1.12 ± 0.43	0.44 ± 0.02	98.21 ± 0.35
	6	0.23 ± 0.78	1.22 ± 0.34	0.59 ± 0.26	97.96 ± 0.15
H ₃ PO ₄	1	0.33 ± 0.04	3.12 ± 0.32	1.02 ± 0.09	95.54 ± 0.60
	2	0.26 ± 0.13	3.39 ± 0.16	1.05 ± 0.27	95.30 ± 0.18
	3	0.22 ± 0.38	3.62 ± 0.24	1.06 ± 0.33	95.09 ± 0.04
	4	0.13 ± 0.11	3.87 ± 0.03	1.05 ± 0.05	94.95 ± 0.48
	5	0.24 ± 0.51	4.15 ± 0.40	1.21 ± 0.27	94.41 ± 0.16
	6	0.22 ± 0.48	4.38 ± 0.08	1.25 ± 0.15	94.14 ± 0.39

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยกระบวนการทางเคมี พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีความชื้น เถ้า และสารระเหยได้ต่ำกว่าถ่านชาร์ต และมีคาร์บอนคงตัวสูงกว่าถ่านชาร์ต เนื่องจากการกระตุ้นถ่านชาร์ตด้วยกระบวนการทางเคมีจะทำให้อินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านชาร์ตหลุดออกหรือสลายตัวไปซึ่งเป็นการเพิ่มโครงสร้างรูพรุนให้กับถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาถึงผลของอัตราส่วนของสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบโดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ได้ พบว่าความชื้น เถ้า และ

สารระเหยได้ในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต จะลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสารกระตุ้นชนิดเบสสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูง ส่วนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์จาก 1 เป็น 6 พบว่าความชื้นจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่เป็นรูปแบบในช่วงร้อยละ 0.13 ถึง 0.33 ปริมาณแก๊สและสารระเหยได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่คาร์บอนคงตัวลดลง เนื่องจากการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นจะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารประกอบประเภทฟอสเฟส (Phosphate) หรือพอลิฟอสเฟส (Polyphosphate) เชื่อมโยงโครงสร้างบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (Carrott และคณะ, 2006)

ภาพที่ 4.9 แสดงร้อยละผลได้ (Yield) ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ พบว่าร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากประมาณร้อยละ 60 เป็นร้อยละ 50 เมื่ออัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นในช่วง 1 ถึง 6 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยกรดฟอสฟอริกจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 59 เป็นร้อยละ 72 เนื่องจากสารกระตุ้นชนิดเบสซึ่งได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่จับกับโครงสร้างของถ่านชาร์ระหว่างการกระตุ้นสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อทำการคาร์บอนไนซ์ (เกศศิริ เหล่าวิชระสุวรรณ, 2552) การใช้สารกระตุ้นในปริมาณมากและทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียสารกระตุ้นและสารระเหยได้จากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ร้อยละผลได้จึงลดลง ส่วนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะทำให้เกิดสารประกอบประเภทฟอสเฟสหรือพอลิฟอสเฟสเชื่อมโยงโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Carrott และคณะ, 2006) เมื่อเพิ่มปริมาณกรดฟอสฟอริกในการกระตุ้นจึงทำให้เกิดการสะสมตัวของสารประกอบฟอสเฟสหรือพอลิฟอสเฟสบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์จึงเพิ่มขึ้น การสะสมตัวของสารประกอบฟอสเฟสหรือพอลิฟอสเฟสบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนสูงๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4



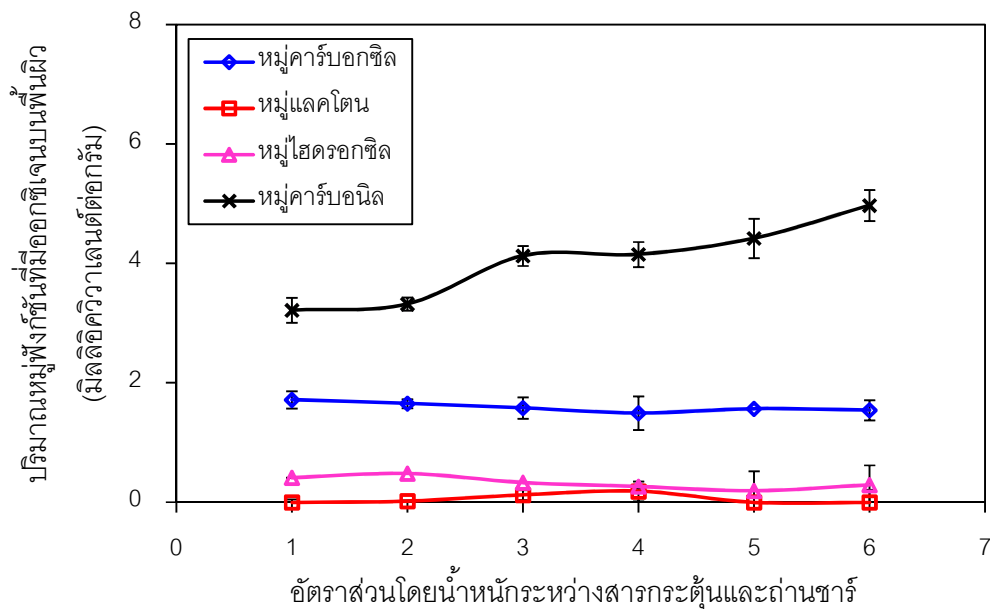
ภาพที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.10-4.12 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ในช่วง 1 ถึง 6 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีหมู่คาร์บอนิลมากที่สุดในช่วง 3.2 ถึง 4.8 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.10) หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลจะลดลงเล็กน้อยจาก 1.6 เป็น 1.4 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม และ 0.4 เป็น 0.2 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม ตามลำดับ และมีหมู่แลคโตนเพียงเล็กน้อย (< 0.07 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 6 เนื่องจากหมู่แลคโตนสามารถรวมตัวอยู่ในหมู่คาร์บอกซิล (Henry และคณะ, 2012: online) ทำให้ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันของแลคโตนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากนัก สำหรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและหมู่

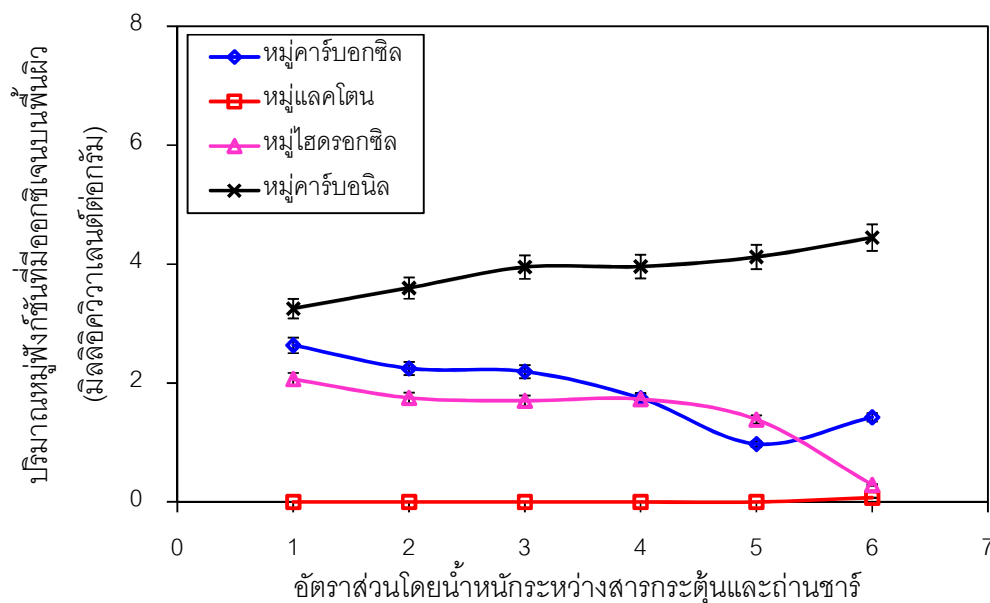
ไฮดรอกซิลลดลงเนื่องจากความเป็นกรด-เบสของหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน กล่าวคือหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่เป็นหมู่เบส (Basic oxygen functional group) ส่วนหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่เป็นหมู่กรด (Acid oxygen functional group) การเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสจึงเพิ่มปริมาณหมู่เบส หรือปริมาณหมู่แอลคาไลน์ (Alkaline group) ชนิดไพโรนและอนุพันธ์ของคีโตนชนิดไพโรนและโครมีน (Guo และ Lua, 2003) ซึ่งต่างเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอนิล แต่ไม่เพิ่มหมู่กรดหรืออาจจะลดปริมาณหมู่กรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กล่าวคือมีหมู่คาร์บอนิลมากที่สุดคือประมาณ 3.3 ถึง 4.5 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.11) และมีหมู่แลคโตนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (< 0.1 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม) ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 โดยน้ำหนัก และหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลจะลดลงจาก 2.6 เป็น 1.4 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม และ 2.1 เป็น 0.3 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนต และถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 6

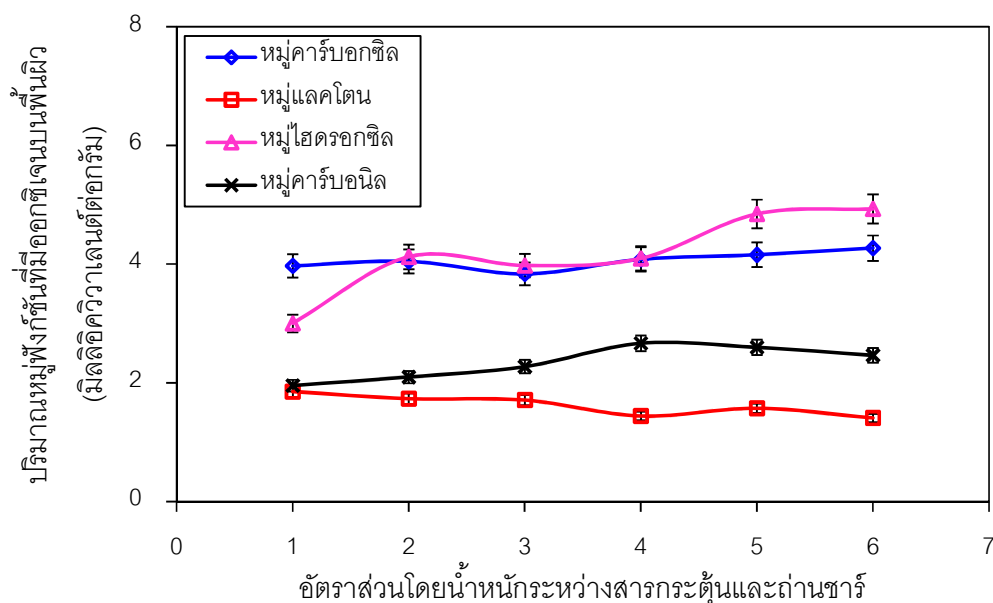
เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ดังกล่าวจะมีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลเป็นส่วนใหญ่ โดยการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์ จาก 1 เป็น 6 จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 3.0 เป็น 4.9 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม และ 3.9 เป็น 4.3 มิลลิอิกควาเลนต์ต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกรดฟอสฟอริกในการกระตุ้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณหมู่กรดหรือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่กรดพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เป็นหมู่เบส และหมู่แลคโตนที่สามารถรวมตัวอยู่ในหมู่คาร์บอกซิลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมูฟังก์ชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมูฟังก์ชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

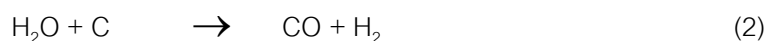
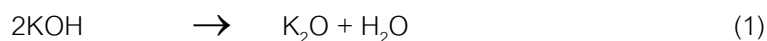


ภาพที่ 4.12 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณหมูฟังกซ์ที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.13-4.15 แสดงองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ในช่วง 1 ถึง 6 พบว่าการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทำให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 35.7 (ตารางที่ 4.1) เป็นร้อยละ 41.8 37.3 และ 36.3 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 41.8 เป็นร้อยละ 68.1 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 1 เป็น 5 (ภาพที่ 4.13) ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์มากขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์มาก ปริมาณหมูฟังกซ์ที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะหมูคาร์บอนิลจะมีมากขึ้น

(ภาพที่ 4.10) ซึ่งหมุดังกล่าวเป็นหมุ่เบสและมีสภาพผิวเป็นประจุบวก (Pereira และคณะ, 2003) จึงสามารถดูดซับสารปนเปื้อนโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระที่มีสมบัติทางประจุเป็นลบได้ ทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ลดลง ในขณะที่หมุ่แลคโตน หมุ่คาร์บอกซิล และหมุ่ไฮดรอกซิลจะไม่มีผลต่อการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพมากนักซึ่งสามารถยืนยันได้จากเปลี่ยนแปลงปริมาณที่น้อยมากหรือปริมาณที่ลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์จาก 5 เป็น 6 จะทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ลดลง (ภาพที่ 4.13) ทั้งนี้ปริมาณหมุ่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ยังเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.10) เนื่องจากโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปอาจสลายตัวเป็นโมเลกุลของน้ำดังสมการ (1) และน้ำที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยาต่อเนื้อกับอะตอมคาร์บอนเกิดเป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ดังสมการ (2) ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง (Guo และ Lua, 2003)

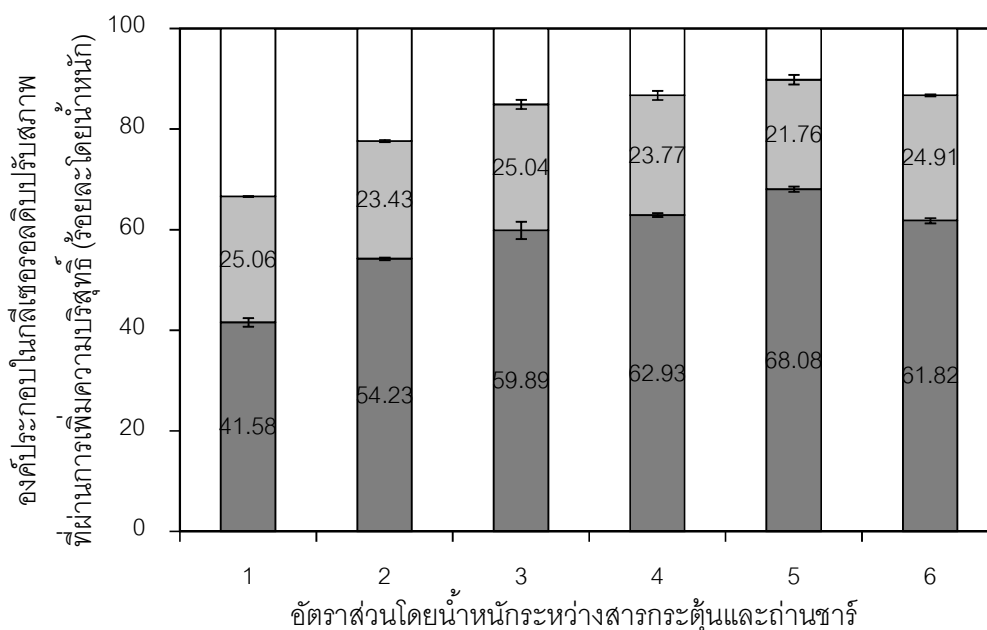


เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์จาก 1 เป็น 6 จะทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 41.9 เป็นร้อยละ 36.6 (ภาพที่ 4.14) เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์มากขึ้น ปริมาณหมุ่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนผิวของถ่านกัมมันต์โดยเฉพาะหมุ่คาร์บอนิลจะเพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 4.11) ส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจากร้อยละ 37.1 เป็นร้อยละ 51.7

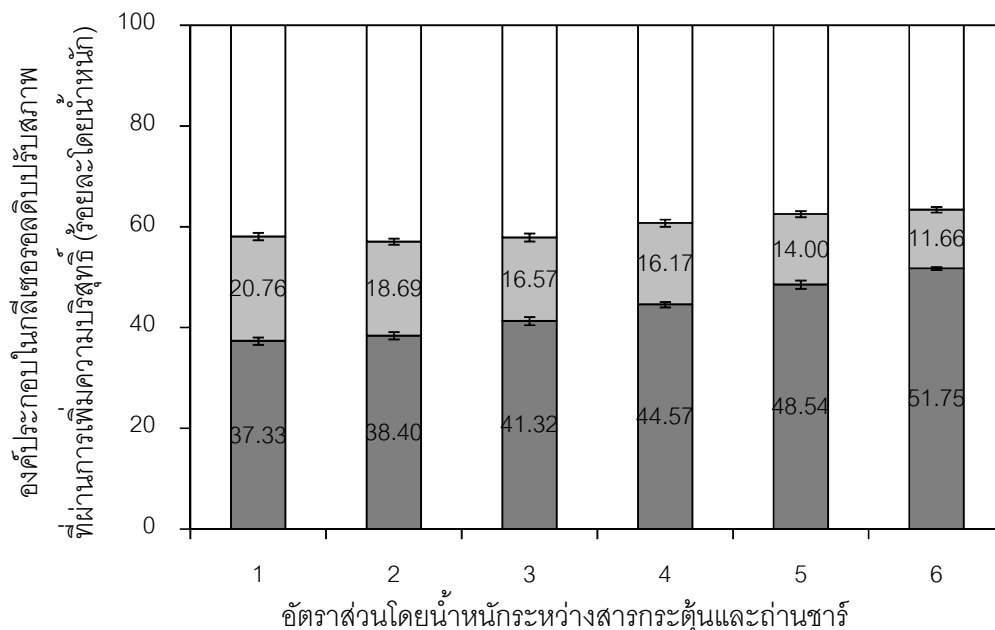
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์ในช่วง 1 ถึง 4 จะเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจากร้อยละ 36.3 เป็นร้อยละ 40.8 (ภาพที่ 4.15) อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์จาก 4 เป็น 6 จะทำให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ลดลง เนื่องจากปริมาณกรดฟอสฟอริกที่มากเกินไปจะทำให้เกิดสารประกอบประเภทฟอสเฟสหรือพอลิฟอสเฟส ซึ่งสารประเภทนี้จะจับตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ส่งผลให้การสลายตัวของสารกระตุ้นจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ระหว่าง

การคาร์บอนไนซ์เกิดขึ้นได้ยากและมีโอกาสตกค้างในรูปฟรุทของถ่านกัมมันต์ทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง (Carrott และคณะ, 2006)

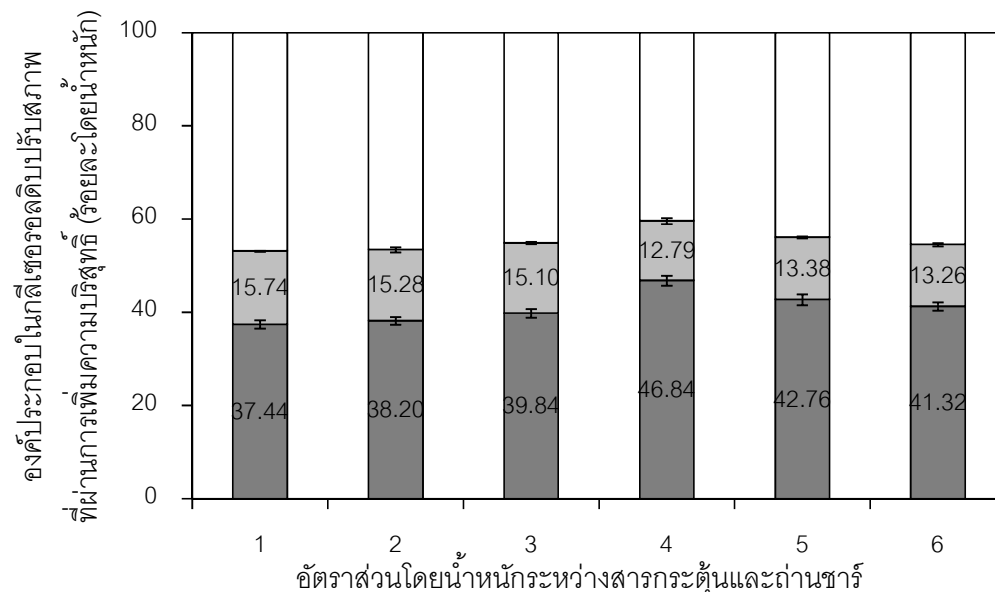
เมื่อพิจารณาผลของชนิดของสารกระตุ้นและอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ในช่วงที่ศึกษาต่อปริมาณถ่าน พบว่ากระบวนการดูดซับสามารถลดปริมาณถ่านหรือสารประกอบจำพวกเกลือในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้เล็กน้อย กล่าวคือสามารถลดปริมาณถ่านในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจากร้อยละ 29.1 (ตารางที่ 4.1) ลงเหลือร้อยละ 21.8-25.1 11.7-20.8 และ 12.8-15.7 เมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) ถ่าน และ (□) สารประกอบ

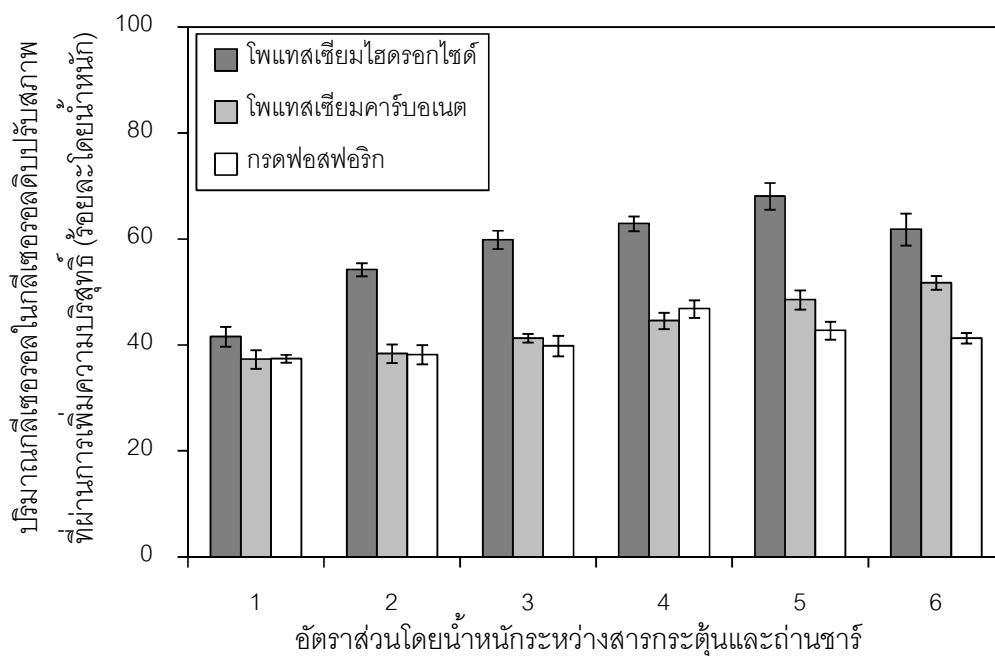


ภาพที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดีบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) ถั่ว และ (□) สารปนเปื้อน



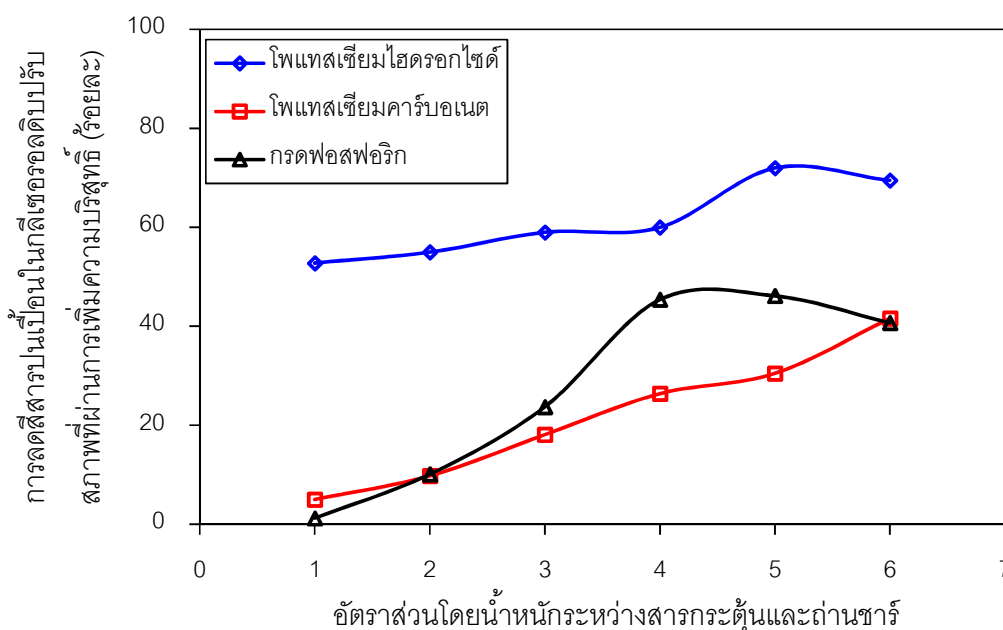
ภาพที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดีบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) ถั่ว และ (□) สารปนเปื้อน

เมื่อเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลหรือร้อยละกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีทั้ง 3 ชนิด (ภาพที่ 4.16) พบว่ากลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีความบริสุทธิ์สูงสุดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 คือร้อยละ 68.1 ส่วนกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะมีความบริสุทธิ์สูงสุดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 คือร้อยละ 51.7 และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีความบริสุทธิ์สูงสุดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 คือ ร้อยละ 48.0



ภาพที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ต่อปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.17 แสดงผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก พบว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีสีอ่อนที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริก เนื่องจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณสารปนเปื้อนในปริมาณที่น้อยกว่ากลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตและกรดฟอสฟอริก



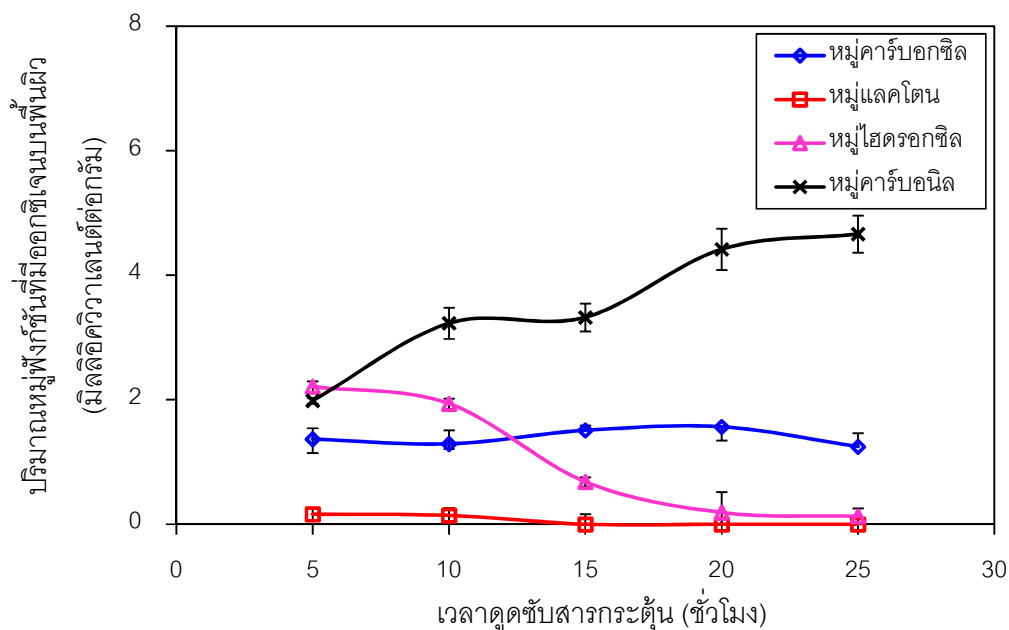
ภาพที่ 4.17 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์ตต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

4.2.2.2 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์

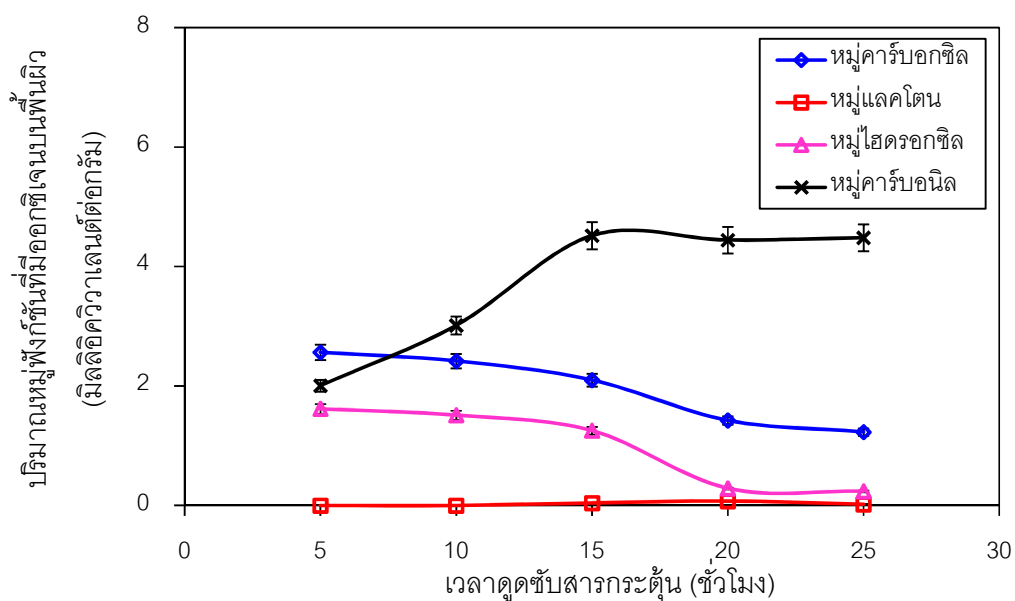
การศึกษาผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะดำเนินการโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 และ 4 ตามลำดับ อัตราการเขย่าระหว่างการกระตุ้นเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาดูดซับสารกระตุ้น 5-25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาการดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.18-4.19 แสดงผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นชนิดเบสคือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่าจะมีหมู่คาร์บอนิลมากกว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนชนิดอื่น โดยปริมาณหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาดูดซับสารกระตุ้นมากขึ้น เนื่องจากเวลาดูดซับสารกระตุ้นที่มากขึ้นจะทำให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของถ่านชาร์ได้มากขึ้น ทำให้มีปริมาณหมู่เบสเกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ส่วนหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่กรดจะมีปริมาณคงที่หรือลดลงเมื่อระยะเวลาดูดซับสารกระตุ้นสูงขึ้น สำหรับหมู่แลคโตนมักรวมตัวอยู่ในหมู่คาร์บอกซิลโดยจะปรากฏบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

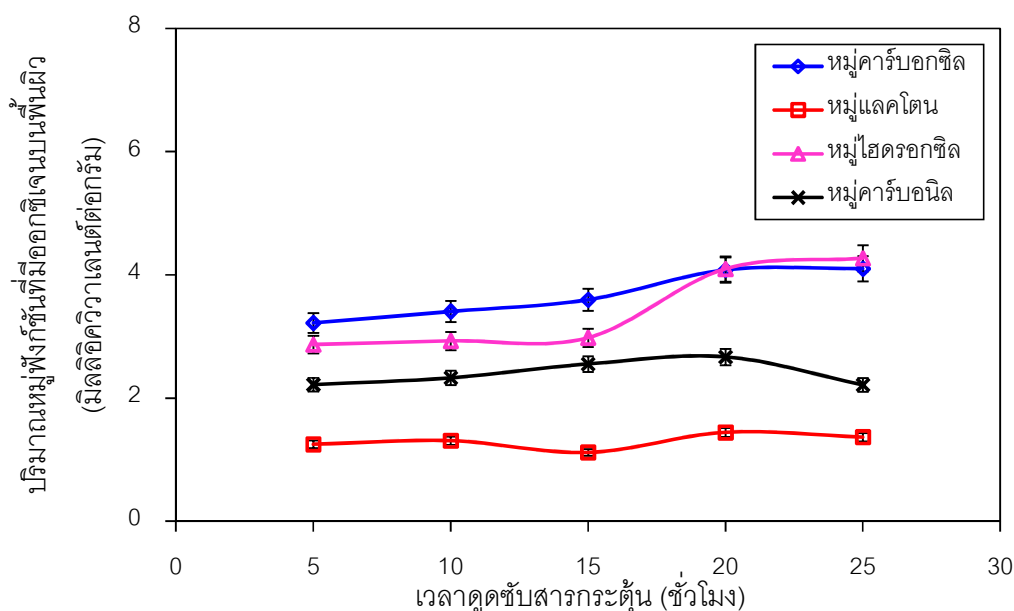
ภาพที่ 4.20 แสดงผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวที่เป็นหมู่กรด ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาดูดซับสารกระตุ้นสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาดูดซับสารกระตุ้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณหมู่กรดหรือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่กรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ในขณะที่หมู่แลคโตนมักรวมตัวอยู่ในหมู่คาร์บอกซิลและหมู่คาร์บอนิลซึ่งเป็นหมู่เบสจะมีแนวโน้มคงที่



ภาพที่ 4.18 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



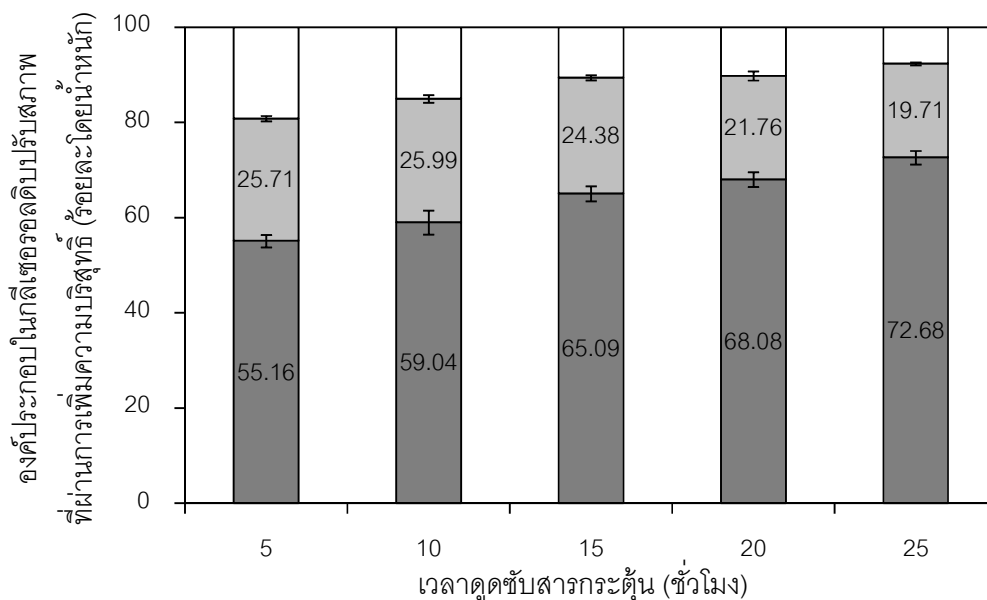
ภาพที่ 4.20 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นด้านกัมมันต์ต่อปริมาณหมูฟุ้งกึ่งชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของด้านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 4 และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการเพิ่มเวลาดูดซับสารกระตุ้นจาก 5 ชั่วโมง เป็น 25 ชั่วโมง จะทำให้เถ้าลดลงจากร้อยละ 25.71 เป็นร้อยละ 19.71 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 19.13 เป็นร้อยละ 7.61 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 47.0 เป็นร้อยละ 72.5 (ภาพที่ 4.21) ซึ่งจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมูคาร์บอนิลบนพื้นผิว (ภาพที่ 4.18)

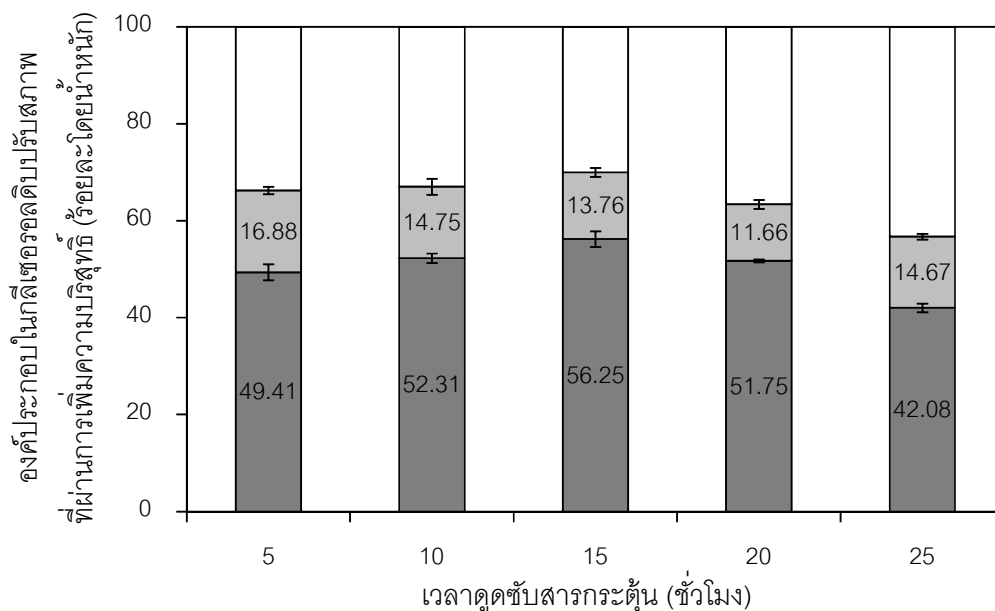
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อเวลาดูดซับสารกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ชั่วโมง เป็น 15 ชั่วโมง จะทำให้เถ้าลดลงจากร้อยละ 16.88 เป็นร้อยละ 13.76 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 33.71 เป็นร้อยละ 29.99 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.4 เป็นร้อยละ 56.3 (ภาพที่ 4.22) แต่เมื่อเพิ่มเวลามากกว่า 15 ชั่วโมง พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงเป็นร้อยละ 42.1 แม้ว่าปริมาณหมูคาร์บอนิลจะสูงในช่วงเวลาดูดซับสาร

กระตุ้นดังกล่าว (ภาพที่ 4.19) แสดงว่าเวลาที่มากเกินไปทำให้โพแทสเซียมคาร์บอเนตไปสะสมตัวบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มากและลดพื้นที่ผิวในการดูดซับสารปนเปื้อนจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ

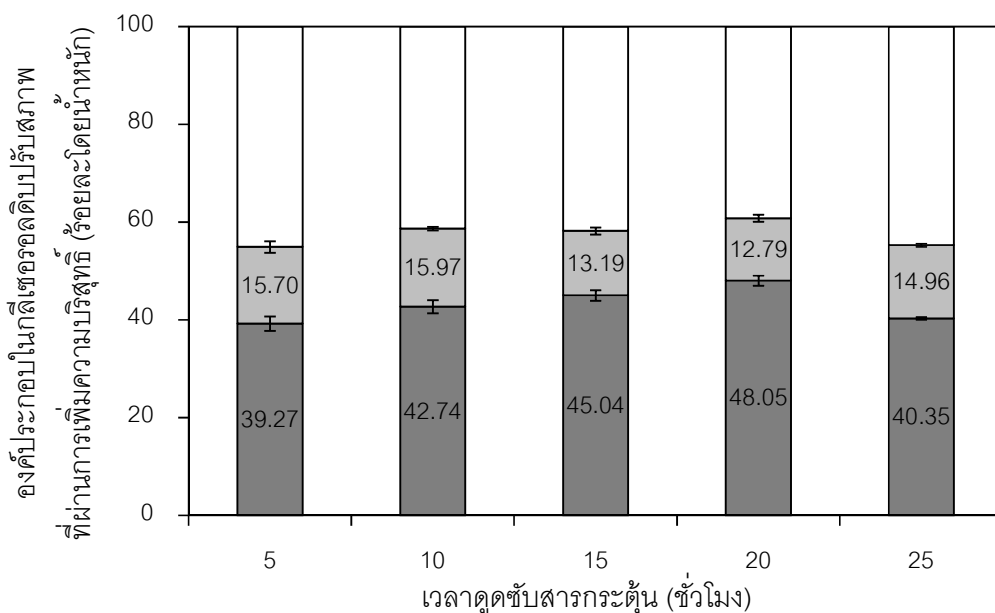
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าเมื่อเวลาดูดซับสารกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 5 ชั่วโมง เป็น 20 ชั่วโมง จะทำให้เถ้าลดลงจากร้อยละ 15.70 เป็นร้อยละ 12.79 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 45.03 เป็นร้อยละ 39.16 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 39.27 เป็นร้อยละ 48.05 (ภาพที่ 4.23) แต่เมื่อเพิ่มเวลามากกว่า 20 ชั่วโมง พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงเป็นร้อยละ 40.35 เนื่องจากปริมาณของหมู่กรด ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.20) ซึ่งหมู่ดังกล่าวมีสภาพพื้นผิวเป็นลบจึงไม่ส่งผลต่อการดูดซับกรดไขมันอิสระ ทำให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มีค่าลดลง



ภาพที่ 4.21 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) เถ้า และ (□) สารปนเปื้อน

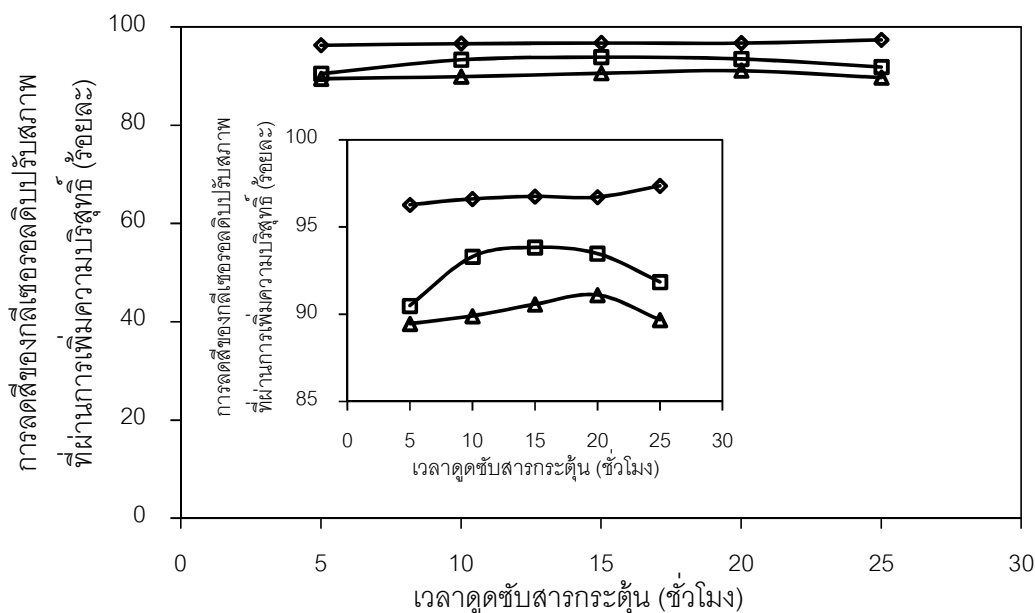


ภาพที่ 4.22 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 6 และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) ไขมัน และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.23 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 4 และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส: (■) กลีเซอรอล (■) ไขมัน และ (□) สารปนเปื้อน

ภาพที่ 4.24 แสดงผลของระยะเวลาดูดซับสารกระตุ้นต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก พบว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีต่างๆ จะมีสีลดลงมากกว่าร้อยละ 89.5 โดยกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีสีอ่อนที่สุด หรือคิดเป็นการลดลงของสีมากกว่าร้อยละ 96.3 เนื่องจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะมีปริมาณสารปนเปื้อนต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.24 ผลของเวลาดูดซับสารกระตุ้นถ่านกัมมันต์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย (◇) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (□) โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ (△) กรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 6 และ 4 ตามลำดับ และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

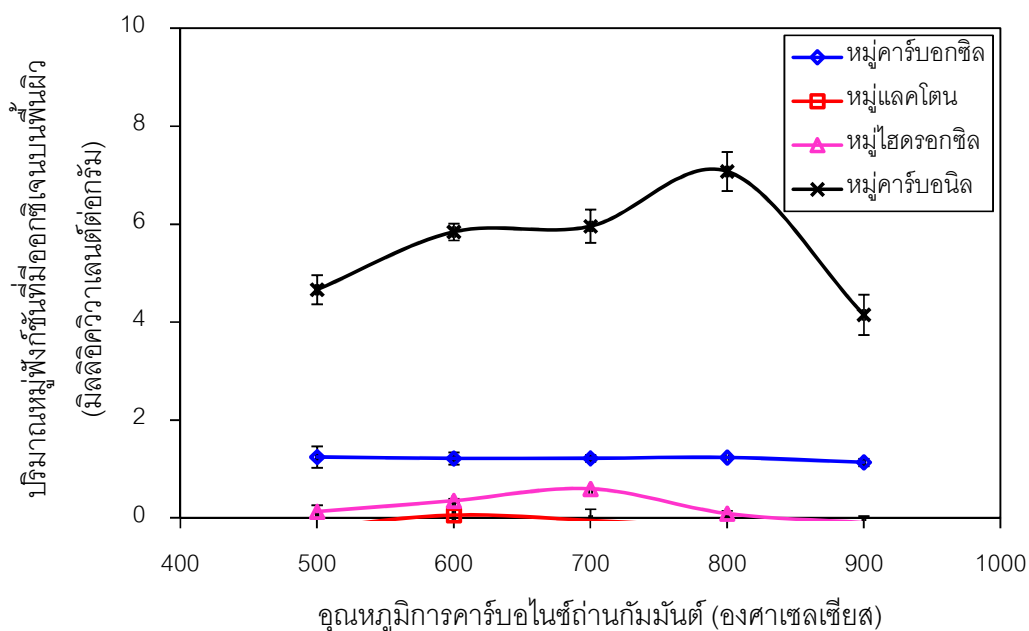
4.2.2.3 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์

การศึกษาผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะดำเนินการโดยใช้อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 ที่เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง อัตราส่วนระหว่าง

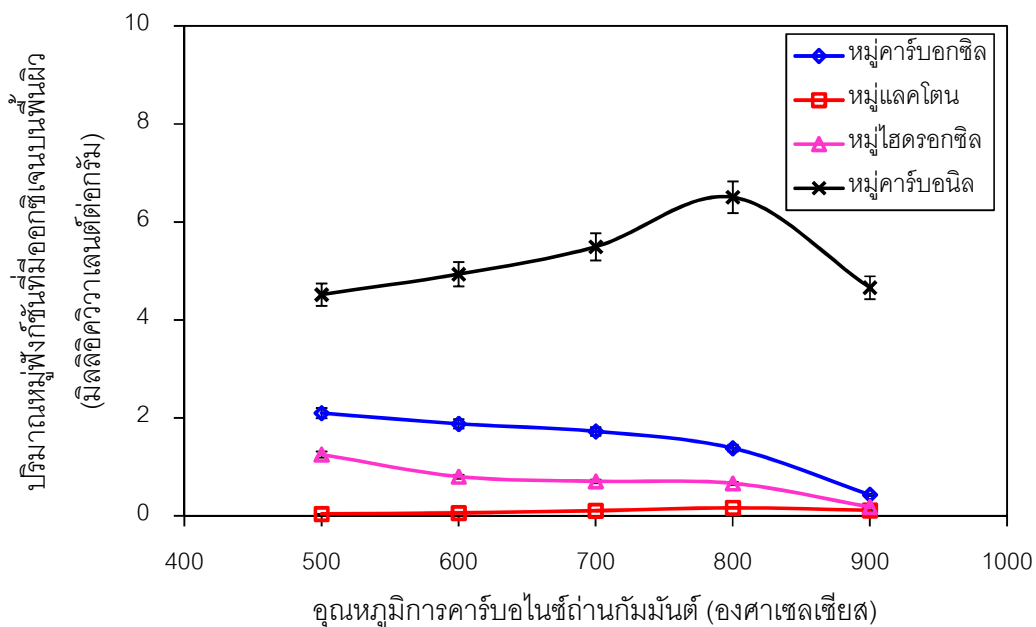
โพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 ที่เวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 ที่เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง อัตราการเขย่าระหว่างการกระตุ้นเท่ากับ 200 รอบต่อนาที และคาร์บอนไนซีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.25-4.27 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะลดลง (ภาพที่ 4.25 และ ภาพที่ 4.26) ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงแตกต่างกัน กล่าวคือหมู่คาร์บอกซิลจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส หมู่แลคโตนเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส หมู่ไฮดรอกซิลจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และหมู่คาร์บอนิลจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส (Faria และคณะ, 2004) ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน

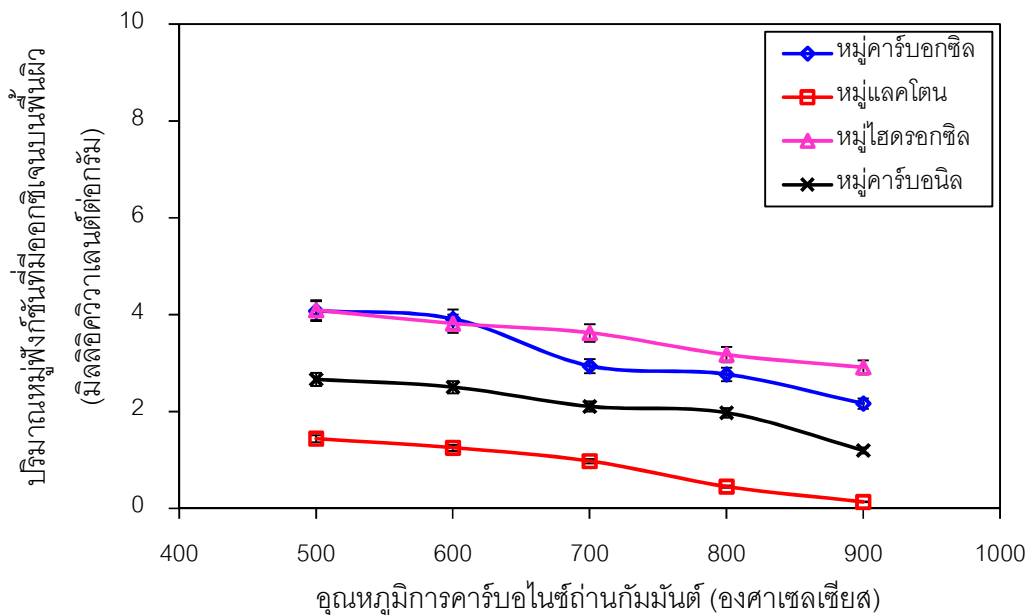
สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ภาพที่ 4.27) เนื่องจากการใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นจะทำให้โครงสร้างของถ่านชาร์เกิดการเชื่อมโยง (Cross-linked) แต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส การเชื่อมโยงดังกล่าวจะไม่เสถียรและเกิดการแตกออกของพันธะทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เกิดการหดตัว ส่งผลให้รูพรุนบนพื้นผิวและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์รวมถึงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นลดลง (Jagtøyen และ Derbyshire, 1998)



ภาพที่ 4.25 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมูฟุ้งกึ่งชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง

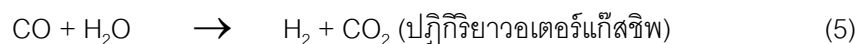
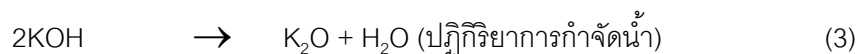


ภาพที่ 4.26 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมูฟุ้งกึ่งชั้นที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง



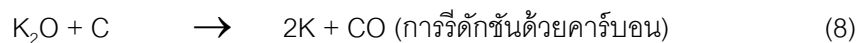
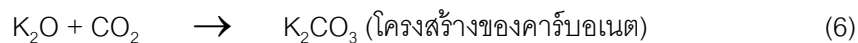
ภาพที่ 4.27 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง

ภาพที่ 4.28 แสดงพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องหลายขั้นตอน โดยโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปจะสลายตัวเป็นโมเลกุลของโพแทสเซียมออกไซด์และน้ำดังสมการ (3) และน้ำที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับอะตอมคาร์บอน (ปฏิกิริยาแก๊ส-น้ำ) ดังสมการ (4) ซึ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำ (ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ) ดังสมการ (5) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน และระเหยออกจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มมากขึ้น



อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์มากกว่า 800 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิว BET จะลดลง ขณะที่ปริมาตรรูพรุนรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา

(Ottawa และคณะ 1997; Yang และ Lua 2003) พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์มากกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของโพแทสเซียมออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และอะตอมของคาร์บอน ดังสมการ (6)-(8) เกิดเป็นโมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอะตอมของโลหะโพแทสเซียม



ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอะตอมของโลหะโพแทสเซียมจะแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอน ทำให้โครงสร้างรูพรุนระหว่างชั้นของอะตอมคาร์บอนมีความกว้างที่เพิ่มมากขึ้น (Lillo-Raodenas และคณะ 2003) ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง นอกจากนี้การคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผนังรูพรุนเกิดการพังทลายและเชื่อมต่อกันเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ลดลงและปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.29

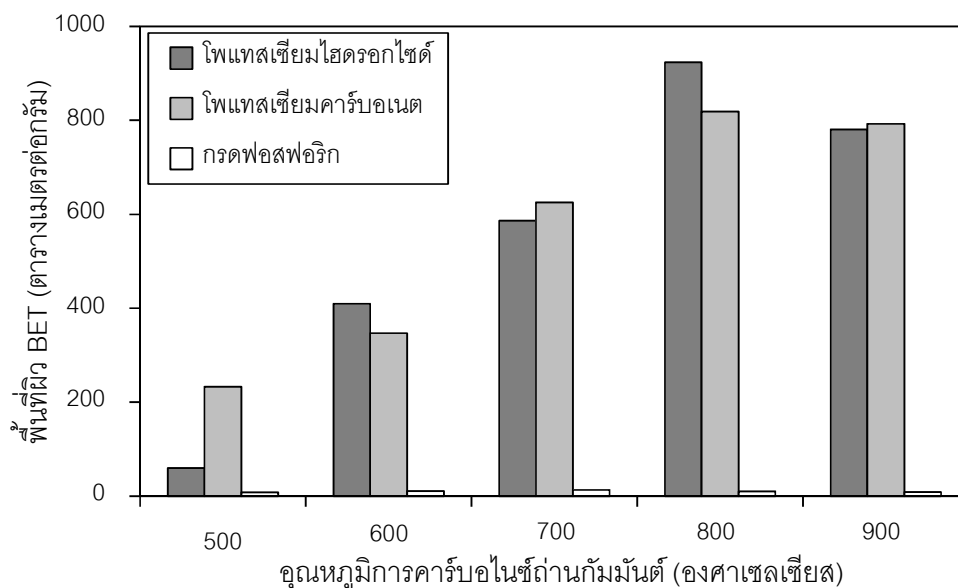
เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กล่าวคือพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.28) เนื่องจากขั้นตอนของการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์โมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับอะตอมคาร์บอน (ปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน) ดังสมการ (9) ได้เป็นอะตอมของโพแทสเซียมและมีการปลดปล่อยสารระเหยออกมาเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Muroyama และคณะ, 1996) ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างที่เกิดการเชื่อมโยงหรือส่วนที่เป็นผลึกที่อุดตันโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มมากขึ้น (Hayashi และคณะ 2002)



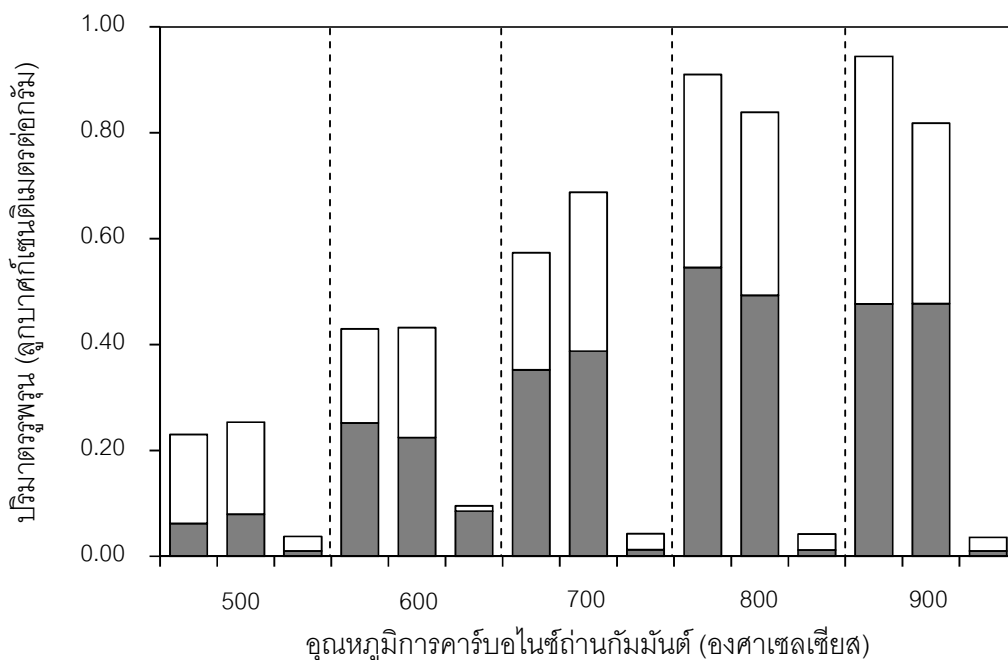
นอกจากนี้อะตอมของโพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวได้ที่อุณหภูมิสูงจึงแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอนทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Sanada และคณะ 1975) การเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จึงทำให้ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์เพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4.29) เนื่องจากผนังรูพรุนแบบไมโครพอร์จะเกิดการพังทลาย (Collapse) ระหว่างการปล่อยสารระเหยได้ออกจากโครงสร้างของ

ถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ทำให้รูพรุนขนาดเล็กขยายตัวเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์เป็น 900 องศาเซลเซียส พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะลดลง เนื่องจากอาจเกิดการหดตัวของโครงสร้างรูพรุนส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิว BET มีแนวโน้มที่ลดลง

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (ภาพที่ 4.28) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 เป็น 900 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเพิ่มพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมให้มีค่าสูงในทุกภาวะของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ โดยอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ที่ 600 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุดเท่ากับ 13.40 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.035 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และจากภาพที่ 4.29 พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์กับปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ โดยลักษณะทางกายภาพทางพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ต่ำที่สุดพบในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งที่อุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส การเชื่อมโยงของฟอสเฟสหรือพอลิฟอสเฟสในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะไม่เสถียรและเกิดการแตกออกของพันธะทำให้โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เกิดการหดตัว ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง (Jagtøyen และ Derbyshire, 1998)



ภาพที่ 4.28 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ (■) ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง (■) อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง และ (□) อัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง

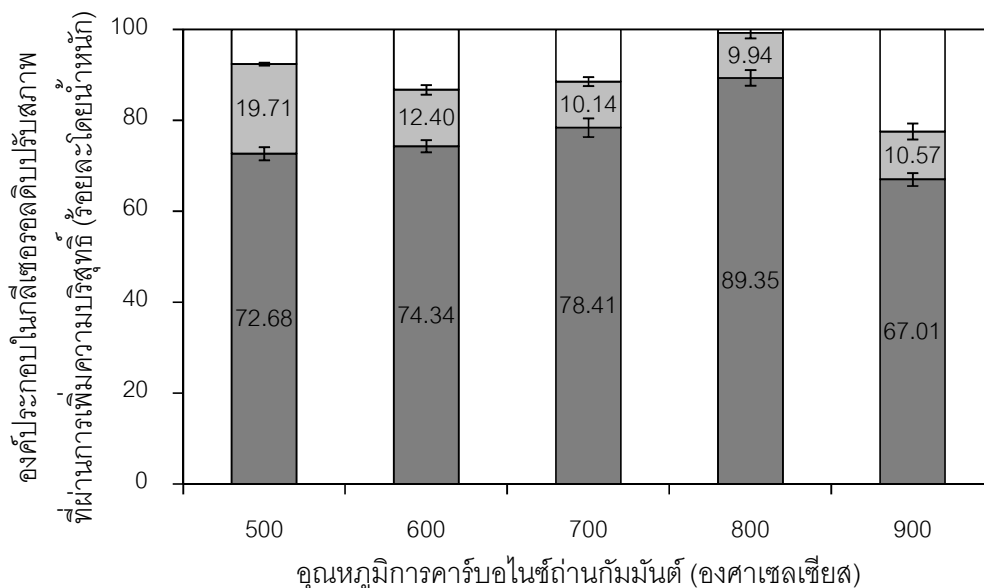


ภาพที่ 4.29 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ (■) ปริมาณไอน้ำแบบไมโครพอร์ และ (□) ปริมาณไอน้ำแบบเมโซพอร์ ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง (แถบซ้าย) อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง (แถบกลาง) และอัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง (แถบขวา)

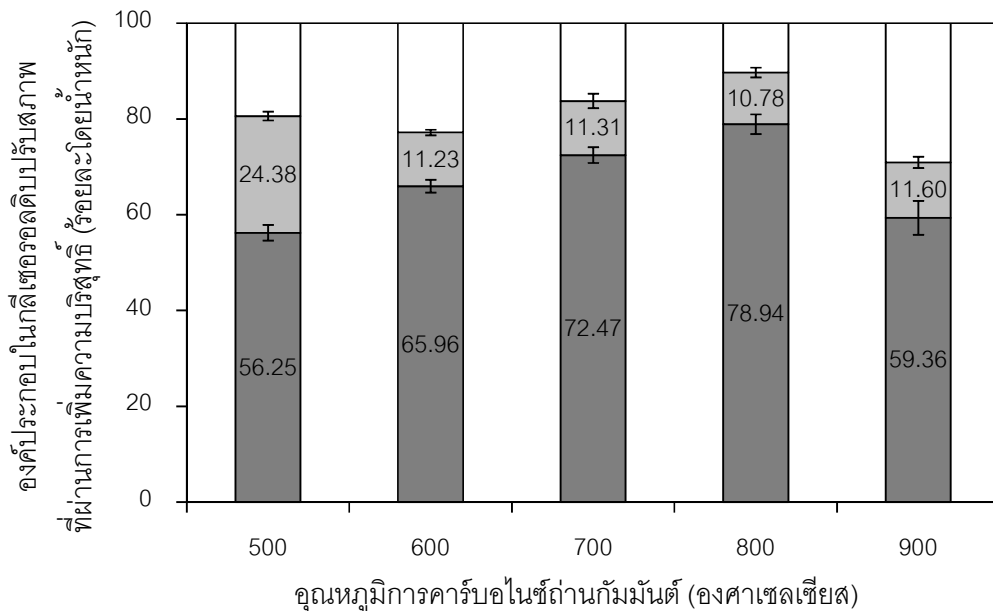
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ภาพที่ 4.30) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์จาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ไถ่ลดลงจากร้อยละ 19.71 เป็นร้อยละ 9.94 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 13.27 เป็นร้อยละ 0.71 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 72.68 เป็นร้อยละ 89.35 ซึ่งจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิว (ภาพที่ 4.25) และลักษณะกายภาพทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 4.28-4.29) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงเหลือร้อยละ 67.01 เนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวและพื้นที่ผิว BET มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต (ภาพที่ 4.31) พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 เป็น 800 องศาเซลเซียส จะทำให้เถ้าลดลงจากร้อยละ 24.38 เป็นร้อยละ 10.78 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 22.81 เป็นร้อยละ 10.62 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.25 เป็นร้อยละ 78.94 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์มากกว่า 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงเป็นร้อยละ 59.36 ซึ่งจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิว (ภาพที่ 4.26) และลักษณะกายภาพทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อย่างชัดเจน

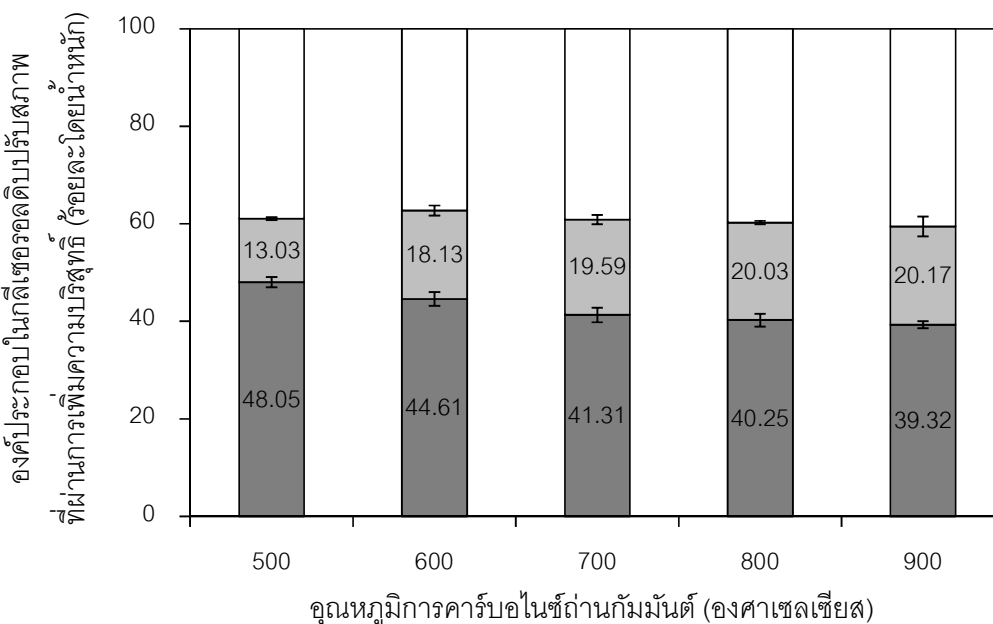
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (ภาพที่ 4.32) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์จาก 500 เป็น 900 องศาเซลเซียส จะทำให้เถ้าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.03 เป็นร้อยละ 20.17 สารปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38.92 เป็นร้อยละ 40.51 เนื่องจากมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและพื้นที่ผิว BET ต่ำ ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงจากร้อยละ 48.05 เป็นร้อยละ 39.32



ภาพที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง: (■) กลีเซอรอล (■) เถ้า และ (□) สารปนเปื้อน

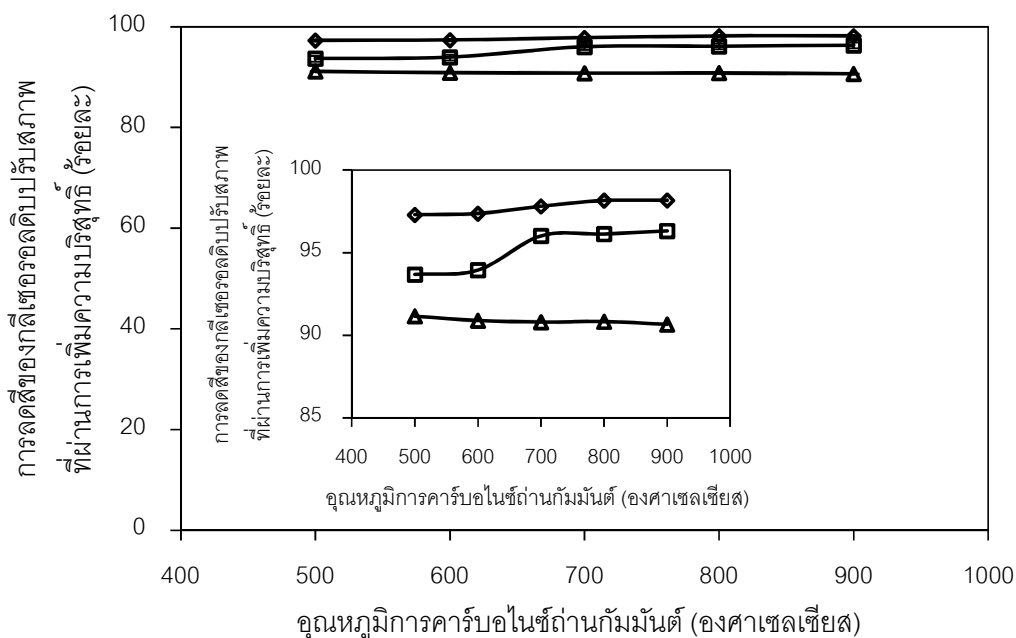


ภาพที่ 4.31 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง: (■) กลีเซอรอล (■) เชื้อเพลิง และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.32 ผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 และเวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง: (■) กลีเซอรอล (■) เชื้อเพลิง และ (□) สารปนเปื้อน

ภาพที่ 4.33 แสดงผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนท์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนไนท์ของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ร้อยละการลดลงของสีเพิ่มขึ้น (ความเข้มสีลดลง) แต่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะทำให้ร้อยละการลดลงของสีลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณสารปนเปื้อนสูง โดยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นโดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการลดลงของความเข้มสีสูงสุดคือร้อยละ 98.17



ภาพที่ 4.33 ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนท์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย (◇) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง (□) โพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง และ (△) กรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง

4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่ เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบ เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวทุกหมู่ฟังก์ชันมีปริมาณต่ำ เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าส่วนใหญ่ใช้วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) ในช่วงอุณหภูมิ 1,000-1,500 องศาเซลเซียส ทำให้หมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ บนพื้นผิวหลุดออกไปเหลือแต่คาร์บอนเป็นจำนวนมาก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยความร้อนและทางเคมี จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันมาก ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 800 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลสูง เนื่องจากการให้ความร้อนจะทำให้เกิดการออกซิเดชันของลิพิดออกซิเจนที่อยู่ในระนาบชั้นแกรฟีน เช่น หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนที่เป็นหมู่เบสมากกว่าหมู่กรด และการเตรียมถ่านกัมมันต์ในบรรยากาศไนโตรเจนจะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนโดยเฉพาะหมู่เบสสามารถกระจายตัวหรือเกิดการดูดซับกลับมาบนพื้นผิวใหม่อีกครั้ง เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต จะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากที่สุดที่อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายกระตุ้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นเบสจึงเป็นเพิ่มปริมาณหมู่เบสหรือปริมาณหมู่แอลคาลไลน์ชนิดไพโรนและอนุพันธ์ของคีโตนชนิดไพโรนและโครมีน ซึ่งต่างเป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอนิลแต่ไม่เพิ่มหมู่กรดหรืออาจลดปริมาณหมู่กรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ รวมถึงหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 850 องศาเซลเซียส ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500 พบว่ามีปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่ต่ำ เนื่องจากการเชื่อมโยงโครงสร้างของฟอสเฟสและพอลิฟอสเฟสบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีพื้นที่ผิว BET สูงที่สุดเท่ากับ 983.86 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนและทางเคมีด้วยสารเคมีทั้ง 3 ชนิด กล่าวคือถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีพื้นที่ผิว BET มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต และถ่านกัมมันต์ที่

กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเท่ากับ 96.17 1.06 1.20 และ 116.02 เท่า ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนสูงสุด เนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวสูงรวมทั้งมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวน้อยจึงสามารถดูดซับไอโอดีนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและไม่มีขั้วได้ดีกว่า ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยความร้อนและทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่อุณหภูมิการคาร์บอน 800 องศาเซลเซียส จะมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า แต่มีค่าไอโอดีนที่มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับตามสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกจะมีค่าไอโอดีนต่ำที่สุดเท่ากับ 473 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีปริมาณหมู่กรดสูงโดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดการสูญเสียโปรตอน (Deprotonation) ทำให้เกิดความเป็นลบขึ้นที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ในขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับการวิเคราะห์ค่าไอโอดีน จะเกิดไตรไอโอดด์-แอนไอออน (I_3^-) จากปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีน (I_2) กับ โพแทสเซียมไอโอดด์ (KI) ซึ่งไอออนดังกล่าวมีสภาพเป็นลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์กับไตรไอโอดด์-แอนไอออนได้น้อยลง (ปรินทร์ เต็มญารศิลป์, 2551)

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 35.76 เป็นร้อยละ 88.55 เนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวที่สูงจึงส่งผลเชิงบวกในการดูดซับเถ้าและสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ อย่างไรก็ตามปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะมีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลน้อยกว่าการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิการคาร์บอน 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลที่ต่ำกว่า โดยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้สูงที่สุดร้อยละ 89.35 ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากที่สุดเท่ากับ 7.08 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหมู่เบส

ตารางที่ 4.5 สมบัติของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์กัลซีเซอรอลดิบ

	พื้นที่ผิว BET (ตารางเมตรต่อกรัม)	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิว (มิลลิควิวาเลนต์ต่อกรัม)				ความบริสุทธิ์ของ กัลซีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
			หมู่คาร์บอกซิล	หมู่แลคโตน	หมู่ไฮดรอกซิล	หมู่คาร์บอนิล	
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	983.86	2016	0.20 ± 0.06	0.35 ± 0.18	0.02 ± 0.10	0.59 ± 0.20	88.55 ± 0.63
ถ่านกัมมันต์จากกากตะกอน บำบัดน้ำเสียที่ถูกกระตุ้นด้วย							
- ⁱ ความร้อน	10.23	641	0.51 ± 0.08	0.34 ± 0.08	0.00 ± 0.17	6.59 ± 0.19	85.78 ± 0.84
- ⁱⁱ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	923.91	1,891	1.24 ± 0.01	0.00 ± 0.06	0.09 ± 0.06	7.08 ± 0.40	89.35 ± 1.72
- ⁱⁱⁱ โพแทสเซียมคาร์บอเนต	819.12	1,260	1.39 ± 0.07	0.17 ± 0.02	0.67 ± 0.04	6.50 ± 0.16	78.94 ± 2.04
- ^{iv} กรดฟอสฟอริก	8.48	473	4.08 ± 0.12	1.44 ± 0.06	4.09 ± 0.13	2.67 ± 0.03	48.05 ± 1.04

ⁱ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยการกระตุ้นด้วยความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ⁱⁱ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ⁱⁱⁱ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและถ่านชาร์เท่ากับ 6 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 15 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

^{iv} ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่อัตราส่วนระหว่างกรดฟอสฟอริกและถ่านชาร์เท่ากับ 4 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 20 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

สามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีและมีสภาพพื้นผิวเป็นประจุบวก จึงสามารถที่จะรับอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวหรือประจุลบจากกรดไขมันอิสระที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ รวมถึงการมีลักษณะพื้นผิวสูงทำให้ปริมาณสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงต่ำที่สุด กล่าวคือจะให้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า 1.04 เท่า

4.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารปนเปื้อนจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

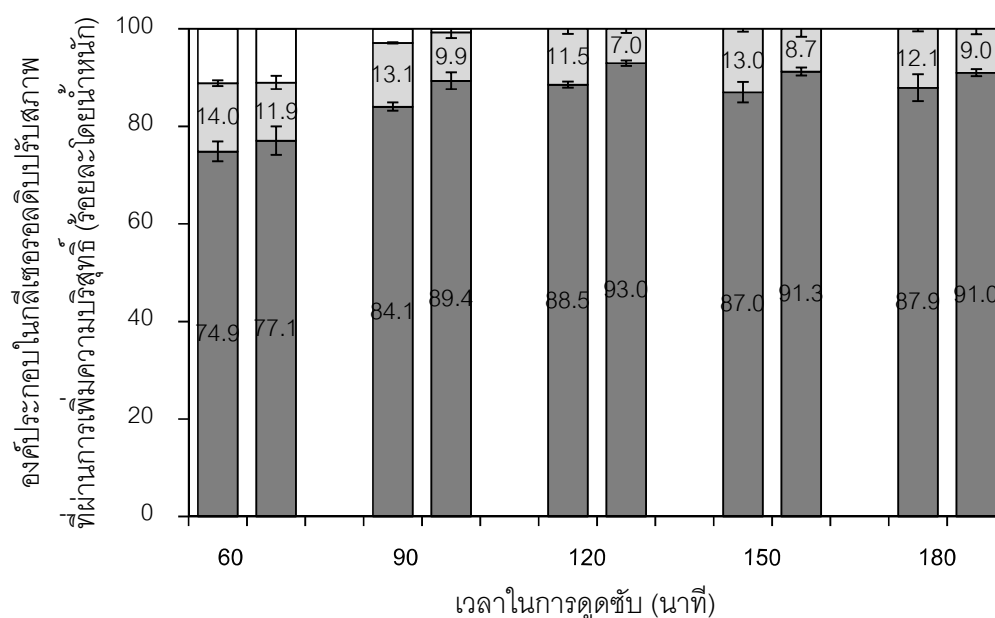
การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 อัตราการเขย่าระหว่างการกระตุ้นเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร โดยจะทำการศึกษามวลของตัวแปร 2 ตัว คือเวลาในการดูดซับ และความเร็วรอบในการเขย่า

4.3.1 ผลของเวลาในการดูดซับ

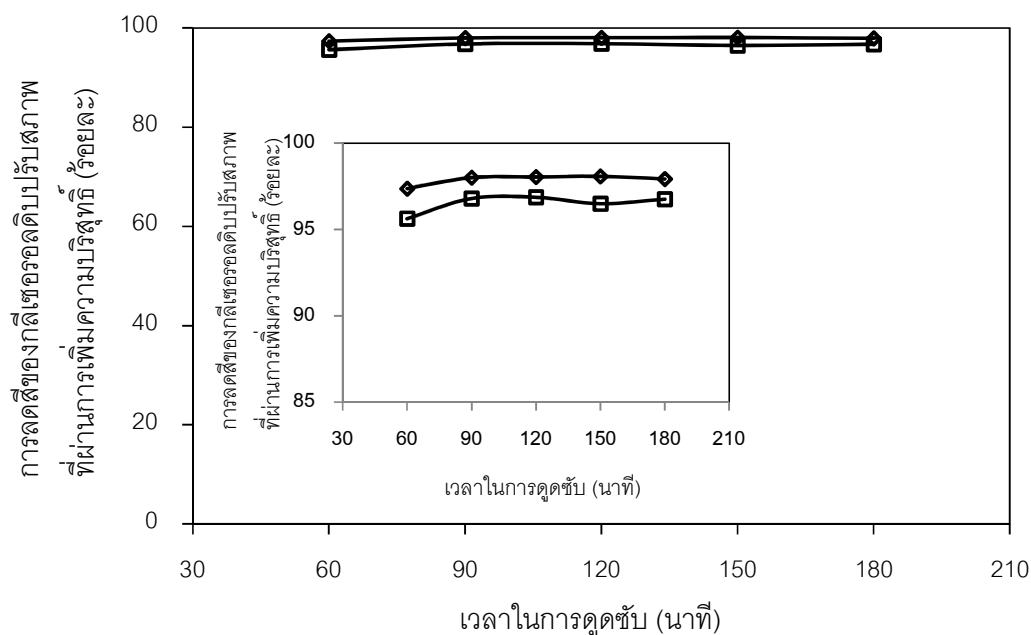
ภาพที่ 4.34 แสดงผลของเวลาในการดูดซับต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจาก 60 เป็น 120 นาที จะทำให้ค่าลดลงจากร้อยละ 14.0 เป็นร้อยละ 11.5 และจากร้อยละ 11.9 เป็นร้อยละ 7.0 ตามลำดับ และไม่พบปริมาณสารปนเปื้อน ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 74.9 เป็น 88.5 และ 77.1 เป็น 93.0 ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์กับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพทำให้ปริมาณแฉะและสารปนเปื้อนถูกดูดซับได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับมากกว่า 120 นาที ปริมาณกลีเซอรอลใน

กลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะมีแนวโน้มคงที่ อาจเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ดูดซับสารปนเปื้อนจนถึงจุดอิ่มตัว จึงกล่าวได้ว่าเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 120 นาที

ภาพที่ 4.35 แสดงผลของเวลาในการดูดซับต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย พบว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด จะมีสีลดลงมากกว่าร้อยละ 95.6 โดยกลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะมีสีอ่อนที่สุด หรือคิดเป็นการลดลงของสีมากกว่าร้อยละ 98.1 เนื่องจากกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณสารปนเปื้อนต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.34 ผลของเวลาในการดูดซับต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า (แถบซ้าย) และถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (แถบขวา): (■) กลีเซอรอล (■) เถ้า และ (□) สารปนเปื้อน



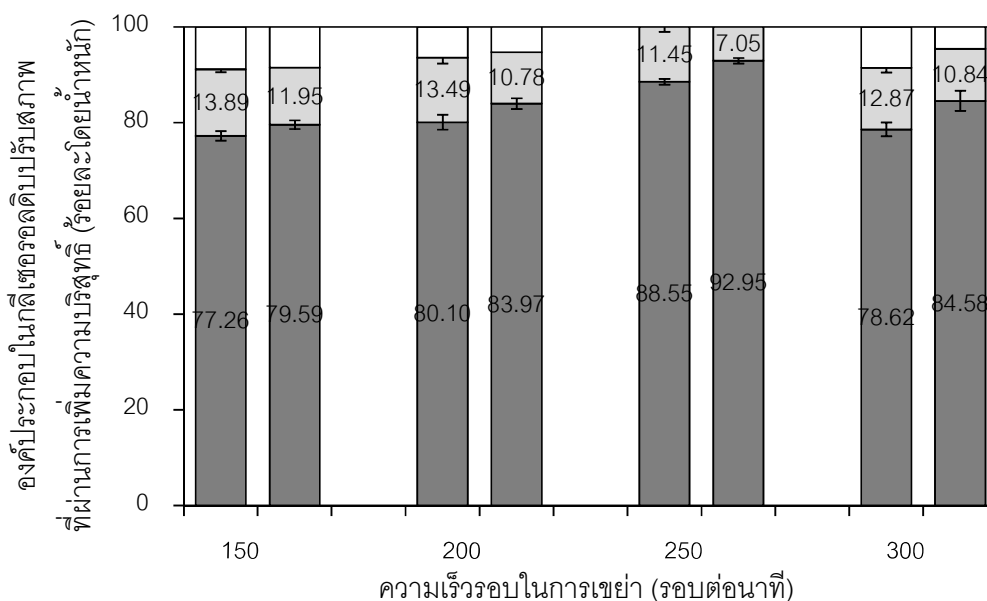
ภาพที่ 4.35 ผลของเวลาในการดูดซับต่อการกลั่นของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วย (□) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า และ (◇) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

4.3.2 ผลของความเร็รรอบในการเขย่า

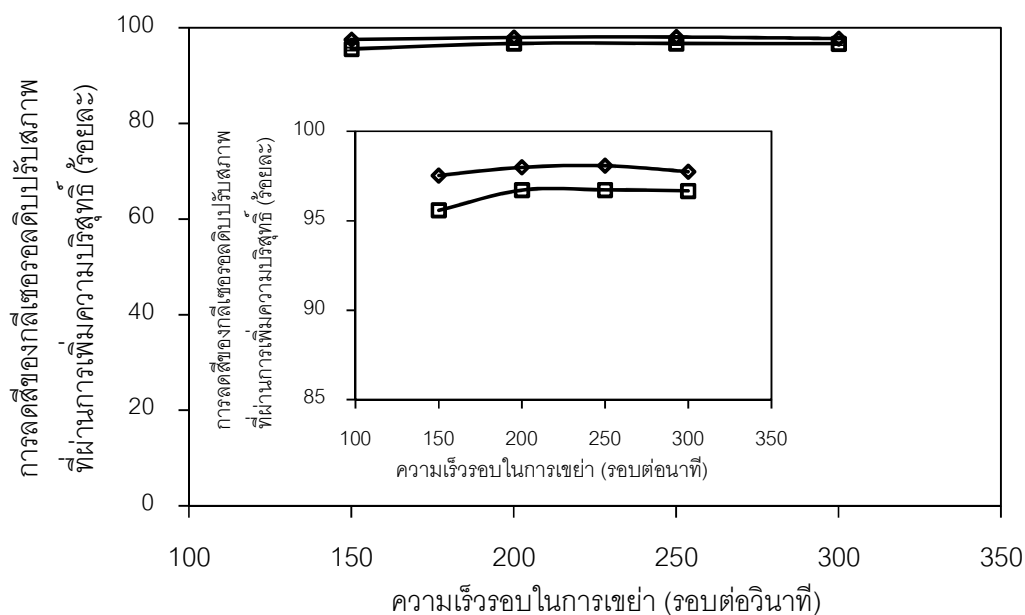
ภาพที่ 4.36 แสดงผลของความเร็รรอบในการเขย่าต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็รรอบในการเขย่า 150-300 รอบต่อนาที พบว่าความเร็รรอบการเขย่าในช่วงที่ศึกษามีผลต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์เล็กน้อย กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็รรอบในการเขย่าจาก 150 เป็น 250 รอบต่อนาที จะทำให้ได้ผลลดลงจากร้อยละ 13.89 เป็นร้อยละ 11.45 และจากร้อยละ 11.95 เป็นร้อยละ 7.05 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียเป็นตัวดูดซับ ตามลำดับ และไม่พบปริมาณสารปนเปื้อน ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้นจากร้อยละ

77.26 เป็น 88.55 และ 79.59 เป็น 92.95 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบในการเขย่า จะทำให้ความหนาของชั้นการแพร่ (Diffusion layer) ที่ปกคลุมอนุภาคของถ่านกัมมันต์ลดลง ทำให้โมเลกุลของสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพสามารถแพร่เข้าไปในอนุภาคของ ถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้ดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบใน การเขย่าจาก 250 เป็น 300 รอบต่อนาที ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ จะลดลง เนื่องจากเกิดแรงเฉือนระหว่างโมเลกุลทำให้โมเลกุลไม่สามารถเกาะกันได้ (อิติวรณ์ นันทปริชาชาญ, 2555) จึงกล่าวได้ว่าความเร็วยรอบในการเขย่าที่เหมาะสมคือ 250 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.37 แสดงผลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับ สภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย พบว่ากลีเซอรอลที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียม จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที ความเร็วยรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที จะมีสีอ่อนที่สุดหรือคิดเป็นการลดลงของสีมากกว่าร้อยละ 98.1 เนื่องจาก กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอน บำบัดน้ำเสียจะมีปริมาณสารปนเปื้อนต่ำที่สุด

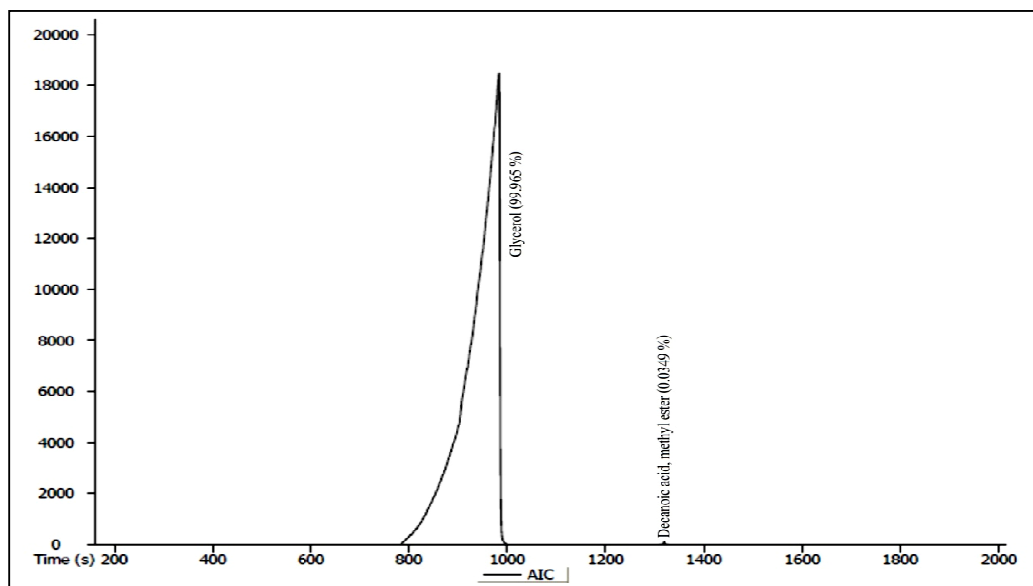


ภาพที่ 4.36 ผลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อองค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่าน การเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า (แถบซ้าย) และถ่านกัมมันต์ที่ถูกร ะตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและ ถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนในซีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (แถบขวา) (■) กลีเซอรอล (■) ถ่าน และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.37 ผลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อการลดค่าของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วย (□) ถ่านกัมมันต์ทางการค้า และ (◇) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารกระตุ้นและถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อวินาที ไปทดสอบด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี เพื่อวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมันอิสระในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ พบว่ากรดไขมันอิสระที่ตกค้างในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มีเพียงชนิดเดียว คือ Decanoic acid (ภาพที่ 4.38) แสดงให้เห็นว่า สารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนโดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลได้เป็นอย่างดี

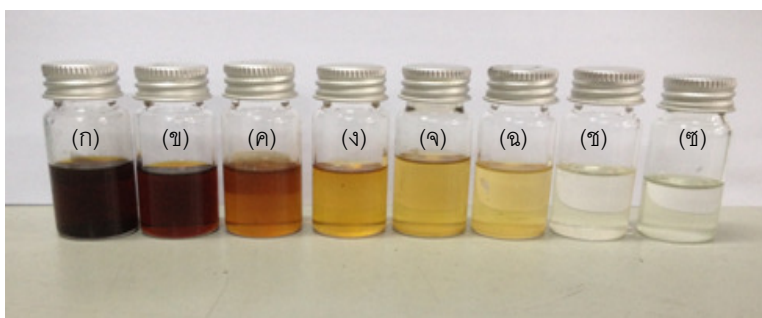


ภาพที่ 4.38 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที

4.3.3 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพโดยการดูดซับซ้ำ

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในเขย่า 250 รอบต่อนาที พบว่ามีปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพร้อยละ 93.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งนับว่ามีปริมาณความบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ได้ แต่ยังคงมีสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดชั้นคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ต้องมีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 95.0 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงนำกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์แล้วมาดูดซับซ้ำที่ภาวะที่เหมาะสม ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับ

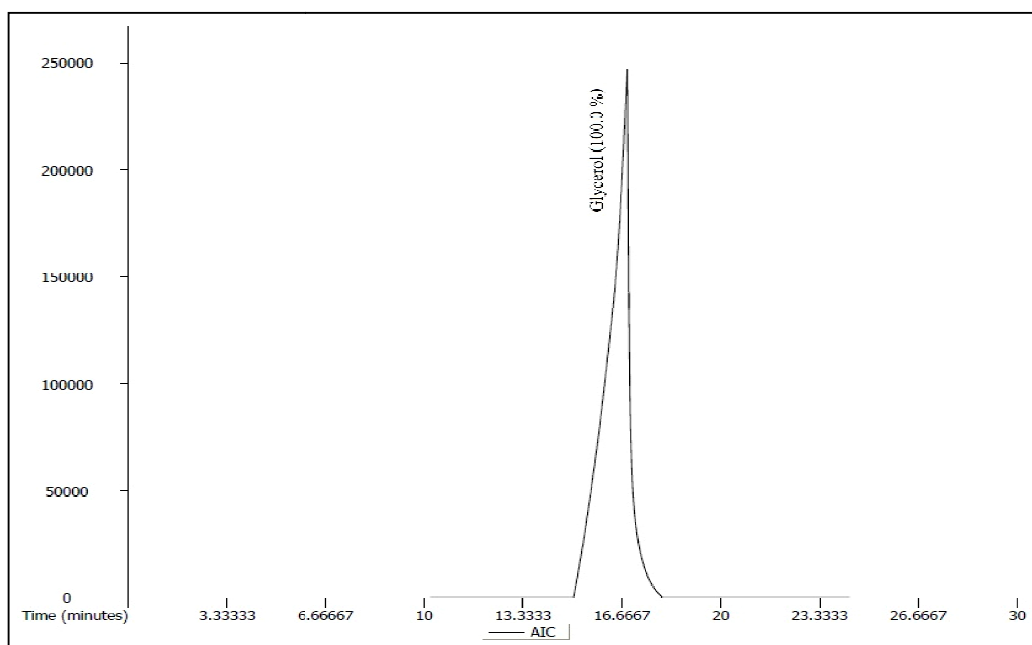
องค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการดูดซับซ้ำ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะเพิ่มขึ้น 1.02 เท่า และ 1.04 เท่า มีความเข้มข้นลดลง 3.35 เท่า และ 3.55 เท่า ความหนืดเพิ่มขึ้น 1.01 เท่า และ 1.02 เท่า ปริมาณแกล็ดลดลง 1.43 เท่า และ 2.30 เท่า ตามลำดับ และไม่พบปริมาณสารปนเปื้อนในกลีเซอรอล เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบของการดูดซับเป็นการเพิ่มปริมาณหรือพื้นที่ผิวในการดูดซับสารปนเปื้อนและ สารประกอบจำพวกเกลือในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเมื่อผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 2 มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 96.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์มีสมบัติผ่านเกณฑ์กำหนดชั้นคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกลีเซอรอลบริสุทธิ์



ภาพที่ 4.39 สีของ (ก) กลีเซอรอลดิบ (ข) กลีเซอรอลดิบปรับสภาพ และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วย (ค) ถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยใช้เวลาดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที (ง) ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ภาวะเหมาะสม (จ) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้เวลาดูดซับ 90 นาที อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที (ฉ) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับการดูดซับครั้งที่ 1 และการดูดซับซ้ำ (ช) ครั้งที่ 1 และ (ซ) ครั้งที่ 2

เมื่อพิจารณาสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย (ภาพที่ 4.39) พบว่ากลีเซอรอลดิบ (ภาพที่ 4.39(ก)) และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ (ภาพที่ 4.39(ข)) จะมีสีน้ำตาลดำและสีน้ำตาลอ่อนลง ตามลำดับ เมื่อนำมาดูดซับสารปนเปื้อนด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่อัตราส่วนระหว่าง

ถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 90 นาที และ อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที (ภาพที่ 4.39(ค)) และด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ภาวะเหมาะสม (ภาพที่ 4.39(ง)) สีของกลีเซอรอลจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองเข้มและสีเหลืองอ่อนตามลำดับ เมื่อนำมาดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยใช้เวลาในการดูดซับ 90 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที (ภาพที่ 4.39(จ)) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ภาวะเหมาะสม (ภาพที่ 4.39(ฉ)) สีของกลีเซอรอลจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองใส โดยเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ภาวะเหมาะสมมาทำการดูดซับซ้ำครั้งที่ 1 (ภาพที่ 4.39(ซ)) และ ครั้งที่ 2 (ภาพที่ 4.39(ฅ)) สีของกลีเซอรอลจะเปลี่ยนเป็นสีขาวใส



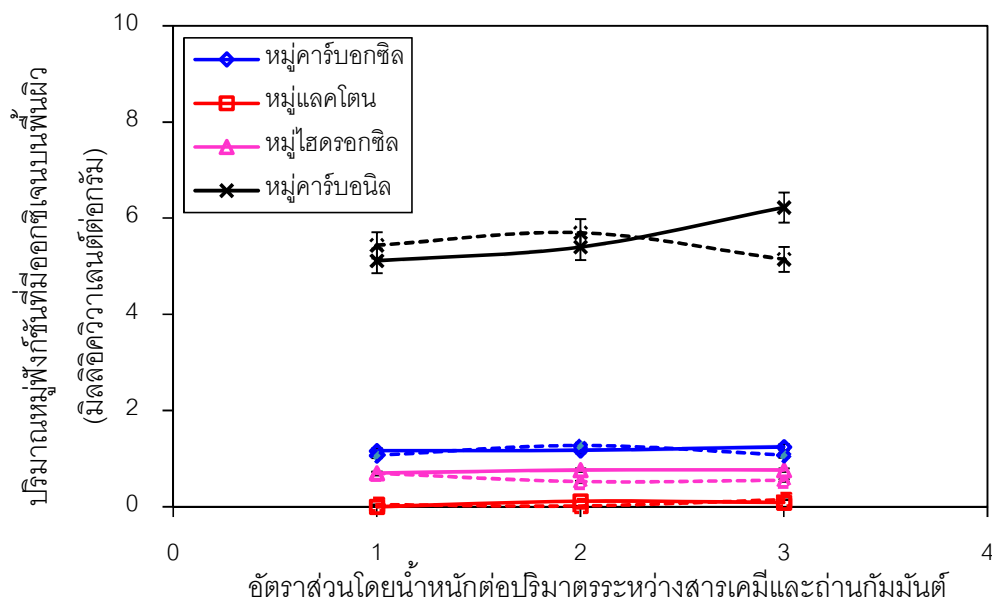
ภาพที่ 4.40 ชนิดของสารในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เวลาในการดูดซับ 120 นาที และอัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เมื่อผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 2

เมื่อนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับซ้ำครั้งที่ 2 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในเขย่า 250 รอบต่อนาที ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโทรมิเตอร์ พบว่าไม่ปรากฏพีคของกรดไขมันอิสระใดๆ แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับกรดไขมันอิสระและอนุพันธ์ของกรดไขมันอิสระจากกลีเซอรอลดิบ

4.4 การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจะดำเนินการด้วยวิธีทางเคมี โดยนำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่ผ่านการใช้งานแล้วไปแช่ในสารเคมีได้แก่ เฮกเซน และไดเอทิลอีเทอร์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 ถึง 3 กรองแยกและอบตามภาวะที่ระบุในหัวข้อ 3.4.7 จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมาดูดซับสารปนเปื้อนในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ ที่อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4.41 แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนจะมีปริมาณหมู่คาร์บอนิลสูงสุดเท่ากับ 6.2 มิลลิโมลควิวาเลนตต่อกรัม ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3 ซึ่งสูงกว่าหมู่อื่น แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่กรดเล็กน้อย โดยหมู่แลคโตน หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิล จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.0-0.1 0.69-0.76 และ 1.1-1.2 มิลลิโมลควิวาเลนตต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ใหม่ (ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) พบว่าปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนโดยเฉพาะหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนสามารถกำจัดกรดไขมันอิสระออกจากพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้บางส่วน ในขณะที่หมู่แลคโตน หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิล มีแนวโน้มคงที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ใหม่



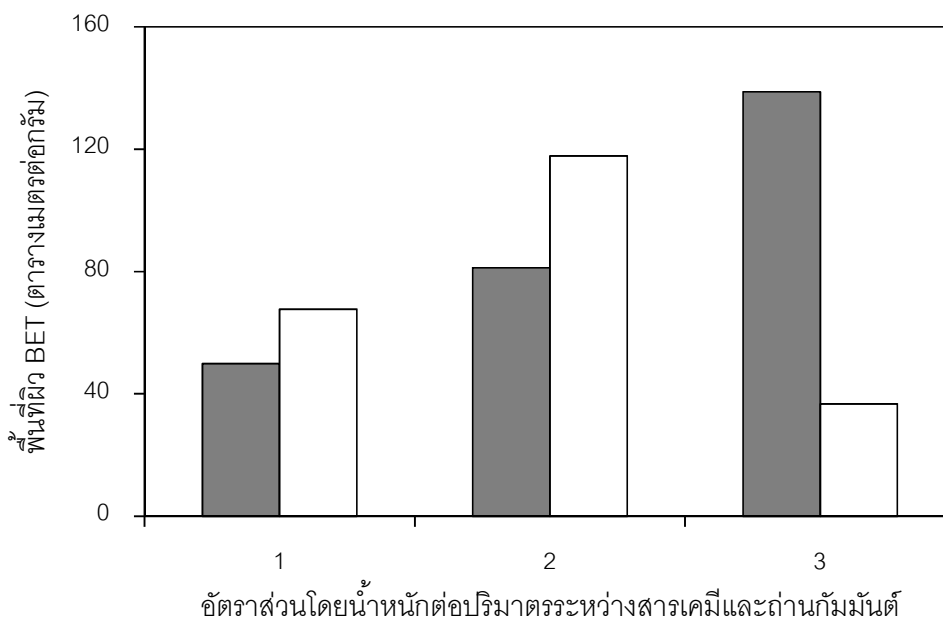
ภาพที่ 4.41 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณ หมุ่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน (—) และและไดเอทิลอีเทอร์ (-----)

เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณหมุ่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์ (ภาพที่ 4.41) พบว่าปริมาณหมุ่คาร์บอนิลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์จาก 1 เป็น 2 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์มากกว่า 2 จะทำให้ปริมาณหมุ่คาร์บอนิลลดลง แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์ทำได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีการสะสมตัวของกรดไขมันอิสระบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้รูพรุนบนพื้นผิวรวมถึงปริมาณหมุ่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจึงลดลง ส่วนหมุ่แลคโตน หมุ่ไฮดรอกซิด และหมุ่คาร์บอนอกซิด มีแนวโน้มที่คงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ใหม่

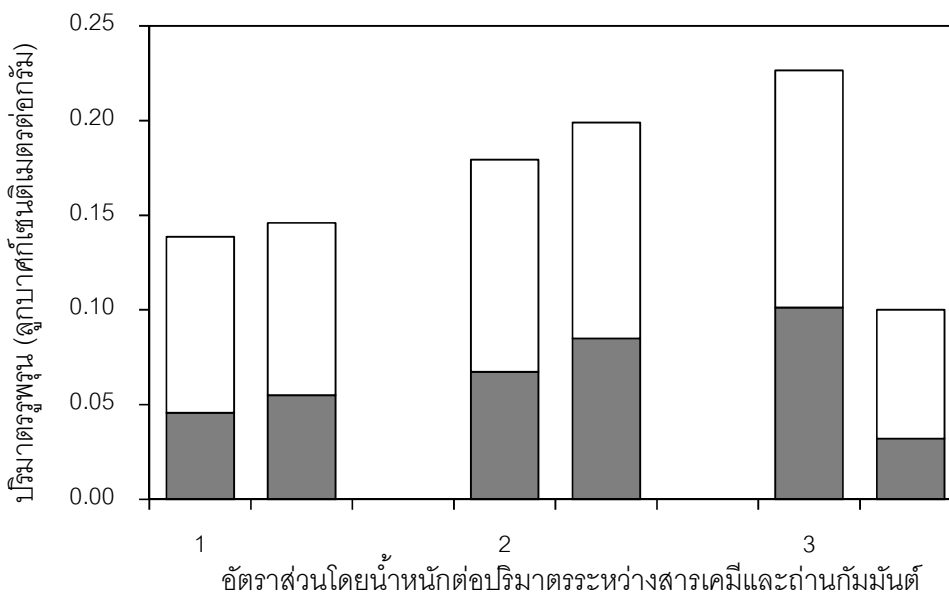
เมื่อพิจารณาพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 ถึง 3 (ภาพที่ 4.42) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพจะมีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วแต่ยังไม่ได้ฟื้นฟูสภาพ (พื้นที่ผิว BET เท่ากับ 17.62 ตารางเมตรต่อกรัม

ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ เท่ากับ 0.012 และ 0.011 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเฮกเซนซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายสารปนเปื้อนโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่ปกคลุมอยู่บนพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3 จะมีพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์สูงที่สุด แต่ยังมีค่าที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ใหม่อยู่มาก (ภาพที่ 4.43) เนื่องจากการดั่งสารปนเปื้อนออกจากพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการที่ศึกษาไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้มีสารปนเปื้อนตกค้างบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ พื้นที่ผิวรูพรุนและปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์จึงน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ใหม่

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์ (ภาพที่ 4.42) พบว่าพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์จาก 1 เป็น 2 เนื่องจากไดเอทิลอีเทอร์เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับเฮกเซนแต่มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า (~6.89 และ 0.001 สำหรับ ไดเอทิลอีเทอร์และเฮกเซน ตามลำดับ) (Byers, 2003: online) การเพิ่มปริมาณไดเอทิลอีเทอร์จึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลายกรดไขมันอิสระและสารประกอบจำพวกเกลือที่ปกคลุมบนพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าเฮกเซน ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นเป็น 117.8 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์เพิ่มขึ้นเป็น 0.09 และ 0.11 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 4.43) ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนที่อัตราส่วนเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์มากกว่า 2 พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนรวมมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์ที่มากเกินไปจะไปสะสมตัวบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์หรืออาจเกิดการแข่งขัน (Competition) ระหว่างบริเวณที่มีขั้วกับบริเวณที่ไม่มีขั้วในโมเลกุลของไดเอทิลอีเทอร์ (อนรรฆอร และ มาโนชญ์, 2555) ในการละลายสารปนเปื้อนที่มีสารประกอบต่างๆ ปนอยู่โดยเฉพาะกรดไขมันอิสระและสารประกอบจำพวกเกลือบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง



ภาพที่ 4.42 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วย (■) เฮกเซน และ (□) ไดเอทิลอีเทอร์

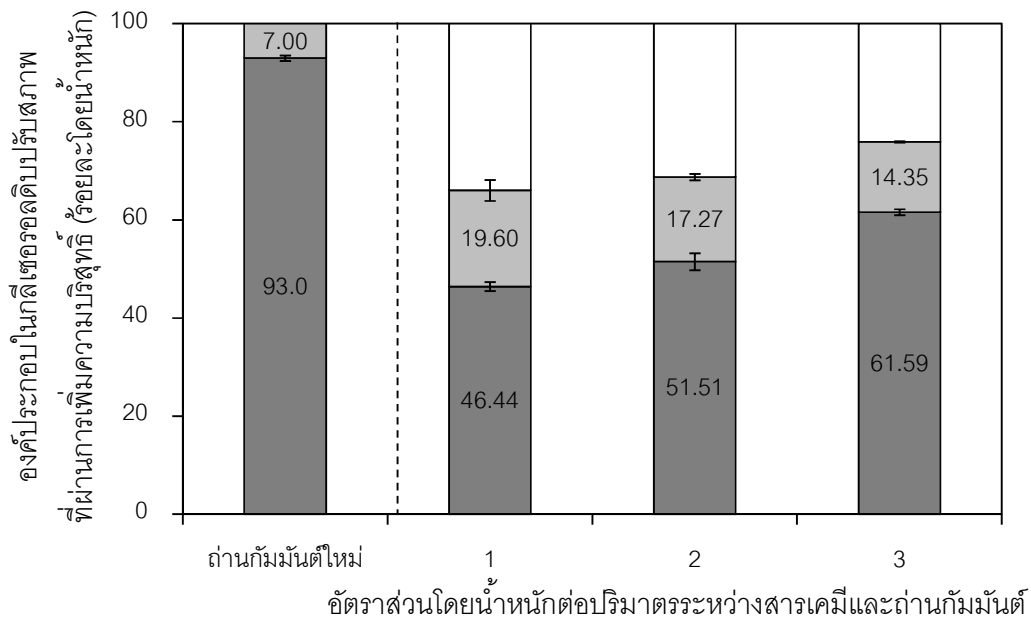


ภาพที่ 4.43 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อ (■) ปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ และ (□) ปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน (แถบซ้าย) และ ไดเอทิลอีเทอร์ (แถบขวา)

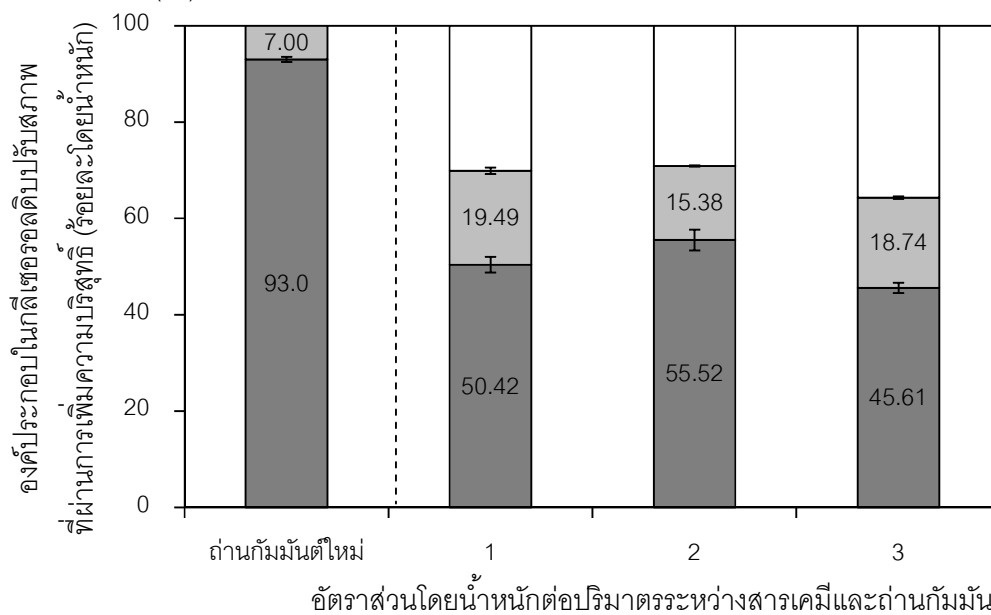
ภาพที่ 4.44-4.45 แสดงองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 1 ถึง 3 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์จาก 1 เป็น 3 จะทำให้ได้ลดลงจากร้อยละ 19.60 เป็นร้อยละ 14.35 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 33.96 เป็นร้อยละ 24.06 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.44 เป็นร้อยละ 61.59 ซึ่งจะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิว และลักษณะทางกายภาพทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ภาพที่ 4.42-4.43)

ส่วนปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์จาก 1 เป็น 2 จะทำให้ได้ลดลงจากร้อยละ 19.49 เป็นร้อยละ 15.38 สารปนเปื้อนลดลงจากร้อยละ 30.09 เป็นร้อยละ 29.10 ส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50.42 เป็นร้อยละ 55.52 (ภาพที่ 4.45) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างไดเอทิลอีเทอร์และถ่านกัมมันต์มากกว่า 2 พบว่าปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์จะลดลงเป็นร้อยละ 45.61 เนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวรวมถึงพื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์ไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่เกาะบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้หมด ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์มีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ใหม่

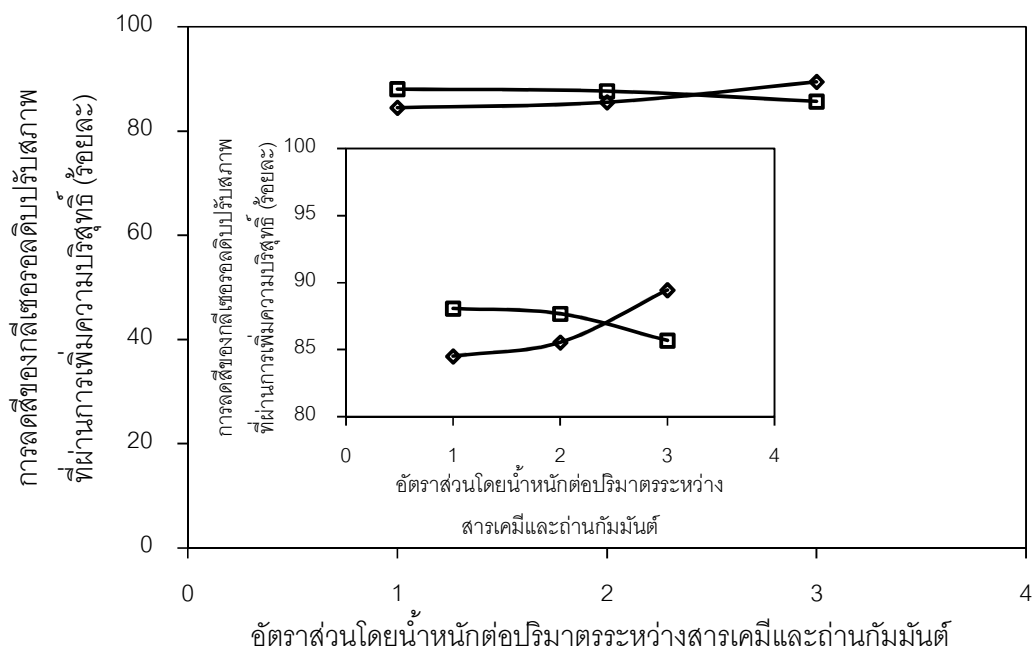
ภาพที่ 4.46 แสดงผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์ พบว่ากลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยสารสกัดทั้ง 2 ชนิด จะมีสีลดลงมากกว่าร้อยละ 84.5 โดยกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนจะมีสีที่อ่อนที่สุดหรือคิดเป็นการลดลงของสีมากกว่าร้อยละ 89.5 เนื่องจากมีปริมาณสารปนเปื้อนที่ต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.44 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดัดแปรสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซน: (■) กลีเซอรอล (■) ถ่าน และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.45 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลดัดแปรสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์: (■) กลีเซอรอล (■) ถ่าน และ (□) สารปนเปื้อน



ภาพที่ 4.46 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างสารเคมีและถ่านกัมมันต์ต่อการลดสีของกลีเซอรอลดิบปรับปรุงสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วย (◇) เฮกเซน และ (□) ไดเอทิลอีเทอร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์กลีเซอรอลดิบ ปรับสภาพโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย พบว่าการปรับสภาพ จะทำให้กลีเซอรอลดิบมีความเข้มข้นลดลง 1.12 เท่า ความหนืดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 1.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 57.4 เซนติสโตกส์ ตามลำดับ มีเถ้าลดลงเล็กน้อย ปริมาณสารปนเปื้อนลดลง 1.04 เท่า และมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น 1.31 เท่า เมื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียต่อความสามารถในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ พบว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยความร้อน จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่คาร์บอนิลอย่างเด่นชัด ในขณะที่พื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนจะไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของกลีเซอรอลอย่างชัดเจน สำหรับที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วยสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และกรดฟอสฟอริก พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่คาร์บอนิลและลักษณะทางกายภาพทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพ คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และถ่านชาร์เท่ากับ 5 เวลาดูดซับสารกระตุ้น 25 ชั่วโมง และคาร์บอนไนท์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์และกลีเซอรอลดิบปรับสภาพเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ 120 นาที และความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที ซึ่งภาวะดังกล่าวสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ร้อยละ 93.0 อย่างไรก็ตามปริมาณกลีเซอรอลในกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียยังคงมีสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดขั้นคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ที่ต้องมีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ดังนั้นจึงนำกลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความบริสุทธิ์แล้วมาเพิ่มความบริสุทธิ์ซ้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ใหม่ พบว่าการดูดซับซ้ำในครั้งที่ 2 สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ถึงร้อยละ 96.9 ซึ่งมีสมบัติที่ผ่านเกณฑ์กำหนดชั้นคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกลีเซอรอลบริสุทธิ์ นอกจากนี้เมื่อศึกษาการนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนและไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยเฮกเซนที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรระหว่างเฮกเซนและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 3 สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลดิบปรับสภาพได้ถึงร้อยละ 61.59 และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ได้สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ฟื้นฟูสภาพด้วยไดเอทิลอีเทอร์ประมาณ 1.11 เท่า อย่างไรก็ตามการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยสารที่ใช้จะไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความบริสุทธิ์ลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากการมีพื้นที่ผิว BET และปริมาณหมู่คาร์บอนิลบนพื้นผิวที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ใหม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาการออกซิไดส์พื้นผิวถ่านกัมมันต์ในกรดหรือเบส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุนรวม และปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
- ในขั้นตอนการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารเคมี ควรใช้วิธีการกวนสารกระตุ้นให้แห้งหรือการระเหยสารกระตุ้นด้วยความร้อนแทนวิธีการกรองแยกถ่านชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเครื่องกรองแบบสูญญากาศ เพื่อให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของถ่านชาร์ได้อย่างสมบูรณ์
- ควรศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยสารเคมีหรือตัวทำละลายชนิดอื่นๆ ร่วมกับการใช้เทคนิค Ultrasonic assisted regeneration หรือการเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ในแก๊สเฉื่อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการดึงสารที่ดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติยา อัลภาชน์. กลีเซอรินบริสุทธิ์. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. สมอสาร 28, 326 (สิงหาคม 2545): 9-10.

เกศศิริ เหล่าวิชระสุวรรณ. การเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกาแฟโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. 29, 2 (เมษายน-มิถุนายน 2552): 116-130.

ณัฐมน ดีปะติ. การผลิตและการพัฒนากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ของกลีเซอรินที่ได้จากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์นม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2552.

ณัฐกานต์ บุศรพงษ์พานิช และ ณรงค์ฤทธิ์ คงอยู่. การทำกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์. รายงานการวิจัย, กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

ธิดาวรรณ นันทปรีชาชาญ. การขจัดไดเบนโซโทไอฟีนจากนอร์มัล-ออกเทนโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

ธุรกิจพลังงาน, กรม. คู่มือองค์ความรู้ เรื่องการศึกษาดูงานเกี่ยวกับการผลิตและผลผลิตจากไบโอดีเซลตามแผนจัดการความรู้ (KM Action Plan). กระทรวงพลังงาน, 2553.

นพภาพร พานิช, แสงสันดี พานิช, วันชัย ธีวไพบูลย์, พูนศิริ ลินธุรัตน์, ปรัชญ์ สง่างาม และปัทมา บุณนาค. การออกแบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm [12 มกราคม 2555]

ปรินทร เต็มถาวรศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. ปริมาณการผลิตไบโอดีเซล (B100) ของประเทศไทย. กระทรวงพลังงาน, 2556.

วิภา สุโรจนะเมธากุล. คุณสมบัติและประโยชน์ของกลีเซอรอล. วารสารอาหาร. 33, 2 (เมษายน-มิถุนายน 2546): 87-89.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ตัวดูดซับ. [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th/t/publication/> [10 มกราคม 2555]

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. ปริมาณการผลิตไบโอดีเซลของประเทศไทยช่วงปี พ.ศ. 2550-2555. กระทรวงพลังงาน, 2556.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกลีเซอรินบริสุทธิ์ (REFINED GLYCERINE). กระทรวงอุตสาหกรรม, 2538.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ถ่านกัมมันต์. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 900-2547, 2547.

อนรรฆอร ศรีไสยเพชร และ มาโนชญ์ ถนอมวัฒน์. การพัฒนาวิธีการสกัดแยกและวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ. รายงานผลการวิจัย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2555.

ภาษาอังกฤษ

Agrafioti, E., Bouras, G., Kalderis, D. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 95 (February 2013): 107-117.

Ayoub, M., and Abdullah, A.Z. Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16 (March 2012): 2671-2686.

Byers, J.A. Solvent polarity and miscibility. 2003. [Online]. Available from: <http://www.chemical-ecology.net/java/solvents.htm> [2012, December 26]

Carlos, M.C., and Jose, R.U. Carbon materials as adsorbents for the removal of pollutants from the aqueous phase. MRS Bulletin. 26 (November 2001): 890-894.

- Carrott, P.J.M., Ribeiro Carrott, M.M.L., and Mourao, P.A.M. Pore size control in activated carbons obtained by pyrolysis under different conditions of chemically impregnated cork. Analytical Applied Pyrolysis. 75 (June 2006): 120-127.
- Chemviron Carbon. 2013. Activated carbon purification systems. [Online]. Available from: <http://www.chemvironcarbon.com/en/> [2013, February 12].
- Chen, X., Jeyaseelan, S., and Graham, N. Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge. Waste Management. 22 (2002): 755-760.
- Cvengros, J., and Povazance, F. Production and treatment of rapeseed oil methyl ester as alternative fuels for diesel engines. Bioresource Technology. 55 (1996):145-150.
- Dasari, M.A., Crude Glycerol Potential Described. Feedstuffs. 79 (October 2007): 1-3.
- Demirbas, A. Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review. J. Hazard. Mater. 167 (August 2009): 1-9.
- Desotec Activated Carbon. 2013. Activated carbon. [Online]. Available from: http://www.desotec.com/EN/activated_carbon [2012, December 23].
- Epiotis, N.D. Configuration interaction and organic reactivity cycloaddition eletrophilic additions exchange-reaction and eliminations. Journal of the American Chemical Society. 94 (1972): 1946.
- Faria, P.C.C., Orfao, J.J.M., and Pereira, M.F.R. Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries. Water Research. 38 (January 2004): 2043-2052.
- Gao, Y., Yue, Q., Gao, B., Sun, Y., Wang, W., Li, Q., and Wang, Y. Preparation of high surface area-activated carbon from lignin of papermaking black liquor by KOH activation for Ni(II) adsorption. Chemical Engineering Journal. 217 (January 2013): 345-353.

- Guo, J., and Lua, A.C. Surface functional groups on oil-palm-shell adsorbents prepared by H_3PO_4 and KOH activation and their effects on adsorptive capacity, Chemical Engineering Research and Design. 81 (May 2003): 585-590.
- Gurten, I.I., Ozmak, M., Yagmur, E., and Akta, Z. Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea using K_2CO_3 . Biomass and Bioenergy. 37 (January 2012): 73-81.
- Hayashi, J., Toshihide, H., Katsuhiko, M., Vincent, G.G. Activated carbon from chickpea husk by chemical activation with K_2CO_3 : preparation and characterization. Microporous and Mesoporous Materials. 55 (August 2002): 63-68.
- Henry, H., Uwe, H., and Gregor, F. 2012. Fischer Esterification. [Online]. Available from: <http://www.chemgapedia.de/vsengine.html/> [2012, December 26].
- Izrail, S., and Mathai, P.K. Wastewater sludge processing. USA: Wiley, 2006.
- Jagtoyen, M., and Derbyshire, F. Activated carbons from yellow poplar and white oak by H_3PO_4 activation. Carbon. 36 (1998): 1087-1097.
- Jankowska, H., Swiatkowski, A., Choma, J. Active Carbon. New York: Ellis Horwood, 1991.
- Jehad, S., Andre, Y.T., and Marc, A.D. Glycerol removal from biodiesel using membrane separation technology. Fuel. 89 (May 2010): 2260-2266.
- Jungermann, E. Glycerine: A key Cosmetic Ingredient. New York: Mercel Dekker, 1991.
- Kenneth, E.N., Vassilios, G. Adsorption technology for air and water pollution control. Lewis publishers.
- Lillo-Raodenas, M.A., Cazorla-Amoros, D., and Linares-Solano, A. Uderstanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: an insight into the chemical activation mechanism. Carbon. 41 (February 2003): 267-275.
- Lim, W.C., Srinivasakannan, C., and Doshi, V. Preparation of high surface area mesoporous activated carbon: kinetics and equilibrium isotherm, Separation Science and Technology. 47 (November 2012): 886-895.

- Lotero, E., Bruce, D.A., Goodwin, Jr., and Lopez, D.E. Transesterification of triacetin with methanol on solid acid and base catalysts. Applied Catalysis A: General. 295 (November 2005): 97-105.
- Louisiana Tech University. 2012. Synthesis of soap. [Online]. Available from: <http://www.chem.latech.edu/~deddy/chem122m/> [2013, February 10].
- Ma, F., and Hanna, M.A. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology. 70 (February 1999): 1-15
- Mahapatra, K., Ramtekeb, D.S., and Paliwala, L.J. 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. 95 (January 2012): 79-86.
- Manosak, R., Limpattayanate, S., and Hunsom, M. Sequential-refining of crude glycerol derived from waste used-oil methyl ester plant via a combined process of chemical and adsorption. Fuel Processing Technology. 92 (September 2011): 92-99.
- Mochida, I., Seong, H.Y., and Wenming, Q. Catalysts in syntheses of carbon and carbon precursors. Journal of the Brazilian Chemical Society. 17 (October 2006): 1059-1073.
- Mukherjee, J.N., Chatterjee, B., and Banerjee, B.M. Liberation of H^+ , Al^{3+} and Fe^{3+} from hydrogen clays by neutral salts. Journal of Colloid Science. 155 (May 1945): 268-269.
- Muroyama, K., Hayashi, J., Sato, A. Production of activated carbon with high specific surface area from bean-curd refuse by chemical activation. Carbon. 172 (November 1996): 1164.
- Ooi, T.L., Yong, K.L., Dzulkefly, K., Wan Yunus, W.M.Z., and Hazimah, A.H. Crude glycerine recovery from glycerol residue waste from a palm kernel oil methyl ester plants. J. Palm Oil Res. 13 (2001): 16-22.

- Otowa, T., Nojima, Y., Miyazaki, T. Development of KOH activated high surface area carbon and its application to drinking water purification. Carbon. 35 (1997): 1315-1319.
- Pereira, M.F.R., Soares, S.F., Orfao, J.J.M., and Figueiredo, J. L. Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups. Carbon 41 (November 2003): 811-821.
- Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Martinez-Alonso, A., Suárez-Garcia, F., and Tascon, J.M.D. Synthetic carbons activated with phosphoric acid: I. Surface chemistry and ion binding properties. Carbon. 40 (August 2002): 1493-1505.
- Sanada, Y., Suzuki, M., and Fujimoto, K. Activated Carbon: Its Fundamentals and Application. Kodan-sha. Tokyo, 1975.
- Science Technology Engineering and Mathematics. 2012. Molecular monday: glycerol. [Online]. Available from: <http://www.stemftw.com/> [2013, January 15].
- Shetian, L., Sanjana, R., Musuku, S.A., and Sandun, F. Adsorption of glycerol from biodiesel washwaters. Environmental Technology. 30 (April 2009): 505-510.
- Smith, K.M., Fowler, G.D., Pullket, S., and Graham, N.J.D. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications. Water Research. 43 (June 2009): 2569-2594.
- Tessmer, C.H., Vidic, R.D., and Uranowski, L.J. Environmental Science and Technology 31 (1997) 1872.
- The Soap and Detergent Association. 1990. [Online]. Available from: <http://www.cleaningproductfacts.com/> [2013, January 20].
- U.S. Food and Drug Administration. 2010. [Online]. Available from: <http://www.fda.gov/> [2013, February 11].
- Xiaoge, C., and Jeyaseelan, S. Study of sewage sludge pyrolysis mechanism and mathematical modeling. Journal of Environmental Engineering. 127 (July 2001): 585-593.

- Yang, T., and Lua, A.C. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by potassium hydroxide activation. Microporous and Mesoporous Materials. 63 (September 2003): 113-124.
- Yu, G.X., Lu, S.X., Chen, H., Zhu, Z.N. Diesel fuel desulfurization with hydrogen peroxide promoted by formic acid and catalyzed by activated carbon. Carbon 43 (September 2005): 2285.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติของกลีเซอรอล

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล (ASTM D7637-10) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ละลายสารตัวอย่าง 0.5 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร
2. ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายเป็น 7.9 ± 0.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
3. เติมสารละลายกรดปริมาณ 50 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน และปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา และตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: การเตรียมสารละลายกรด มีวิธีดังต่อไปนี้
 - บดโซเดียมเมตาเพอริโอเดต ปริมาณ 60 ± 0.1 กรัม
 - ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ที่เติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 120 มิลลิลิตร
 - เทใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนเป็น 1,000 มิลลิลิตร
 - เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา ที่มีฝาปิด
4. เติมสารละลายเจือจางเอทิลีนไกลคอลปริมาณ 10 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 20 นาที อุณหภูมิไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: สารละลายเจือจางเอทิลีนไกลคอลเตรียมโดยเจือจางเอทิลีนไกลคอลกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 1:1 โดยปริมาตร
5. เติมสารละลายโซเดียมฟอร์เมต (NaCHO_2) 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 5 มิลลิลิตร และไตเตรต ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร จนมีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7.9 ± 0.2

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลของสารละลายที่ไร้ตัวอย่าง (Blank)

ครั้งที่	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (มิลลิลิตร)
1	79.90
2	77.00
เฉลี่ย	77.45

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลของสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร
ที่ใช้ในการไทเทรตกลีเซอรอลตัวอย่าง (กลีเซอรอลดิบปรับสภาพที่ผ่านการเพิ่มความ
บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า)

ครั้งที่	น้ำหนักสารตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการ ไทเทรตกลีเซอรอลตัวอย่าง	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	0.5532	120.00	83.45
2	0.5426	116.90	84.66
เฉลี่ย	-	-	84.05

วิธีการคำนวณ (แสดงตัวอย่างการคำนวณเฉพาะครั้งที่ 1)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต} &= \text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรตกลีเซอรอลตัวอย่าง} \\ &\quad - \text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต Blank} \\ &= 120.0 - 79.0 = 40.1 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของ NaOH ที่ใช้ไตรเตรท HCOOH เท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{NaOH } 1,000 \text{ มิลลิลิตร} &\text{ มีเนื้อสาร NaOH } 0.125 \text{ โมล} \\ \text{ถ้า NaOH } 40.1 \text{ มิลลิลิตร} &\text{ มีเนื้อสาร NaOH } \frac{0.125 \times 40.1}{1,000} = 5.01 \times 10^{-3} \text{ โมล} \end{aligned}$$

จากสมการปฏิกิริยา NaOH ทำปฏิกิริยากับ HCOOH ด้วยอัตราส่วนโมล 1:1

$$\begin{aligned} \text{กลีเซอรอล } 0.5532 \text{ กรัม} &\text{ เกิด HCOOH } 5.01 \times 10^{-3} \text{ โมล} \\ \text{ถ้ากลีเซอรอล } 100 \text{ กรัม} &\text{ เกิด HCOOH } \frac{5.01 \times 10^{-3} \times 100}{0.5532} = 0.906 \text{ โมล} \end{aligned}$$

มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล เท่ากับ 92.01

ดังนั้นกลีเซอรอล 0.906 โมล คิดเป็น $0.906 \times 92.01 = 83.45$ กรัม

ดังนั้นปริมาณกลีเซอรอลในสารตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 83.45 โดยน้ำหนัก

หรือใช้สูตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละกลีเซอรอล} &= \frac{0.125 \times 0.0921 \times (V_1 - V_2)}{m} \times 100 & (\text{ก.1}) \\ &= \frac{1.15125 \times (V_1 - V_2)}{m} \end{aligned}$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร ที่ใช้ในการไทเทรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายที่ไว้ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

0.125 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

0.0921 คือ น้ำหนักโมเลกุลของกลีเซอรอล

ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณแก้ว (ISO 2098-1972) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักเบ้ากระเบื้อง (Crucible) เปล่า
2. นำสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบมา 2 กรัม ใส่ในเบ้ากระเบื้องที่ชั่งน้ำหนักไว้เรียบร้อยแล้ว
3. นำไประเหยให้แห้งด้วยไฟอ่อนๆ (สังเกตว่าไม่มีควัน)
4. นำไปเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
5. นำออกมาใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccator)
6. เมื่อเย็นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของเถ้า} = \frac{A-B}{C} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของเบ้ากระเบื้องและเถ้าหลังจากเผาแล้ว (กรัม)

B คือ น้ำหนักของเบ้ากระเบื้องเปล่า (กรัม)

C คือ ปริมาณสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ (กรัม)

ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณสิ่งเจือปน

ปริมาณสิ่งเจือปนสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ร้อยละของสิ่งเจือปน} = 100 - G - A \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ G คือ ร้อยละของกลีเซอรอลที่ได้จากภาคผนวก ก.1

A คือ ร้อยละของเถ้าที่ได้จากภาคผนวก ก.2

ก.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่น (ISO 2099-1972) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ชั่งน้ำหนักขวดที่ทราบปริมาตรอย่างแน่นอน พร้อมฝาปิด
2. นำขวดวัดปริมาตรที่ชั่งแล้วมาใส่สารตัวอย่างให้เต็ม แล้วปิดฝา
3. จากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
4. เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้ว นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{X-Y}{Z} \quad (\text{ก.4})$$

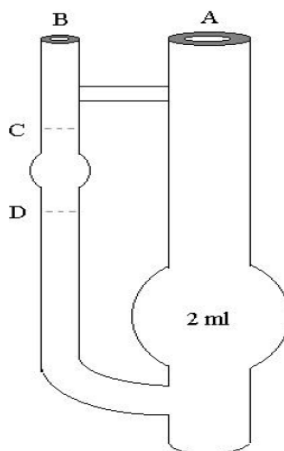
เมื่อ X คือ น้ำหนักของขวดวัดปริมาตรที่มีสารตัวอย่างอยู่ (กรัม)

Y คือ น้ำหนักของขวดวัดปริมาตรเปล่า พร้อมฝาปิด (กรัม)

Z คือ ปริมาตรที่แท้จริงของขวดวัดปริมาตร (มิลลิลิตร)

ก.5 การวิเคราะห์ความหนืด (ASTM D 445) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. บรรจุสารละลายที่ต้องการวัดปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในอุปกรณ์วัดความหนืดทางช่อง A ดังภาพที่ ก.1
2. นำจุกยางครอบไว้ที่ตำแหน่ง B ดูดสารละลายให้เคลื่อนขึ้นไปอยู่เหนือระดับตำแหน่ง C จากนั้นถอดจุกยางออกปล่อยให้สารละลายไหลกลับลงมา
3. จับเวลาการไหลของสารละลาย เริ่มจับเวลา $t = 0$ และ $t = t$ ใดๆ เมื่อสารละลายเคลื่อนจาก C ถึง D
4. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งหาค่าเวลาเฉลี่ย (t_{average}) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการความหนืดของสารละลาย



ภาพที่ ก.1 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความหนืดสารละลาย

วิธีการคำนวณ

$$\text{ความหนืด } (\eta) = Dk t_{\text{average}} \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของสารละลาย มีหน่วย $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ หรือ $\text{Pa}\cdot\text{s}$

k คือ ค่าคงที่ของอุปกรณ์การวัดมีค่า $1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$

t_{average} คือ เวลาเฉลี่ยที่สารละลายใช้ในการเคลื่อนที่จาก C ถึง D หน่วยวินาที (s)

D คือ ความหนาแน่นของสารละลายหน่วย kg/m^3 หาค่าได้จาก $D = \frac{M}{V}$

M คือ มวลของสารละลายหาได้จากการนำสารละลาย ปริมาตร 1 ml ซึ่งด้วยเครื่อง
ชั่ง 4 ตำแหน่ง

V คือ ปริมาตรของสารละลายที่นำไปซึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร (m^3)

ก.6 ค่าความเป็นกรด-เบส

ความเป็นกรด-เบสในงานวิจัยนี้ใช้แถบวัดค่าความเป็นกรด-เบสหรือค่า pH (MACHEREY-NAGEL pH-Fix 0-14)

1. จุ่มแถบวัดค่าความเป็นกรด-เบส ลงในสารละลายที่ต้องการวัด เป็นเวลา 1 วินาที ให้สารละลายสัมผัสกับแถบสีทั้งหมด
2. กำจัดสารละลายส่วนเกินโดยการสลัดออก
3. เทียบสีแถบวัดค่าความเป็นกรด-เบสกับสเกลสี จะได้ค่าความเป็นกรด-เบส

ก.7 สี (Color)

การวัดสีของกลีเซอรอลใช้มาตรฐานตามหลัก ASTM D1209 ซึ่งมีสารละลายสีต่อคมาตรฐานเป็นแบบแพลทินัม-โคบอลต์ ซึ่งในการวัดครั้งนี้ใช้เครื่อง Spectrophotometer ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance กับหน่วยสีของสารละลายสีมาตรฐานซึ่งจะใช้เป็น Calibration curve ในการหาหน่วยสีของกลีเซอรอลที่ต้องการวัด มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารละลายสีต่อคสีมาตรฐาน โดยละลายโพแทสเซียมคลอโรแพลทินेट (K_2PtCl_6) 0.623 กรัม และโคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 0.50 กรัม ในน้ำกลั่นซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มของสีเท่ากับ 500 หน่วย
2. เตรียมอนุกรมสารละลายสีมาตรฐานที่มีสี 100 200 300 และ 400 หน่วย โดยทำการเจือจางปริมาตรสารละลายสีต่อคสีมาตรฐานด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 20 มิลลิลิตร
3. นำอนุกรมสีทั้งหมดมาทำการวัด Absorbance ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นในการวัดคือ 384 นาโนเมตร
4. นำกลีเซอรอลตัวอย่างมาวัดค่า Absorbance

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกัมมันต์แบบประมาณ

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

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

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (\text{ข.1})$$

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

1. เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์หนักประมาณ 1.0 กรัม ในถ้วยกระเบื้อง
3. เผาถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาให้ปิดฝาคู่ถ้วยกระเบื้อง) ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (\text{ข.2})$$

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ASTM D 3174-95) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เผาด้วยกระบือียงพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. บรรจุถ่านกัมมันต์ตัวอย่างหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระบือียง
3. เผาถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (เปิดฝาด้วยกระบือียงขณะเผา) คำนวณปริมาณเถ้าในถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักถ่านตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (\text{ข.3})$$

ข.4 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จาก

ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว

$$= 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสารระเหย}) \quad (\text{ข.4})$$

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ตามวิธี Boehm titration ต้องใช้สารละลายทั้งหมด 4 ชนิด (Tessmer และคณะ 1977; Chen และคณะ, 2002) คือ

1. NaOH ความเข้มข้น 0.05 และ 0.25 นอร์มัล
2. Na₂CO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
3. NaHCO₃ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล
4. H₂SO₄ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

วิธีการเตรียมสารละลาย และวิธีวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

ค.1 วิธีเตรียมสารละลาย

ค.1.1 การเตรียมสารละลายที่เป็นของแข็ง

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

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

$$\text{จะได้ Na ใน NaOH มีเลขออกซิเดชัน} = (\text{Na} \times 1) + (-1 \times 1)$$

$$\text{Na} = 1$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = 1 \times 1 = 1$$

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

$$\text{จาก น้ำหนักสมมูล} = \text{น้ำหนักสูตร} / n$$

$$\text{จะได้ น้ำหนักสมมูล} = \frac{40}{1} = 40$$

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

$$\text{จาก จำนวนกรัมสมมูล} = \text{น้ำหนักสาร} \times \text{ปริมาตรที่ต้องการ}$$

$$\text{จะได้ จำนวนกรัมสมมูล} = 0.05 \times 1 = 0.05$$

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

$$\text{จาก น้ำหนักสารที่ใช้} = \text{จำนวนกรัมสมมูล} \times \text{น้ำหนักสมมูล}$$

$$\text{จะได้ น้ำหนักสารที่ใช้} = 0.05 \times 40 = 2 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องนำ NaOH น้ำหนัก 2 กรัม ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ค.1.2 การเตรียมสารละลายที่เป็นของเหลว

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

คำนวณหาเลขออกซิเดชันของอะตอมที่เปลี่ยน (n)

$$\text{จะได้ } H \text{ ใน } H_2SO_4 \text{ มีเลขออกซิเดชัน} = (H \times 1) + (-2 \times 1)$$

$$H = 2$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = 1 \times 2 = 2$$

คำนวณหาน้ำหนักสมมูล

$$\text{จาก } \text{น้ำหนักสมมูล} = \text{น้ำหนักสูตร} / n$$

$$\text{จะได้ } \text{น้ำหนักสมมูล} = \frac{98}{2} = 49$$

คำนวณหาจำนวนกรัมสมมูล

$$\text{จาก } \text{จำนวนกรัมสมมูล} = \text{น้ำหนักสาร} \times \text{ปริมาตรที่ต้องการ}$$

$$\text{จะได้ } \text{จำนวนกรัมสมมูล} = 0.1 \times 1 = 0.1$$

คำนวณหาน้ำหนักสารที่ใช้

$$\text{จาก } \text{น้ำหนักสารที่ใช้} = \text{จำนวนกรัมสมมูล} \times \text{น้ำหนักสมมูล}$$

$$\text{จะได้ } \text{น้ำหนักสารที่ใช้} = 0.1 \times 49 = 4.9 \text{ กรัม}$$

$$\text{จาก } \text{ปริมาตรสารที่ใช้} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{ความหนาแน่น} \times \text{ความเข้มข้น}}$$

$$\text{จะได้ } \text{ปริมาตรสารที่ใช้} = \frac{4.9}{1.84 \times 0.96} = 2.8 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ต้องนำ H_2SO_4 2.8 มิลลิลิตร ไปละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร

ค.2 การวิเคราะห์

1. ชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิด 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 2 วัน
4. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วดูดสารละลายที่ได้ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. ทำการไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล บันทึกปริมาตรที่ใช้ โดยอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแต่ละชนิดมีดังนี้ NaOH ใช้โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) Na_2CO_3 ใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) และ NaHCO_3 ใช้เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange)

ค.3 การคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชัน

1. ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (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

ตารางที่ ค.1 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	(ก) 0.05N NaOH	(ข) 0.25N NaOH	(ค) 0.05N Na ₂ CO ₃	(ง) 0.05N NaHCO ₃
(1) น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	0.2136	0.2341	0.2205	0.2467
(2) ปริมาตรสารละลาย (มิลลิลิตร)	20.0	20.0	20.0	20.0
(3) ปริมาตร 0.1N H ₂ SO ₄ (มิลลิลิตร)	11.3	49.6	9.8	11.0
(4) Blank	12.0	50.7	10	11.2
(5) = (4)-(3)	0.7	1.1	0.2	0.2
(6) = [(5) × 0.1]/20	0.0035	0.0055	0.0010	0.0010
(7) = [(6) × 50]/(1)	0.8193	1.1747	0.2268	0.2027

จากตารางเมื่อนำมาคำนวณปริมาณหมู่กรดแต่ละชนิดจะได้ดังนี้

- ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล เท่ากับ (ง) หรือเท่ากับ 0.2027 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่แลกโตน เท่ากับ (ค) – (ง) หรือเท่ากับ 0.2268 – 0.2027 = 0.0241 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิล เท่ากับ (ก) – (ค) หรือเท่ากับ 0.8193 – 0.2268 = 0.5925 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม
- ปริมาณหมู่คาร์บอนิล เท่ากับ (ข) – (ก) หรือเท่ากับ 1.1747 – 0.8193 = 0.6250 มิลลิอิกวาเลนต์ต่อกรัม

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM D 4607-94 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ง.1 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 70 มิลลิลิตร เติมนลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
2. น้ำแข็งความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งน้ำแข็งปริมาณ 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีปริมาตรเป็น 10 กรัม โดยน้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้ในวันที่เตรียมเท่านั้น
3. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 24.820 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เติมนโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปริมาณ 0.1 กรัม แล้วปรับให้สารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรด้วยขวดปรับปริมาตร
4. สารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งไอโอดีน (I_2) ปริมาณ 12.700 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ปริมาณ 19.10 กรัม ผสมเข้าด้วยกันแล้วละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมงจนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร
5. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตความเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโพแทสเซียมไอโอเดตให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งปริมาณ 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นโดยปรับให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

ง.2 การเทียบมาตรฐานสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต
 - ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมนโพแทสเซียมไอโอไดด์ปริมาณ 2 กรัม เขย่าให้ละลาย แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร

- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้ น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_1 = \frac{P \times R}{S} \quad (\text{ง.1})$$

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

2. สารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้ น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายใสไม่มีสี
- คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจาก

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I} \quad (\text{ง.2})$$

โดย N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (นอร์มัล)

I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)

ง.3. การวิเคราะห์ค่าไอโอดีน

1. บดและคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร
2. อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

3. ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับ M ให้มีความละเอียดของทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในขวดชมพู ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีจุกปิด
 *** หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3 ค่าต่อตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าประมาณ 0.01 0.02 และ 0.03 โดยการประมาณน้ำหนักตัวอย่างแสดงดังตารางที่ ก.1
4. เติมสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แกว่งขวดเพื่อให้ถ่านกัมมันต์ชุ่มด้วยสารละลายกรด แล้วนำไปต้มให้เดือดประมาณ 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าหรือกำมะถันออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
5. เติมสารละลายไอโอดีนที่เตรียมได้ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ เป็นเวลา 30 วินาที
6. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 โดยสารละลายที่ได้ปริมาณ 20 มิลลิลิตรนำมาล้างขวดและปิเปตที่ใช้
7. ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่เตรียมได้ โดยใช้ น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร
8. คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X / M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก

$$X / M = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (\text{ง.3})$$

โดย X / M คือ ปริมาณที่ไอโอดีนถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

A คือ $N_2 \times 12693.0$

B คือ $N_1 \times 126.93$

M คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

DF คือ $\frac{I + H}{F}$, I คือ ปริมาณสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

F คือ ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

H คือ ปริมาณของสารที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร)

$$C = \frac{N_1 \times S}{F} \quad (\text{ง.4})$$

โดย C คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ (นอร์มัล)

9. นำค่า X / M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่าง log C (แกน x) และ log (X / M) (แกน y) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง
10. จากความสัมพันธ์เส้นตรงที่ได้ ที่ตำแหน่ง log C = -1.699 หรือ C = 0.02 จะทราบค่าบนแกน y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าไอโอดีน (IA) ได้ดังนี้

$$IA = 10^y \quad (\text{ง.5})$$

ตารางที่ ง.1 การประมาณน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
IA	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	IA	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.386
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.350	0.309

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชาวนวิศ อรรถานิธิ์ เกิดวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และสำเร็จหลักสูตรในเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556