

การผลิตซ้ำเพื่อพิมพ์จัดวางจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเป็ยร้ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จาก
กระบวนการผลิตไบโอดีเซล



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BRIQUETTE FUEL PRODUCTION FROM WASTEWATER SLUDGE OF BEER INDUSTRY
AND BIODIESEL PRODUCTION WASTES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย
อุตสาหกรรมเบียร์ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการ
ผลิตไบโอดีเซล

โดย

นายปริญญารัฐ หนูสงค์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วิจิรวณิช)

ปริญญ์รัฐ หนูสงค์ : การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เบียร์ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (BRIQUETTE FUEL PRODUCTION FROM WASTEWATER SLUDGE OF BEER INDUSTRY AND BIODIESEL PRODUCTION WASTES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเงื่อนไขในกระบวนการคาร์บอนและสัดส่วนผสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน (1) ศึกษาเงื่อนไขในการคาร์บอนจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูงด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล โดยมีปัจจัยนำเข้า ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ระหว่าง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส และเวลา 10 ถึง 120 นาที ตามลำดับ (2) ศึกษาเงื่อนไขของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนในระดับสูงด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบผสม (3) คำนวณผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการวิจัยพบว่า (1) เงื่อนไขที่เหมาะสมในการคาร์บอนจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยเงื่อนไขดังกล่าวมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดร้อยละ 10.01 ± 0.30 โดยน้ำหนัก (2) เงื่อนไขที่เหมาะสมของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียร่วมกับกากดินฟอกสี โดยมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 30 ของของผสม พบว่าอัตราส่วนกากตะกอนบำบัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อกากดินฟอกสีร้อยละ 5 ให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดร้อยละ 3.05 ± 0.05 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนสูงสุด 3,548.10 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (3) ผลิตภาพด้านพลังงานหรือสัดส่วนของค่าพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 11.29

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870348021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: FUEL BRIQUETTES / BREWERY SLUDGE / BLEACHING EARTH / CRUDE GLYCEROL

PARINRAT NUSONG: BRIQUETTE FUEL PRODUCTION FROM WASTEWATER SLUDGE OF BEER INDUSTRY AND BIODIESEL PRODUCTION WASTES.

ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUJINDANETR, Ph.D., 110 pp.

The objective of this research was to study the optimum condition for fuel briquettes produced from wastewater sludge of the beer industry and biodiesel production wastes (bleaching earth and crude glycerol).

This research was divided into three parts. Part I studied the effects of carbonization of brewery wastewater sludge for high fixed carbon using full factorial design. The independent factors were the temperature and time. Part II studied the ratio between brewery wastewater sludge, bleaching earth and crude glycerol for its high fixed carbon and high heating value using mixture design. Part III studied the energy productivity.

The results showed that (1) the maximum fixed carbon of 10.01 ± 0.30 % by weight was obtained at a temperature of 350°C for 30 minutes. (2) The appropriate ratio of brewery wastewater sludge and bleaching earth by weight was 95:5. Note that the type of briquetting process carried out here was a cold process using crude glycerol (30% by weight of the mixture) as the binder. This condition provided the highest fixed carbon and heating value of approximately 3.97 ± 0.16 % by weight and 3,548.10 kcal/kg, respectively. (3) The energy productivity (energy gained - energy used ratio) provided the highest energy productivity of approximately 11.29.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ความช่วยเหลือ รวมทั้ง
ชี้แนะและแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิรพัฒน์ เงามประเสริฐ ประธาน
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ธิจิรวณิชกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณา
สละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และคำปรึกษา จน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท ปทุมธานีบริวเวอรี่ จำกัด ที่อนุเคราะห์ภาค
ตะกอนบำบัดน้ำเสีย และบริษัท บางจากไบโอฟูเอล จำกัด ที่อนุเคราะห์ภาคดินฟอสฟอรัสและกลี
เซอรอลติบในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งคณาจารย์และบุคลากร
ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอำนวยความสะดวก
สะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุก
ท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาโดย
ตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.6 ขอบเขตการวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อุตสาหกรรมเบียร์ในประเทศไทย	5
2.2 กระบวนการผลิตเบียร์.....	5
2.2.1 การย่อยสลาย (Mashing)	6
2.2.2 การกรองครั้งที่ 1 (Wort Filtration)	6
2.2.3 การต้ม (Wort Boiling)	6
2.2.4 การหมัก (Fermentation)	7
2.2.5 การบ่ม (Maturation).....	7

2.2.6 การกรองครั้งที่ 2 (Beer Filtration)	7
2.2.7 การบรรจุ (Packaging)	7
2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์.....	8
2.3.1 น้ำเสียจากช่วงการเตรียมน้ำหวาน	8
2.3.2 น้ำเสียจากการล้างถังหมัก	9
2.3.3 น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรองเบียร์และถังเก็บ.....	9
2.3.4 น้ำเสียจากการล้างขวดและน้ำจากการผ่านความร้อน.....	9
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	9
2.4.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ	9
2.4.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี	10
2.4.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ	13
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์	14
2.6 กากตะกอนน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์	15
2.7 การจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	16
2.7.1 การปฏิบัติขั้นต้น (Primary Operation)	17
2.7.2 การเพิ่มความเข้มข้นกากตะกอน (Thickener)	18
2.7.3 การปรับเสถียรกากตะกอน (Stabilization)	18
2.7.4 การปรับสภาพกากตะกอน (Conditioning).....	18
2.7.5 การรีดน้ำจากกากตะกอน (Dewatering)	18
2.7.6 การกำจัดกากตะกอนขั้นสุดท้าย (Ultimate Disposal).....	18
2.8 ไบโอดีเซล	19
2.9 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	20

2.9.1 การเตรียมวัสดุ.....	22
2.9.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.9.3 การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล.....	24
2.9.4 การนำเมทานอลกลับคืน.....	24
2.9.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์.....	25
2.9.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ.....	25
2.9.7 การนำกลีเซอรินกลับคืน.....	25
2.10 ดินฟอกสี.....	26
2.10.1 ฟลูเลอร์เอิร์ธ (Fuller's Earth).....	26
2.10.2 เบนโทไนต์ (Bentonite).....	26
2.11 กลีเซอรอล.....	27
2.12 เชื้อเพลิง.....	28
2.13 เชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	29
2.13.1 วัสดุสำหรับทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	29
2.13.2 วิธีการอัดแท่งเชื้อเพลิง.....	29
2.13.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	30
2.14 กระบวนการคาร์บอน.....	31
2.14.1 กระบวนการผลิตถ่านชาร์.....	31
2.14.2 ปัจจัยที่มีผลต่อถ่านชาร์.....	32
2.15 การออกแบบการทดลอง.....	33
2.15.1 ประเภทของการออกแบบการทดลอง.....	33
2.15.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	34

2.15.3 การออกแบบการทดลองแบบผสม	35
2.16 การวิเคราะห์ผล	38
2.16.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	38
2.16.2 การทดสอบความถูกต้องของสมมติฐาน (Hypothesis Adequacy Checking) ..	39
2.16.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared, R^2).....	40
2.17 กำลังไฟฟ้า	40
2.18 พลังงานไฟฟ้า	40
2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
3.1 วัสดุ	45
3.1.1 กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	45
3.1.2 กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบ.....	45
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	45
3.2.1 การคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	45
3.2.2 การอัดแท่งเชื้อเพลิง	45
3.3 แผนการวิจัย.....	46
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	46
3.4.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	46
3.4.2 การคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	46
3.4.3 การผสมของวัสดุระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบ	48
3.4.4 การทดสอบสมบัติของวัสดุและเชื้อเพลิงอัดแท่ง	50
3.4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับสัดส่วนผสมของวัสดุ.....	50

3.4.6 การคำนวณผลผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	51
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	54
4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้.....	54
4.1.2 สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนดิบและกากดินฟอกสี	56
4.1.3 สมบัติเชิงเชื้อเพลิงของกากตะกอนดิบ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบ.....	56
4.2 ผลของการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียกับสมบัติต่าง ๆ	56
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์	57
4.2.2 ผลของเวลาที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ ผ่านการคาร์บอนไนซ์.....	60
4.2.3 ผลของอุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียสและเวลาในช่วง 30 ถึง 90 นาทีที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการ คาร์บอนไนซ์	63
4.2.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ	66
4.3 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดิน ฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	71
4.3.1 ผลของสัดส่วนของกลีเซอรอลดิบที่มีต่อลักษณะรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	71
4.3.2 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ.....	72
4.3.2 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติเชิงเชื้อเพลิง	74
4.3.3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ	75
4.4 การเปรียบเทียบค่าความร้อน.....	86
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอัตราส่วนของวัสดุ.....	89

4.6 ผลการคำนวณผลผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้.....	96
5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพ.....	104
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ.....	105
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติเชิงเชื้อเพลิง.....	107
ภาคผนวก ง การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในการวิจัย.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์.....	8
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์	16
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสี.....	27
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ	47
ตารางที่ 3.2 ระดับของตัวแปรในการทำการทดลอง	48
ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองการหาอัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบในเชื้อเพลิงอัดแท่ง	48
ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองการผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่อัตราส่วนต่าง ๆ	49
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้	55
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์โดยมีอุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรอิสระ	69
ตารางที่ 4.3 ลักษณะของรูปร่างเชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบต่าง ๆ	71
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยมีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีเป็นตัวแปรอิสระ	79
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยมีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีเป็นตัวแปรอิสระ	83
ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้	85
ตารางที่ 4.7 ค่าความร้อนจากการคำนวณก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุ.....	86
ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	87
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณหลังทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	88

ตารางที่ 4.10 ค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตรา ส่วนผสมของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอสฟอรัสต่าง ๆ	90
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิง อัดแท่งในกรณีที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์	93
ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิง อัดแท่งในกรณีที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียผ่านการคาร์บอนไนซ์	93
ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนาแน่นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนการอบแห้ง	104
ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความหนาแน่นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	104



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	แผนผังกระบวนการผลิตเปียร์.....	6
รูปที่ 2.2	แผนผังการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเปียร์.....	14
รูปที่ 2.3	แผนผังการจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย.....	17
รูปที่ 2.4	สมการเคมีสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล... 20	
รูปที่ 2.5	แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	21
รูปที่ 2.6	แผนผังกระบวนการปรับสภาพน้ำมันปาล์มดิบ.....	22
รูปที่ 2.7	ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น.....	36
รูปที่ 2.8	การกำหนดจุดด้วยการออกแบบแบบดี-ออฟติมอล.....	37
รูปที่ 3.1	แผนภูมิกระบวนการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	52
รูปที่ 3.2	แผนภูมิการคำนวณผลิตภาพด้านพลังงาน.....	53
รูปที่ 4.1	ปริมาณความชื้นของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	58
รูปที่ 4.2	ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	58
รูปที่ 4.3	ปริมาณเถ้าของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	59
รูปที่ 4.4	ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	59
รูปที่ 4.5	ปริมาณความชื้นของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	61
รูปที่ 4.6	ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	61

รูปที่ 4.7 ปริมาณเถ้าของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	62
รูปที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	62
รูปที่ 4.9 ปริมาณความชื้นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที.....	64
รูปที่ 4.10 ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที.....	64
รูปที่ 4.11 ปริมาณเถ้าของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที.....	65
รูปที่ 4.12 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที.....	65
รูปที่ 4.13 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	67
รูปที่ 4.14 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	67
รูปที่ 4.15 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	68
รูปที่ 4.16 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	70
รูปที่ 4.17 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว.....	70
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของ กากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	72
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหยกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของ กากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	73
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้ากับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของ กากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	73

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนคงตัวกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของ กากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง	74
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของ กาก ตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง	75
รูปที่ 4.23 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณ คาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง	77
รูปที่ 4.24 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคง ตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง	77
รูปที่ 4.25 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวใน เชื้อเพลิงอัดแท่ง	78
รูปที่ 4.26 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคง ตัว	80
รูปที่ 4.27 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของค่าความร้อน ใน เชื้อเพลิงอัดแท่ง	81
รูปที่ 4.28 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของค่าความร้อน ใน เชื้อเพลิงอัดแท่ง	81
รูปที่ 4.29 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความร้อนในเชื้อเพลิง อัดแท่ง	82
รูปที่ 4.30 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อน	84
รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณกับค่าความร้อนจากการทดลองใน อัตราส่วนต่าง ๆ ของวัสดุ	90
รูปที่ 4.32 สมดุลพลังงาน	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยในช่วงที่ผ่านมาได้มีการเติบโตที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก หนึ่งในนั้น คือ อุตสาหกรรมเบียร์ จากสถิติปริมาณการจำหน่ายเบียร์ พบว่าในปี พ.ศ. 2557 มีปริมาณการจำหน่ายเบียร์เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2547 ร้อยละ 24.36 [1] จากการขยายตัวเพิ่มขึ้นดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ จากกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางน้ำ ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ย 3 ถึง 10 ลิตรต่อการผลิตเบียร์ปริมาณ 1 ลิตร [2] กระบวนการบำบัดมลพิษทางน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ กระบวนการบำบัดทางเคมี และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ โดยกระบวนการที่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบระบบตะกอนเร่ง ดังนั้นจึงส่งผลให้แต่ละโรงงานอุตสาหกรรมมีกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ต้องจัดการและกำจัดเป็นจำนวนมาก ซึ่งวิธีกำจัดกากตะกอนบำบัดน้ำเสียดังกล่าวสามารถทำได้โดยการฝังกลบ การถมที่ การผลิตเป็นอาหารสัตว์ และการผลิตเป็นปุ๋ย เป็นต้น ทั้งนี้การเลือกวิธีกำจัดกากตะกอนบำบัดน้ำเสียนั้นควรคำนึงถึงองค์ประกอบของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียแต่ละอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้คุณภาพและประโยชน์มากที่สุด ซึ่งทางเลือกที่เหมาะสม คือ การนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทน เนื่องจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีค่าพลังงานความร้อนค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มประโยชน์ให้กับของเสียและลดอัตราการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย

สถานการณ์การใช้น้ำมันในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและดำรงชีวิตของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยน้ำมันที่ใช้ส่วนใหญ่ล้วนเป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ปัจจุบันภาครัฐจึงลดอัตราการนำเข้าน้ำมันด้วยการสนับสนุนในเรื่องของการพัฒนาพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานทดแทนที่มาจากชีวภาพ เช่น น้ำมันแก๊สโซฮอล์ น้ำมันดีเซลปาล์มบริสุทธิ์ และน้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่นิยมใช้ปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุหลักในการผลิต ซึ่งปาล์มน้ำมันดังกล่าวจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยดินฟอสฟอรัสในการกำจัดขี้ การฟอสฟอรัส และการกำจัดกลิ่น ตามลำดับ [3] ซึ่งดินฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้งานจะเป็นกากของเสียอุตสาหกรรมโดยมีปริมาณ 15 ถึง 18 ตันต่อวัน [4] ดังนั้นจึงต้องนำไปกำจัดตามวิธีที่ถูกต้อง เช่น การฝังกลบ การหมักทำเป็นปุ๋ย หรือการผสมเป็นสารปรับปรุงดิน เป็นต้น [5]

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะเป็นการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรินและเอสเทอร์ ซึ่งก็คือน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลปริมาณ 100 ลิตร จะมีกลีเซอรินดิบเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ประมาณ 8 กิโลกรัม [6] โดยกลีเซอรินที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะแก่การนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตยาและเครื่องสำอาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิงจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ผสมร่วมกับกากดินฟอสเฟตและกลีเซอรินซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำมัน และถ่านหิน นอกจากนี้ยังเป็นสร้างประโยชน์และมูลค่าเพิ่มให้แก่ของเสียอุตสาหกรรมจากกระบวนการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดเงื่อนไขในกระบวนการคาร์บอนไนซ์และสัดส่วนผสมที่ทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนในระดับสูงที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

1.3 สมมติฐาน

1. อุณหภูมิและระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลให้เชื้อเพลิงจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวแตกต่างกัน
2. สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียต่อวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีผลให้เชื้อเพลิงจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนแตกต่างกัน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในประเทศและต่างประเทศ
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. ศึกษาตัวแปรในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูง โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่
 - 3.1 อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์อยู่ในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส
 - 3.2 ระยะเวลาการคาร์บอนไนซ์อยู่ในช่วง 10 ถึง 120 นาที

4. ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงมีปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนในระดับสูง ซึ่งมีกลีเซอรอลเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของผสม โดยอัตราส่วนที่ศึกษา ได้แก่

4.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังการคาร์บอนไนซ์ โดยเรียกว่า กากตะกอนเผา ในการผลิตเชื้อเพลิงอยู่ในช่วงร้อยละ 55 ถึง 95 โดยน้ำหนัก

4.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกากดินฟอกสี โดยเรียกว่า กากดิน วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 45 โดยน้ำหนัก

5. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผล สรุปผลเพื่อเขียนบทความวิจัยและวิทยานิพนธ์

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาระดับอุณหภูมิ และระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์ เพื่อให้กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย มีปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูงด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

2. ศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียต่อวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อให้เชื้อเพลิงจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนในระดับสูงด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสม

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบอุณหภูมิ ระยะเวลา และสัดส่วนโดยน้ำหนักในการผลิตเชื้อเพลิงจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

2. สามารถนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ประโยชน์ด้วยการผลิตเชื้อเพลิง

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัยประกอบไปด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน วิธีดำเนินงาน แผนผังวิธีการดำเนินงาน ขอบเขตการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 อุตสาหกรรมเบียร์ในประเทศไทย กระบวนการผลิตเบียร์ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ กระบวนการบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ กากตะกอนน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ การจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดินฟอสฟอรัส กลีเซอรอล เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงอัดแท่ง กระบวนการคาร์บอน-ไนโตรเจน การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผล กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ แผนการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และกิจกรรมในงานวิจัย

บทที่ 4 สมบัติของวัสดุที่ใช้ ผลของการคาร์บอนไนโตรเจนที่ตกตะกอนบำบัดน้ำเสียกับสมบัติต่าง ๆ ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนโตรเจน กากดินฟอสฟอรัส และกลีเซอรอลติดกับสมบัติต่าง ๆ การเปรียบเทียบค่าความร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอัตราส่วนของวัสดุ และการคำนวณผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่องการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีและความรู้ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 5 ส่วน คือ 1. ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเบียร์ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ และการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ 2. ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ของเสียและผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 3. ทฤษฎีเกี่ยวกับการคาร์บอน และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 4. เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และส่วนสุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยทฤษฎีและเครื่องมือต่าง ๆ จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

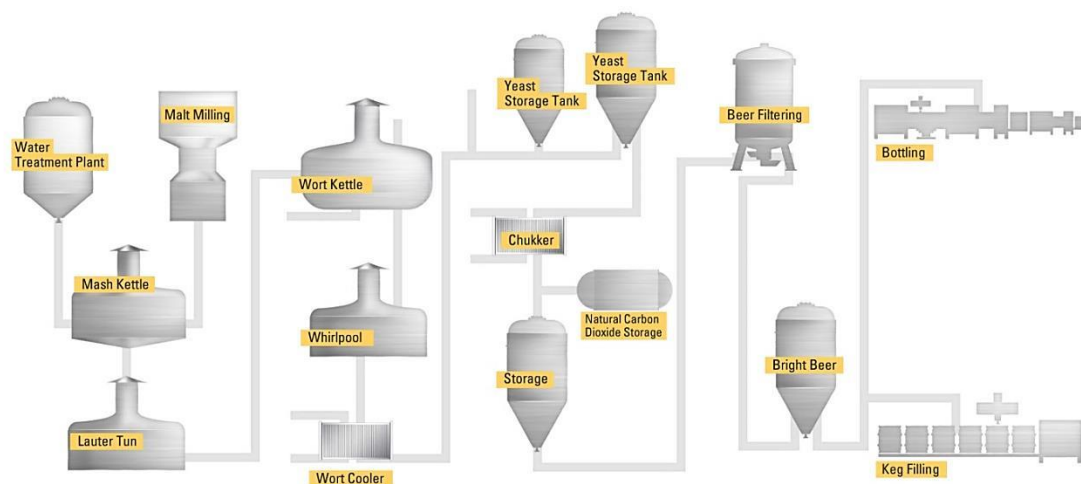
2.1 อุตสาหกรรมเบียร์ในประเทศไทย

อุตสาหกรรมเบียร์เกิดขึ้นครั้งแรกในประเทศไทยโดยพระยาภิรมย์ภักดี (บุญรอด เศรษฐบุตร) เมื่อ พ.ศ. 2476 ในนามของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด ผู้กำหนดเบียร์สิงห์ จากนั้นในปี พ.ศ. 2535 ภาครัฐเปิดเสรีทางการค้าจึงส่งผลให้นักลงทุนต่างชาติเข้ามาลงทุนในอุตสาหกรรมเบียร์เพิ่มขึ้น จึงก่อให้เกิดบริษัท เบียร์ไทย (1991) จำกัด ผู้กำหนดเบียร์ช้าง บริษัท คาลส์เบอร์ก บริวเวอรี่ จำกัด ผู้กำเนิดเบียร์คาร์ลสเบอร์ก และบริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิคบริวเวอรี่ จำกัด ผู้กำหนดเบียร์ไฮเนเก้น [7]

ปริมาณการผลิตเบียร์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 อยู่ที่ 1,500 ล้านลิตร ซึ่งมีมูลค่า ยอดขายเท่ากับ 139,734 ล้านบาท โดยสามารถแบ่งตลาดเบียร์ออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ ตลาดเบียร์พรีเมียม (Premium Beer Market) มีมูลค่าเท่ากับ 129,831 ล้านบาท ตลาดเบียร์เมนสตรีม (Mainstream Beer Market) มีมูลค่าเท่ากับ 6,546 และตลาดเบียร์อีโคโนมี (Economy Beer Market) มีมูลค่าเท่ากับ 3,356 ล้านบาท [8]

2.2 กระบวนการผลิตเบียร์

กระบวนการผลิตเบียร์ของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด สามารถแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนหลักด้วยกัน ดังแผนผังในรูปที่ 2.1 [9] กล่าวคือ การย่อยสลาย การกรองครั้งที่ 1 การต้ม การหมัก การบ่ม การกรองครั้งที่ 2 และการบรรจุ [9]



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตเบียร์

2.2.1 การย่อยสลาย (Mashing)

ข้าวมอลท์ (Malt) ที่ผ่านกระบวนการไม่ จะถูกนำมาผสมกับน้ำที่ผ่านการปรับสภาพ มีการให้ความร้อน และควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำกรย่อยแป้งที่มีอยู่ในข้าวมอลท์ให้เป็นน้ำตาล

2.2.2 การกรองครั้งที่ 1 (Wort Filtration)

การกรองเป็นการนำของผสมที่ผ่านการเปลี่ยนแป้งที่มาจากข้าวมอลท์เป็นน้ำตาล แล้วเข้าสู่ถังกรอง (Lauter Tun) เพื่อแยกกากออกไป และนำของเหลว (Wort) ที่ได้นี้เข้าสู่กระบวนการต้มเดือด

2.2.3 การต้ม (Wort Boiling)

ของเหลวที่ได้จากการกรองจะถูกส่งมายังหม้อต้ม (Wort Kettle) เพื่อต้มเดือดประมาณ 60 ถึง 90 นาที เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์และหยุดการทำงานของเอนไซม์และเติมดอกฮอปส์ (Hop) หรือผลิตภัณฑ์จากฮอปส์ เพื่อให้ได้ความขมตลอดจนกลิ่นและรสชาติที่ดีของเบียร์ จากนั้นของเหลวที่ผ่านการต้มเดือดถูกส่งเข้าถังพัก เพื่อให้มีการตกตะกอนของโปรตีนจากฮอปส์และอื่น ๆ ของเหลวที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว จะถูกนำไปลดอุณหภูมิ ก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการหมัก

2.2.4 การหมัก (Fermentation)

ของเหลวที่ถูกพักและลดอุณหภูมิจะถูกเติมยีสต์และอากาศ จากนั้นจะถูกนำไปหมักในถังสแตนเลสขนาดใหญ่ในอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งยีสต์จะเพิ่มปริมาณเซลล์ และเปลี่ยนน้ำตาลที่มีอยู่ในของเป็นแอลกอฮอล์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อการหมักสมบูรณ์ จะไม่มีน้ำตาลเหลือ การหมักนี้ใช้เวลาประมาณ 7 ถึง 10 วัน เมื่อเสร็จแล้วจะมีการแยกยีสต์ออกซึ่งน้ำเบียร์ที่ได้เรียกว่า น้ำเบียร์ (Young Beer)

2.2.5 การบ่ม (Maturation)

น้ำเบียร์ที่ได้นี้ จะยังไม่มีสีและรสชาติที่ดีนัก จึงต้องนำมาบ่มในถังเย็นสุญญากาศ เมื่อบ่มได้ที่แล้ว น้ำเบียร์นี้จะต้องเข้าสู่กระบวนการกรอง

2.2.6 การกรองครั้งที่ 2 (Beer Filtration)

เบียร์ที่ผ่านการบ่มแล้วจะถูกนำมากรองด้วยเครื่องกรองให้ได้เบียร์ที่ใส และควบคุมปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้มาตรฐาน ซึ่งจะได้เป็นน้ำเบียร์ลาเกอร์ และพร้อมที่จะบรรจุลงภาชนะต่าง ๆ

2.2.7 การบรรจุ (Packaging)

การบรรจุเบียร์แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ การบรรจุแบบขวด และการบรรจุแบบถัง

2.2.7.1 การบรรจุแบบขวด

น้ำเบียร์ที่นำมาบรรจุขวดและกระป๋องนั้นจะต้องผ่านการให้ความร้อน (Pasteurization) เพื่อให้ได้เบียร์ที่มีความร้อนคงตัวและมีอายุการเก็บที่นานขึ้น เบียร์ทุกขวดที่บรรจุ ปิดฝา และปิดฉลากแล้ว จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการตรวจเป็นครั้งสุดท้าย ก่อนที่จะนำสู่การจัดส่งถึงผู้บริโภค

2.2.7.2 การบรรจุแบบถัง

เบียร์ที่ผ่านการกรองแล้วจะนำมาบรรจุลงถังเบียร์สด ที่ทำความสะอาดอย่างดีและจะไม่นำไปสู่กระบวนการให้ความร้อน ซึ่งเบียร์ที่ได้นี้จะเรียกว่า เบียร์สด และจำเป็นต้องเก็บในที่เย็นตลอดเวลา

2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์โดยทั่วไปแล้วจะมีปริมาณโดยเฉลี่ย 3 ถึง 10 ลิตรต่อการผลิตเบียร์ปริมาณ 1 ลิตร [2] ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีสารอาหารและแร่ธาตุต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1 [10], [11], [12]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

องค์ประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
ค่าความเป็นกรด-เบส		4.5 – 12.0
ค่าซีไอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	2,000 - 6,000
ค่าบีไอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	1,200 - 3,600
ค่าของแข็งทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	200 - 1,000
ค่าไขมันและน้ำมัน	มิลลิกรัมต่อลิตร	25 - 32
โปรตีนดิบ	มิลลิกรัมต่อลิตร	62 - 754
กลูโคส	มิลลิกรัมต่อลิตร	67 - 70
ไนโตรเจน	มิลลิกรัมต่อลิตร	25 - 80
ฟอสฟอรัส	มิลลิกรัมต่อลิตร	10 - 50
โลหะหนัก	มิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณต่ำ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด สามารถแยกตามแหล่งกำเนิดได้ 4 ส่วน คือ น้ำเสียจากช่วงการเตรียมน้ำหวาน น้ำเสียจากการล้างถังหมัก น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรองเบียร์และถังเก็บ และน้ำเสียจากการล้างขวดและน้ำจากการผ่านความร้อน ดังต่อไปนี้ [13]

2.3.1 น้ำเสียจากช่วงการเตรียมน้ำหวาน

น้ำเสียส่วนนี้มาจากการล้างถังผสม หม้อต้ม และเครื่องทำความเย็น จะประกอบไปด้วยน้ำตาลเดกซ์ทรีน (Dextrin) น้ำตาลมอลโตส (Maltode) แป้ง และกากเมล็ดพืชเล็กน้อย ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้มีค่าซีไอดีประมาณ 3,000 ถึง 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 4.0

2.3.2 น้ำเสียจากการล้างถังหมัก

น้ำเสียส่วนนี้จะประกอบไปด้วยแอลกอฮอล์และโปรตีนจากยีสต์ โดยมีค่าซีโอดี ประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.3 น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรองเบียร์และถังเก็บ

น้ำเสียส่วนนี้จะประกอบไปด้วยแอลกอฮอล์และสารกรองเบียร์ โดยมีค่าซีโอดี ประมาณ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.4 น้ำเสียจากการล้างขวดและน้ำจากการผ่านความร้อน

น้ำเสียจากการล้างขวดจะคิดเป็นร้อยละ 80 ของน้ำเสียทั้งหมด โดยมีค่าซีโอดี ประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 11.0

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ [14] คือ

- 1) กระบวนการทางกายภาพ
- 2) กระบวนการทางเคมี
- 3) กระบวนการทางชีวภาพ

กระบวนการทางกายภาพส่วนใหญ่มีหน้าที่ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่ายด้วยตัวเอง โดยส่วนมากจะเป็นขั้นตอนแรกเริ่มของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ส่วนกระบวนการทางเคมีมีหน้าที่ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กหรือของแข็งที่ตกตะกอนด้วยตัวเองได้ช้า และกระบวนการทางชีวภาพมีหน้าที่ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำให้ลอยขึ้นสู่อากาศ

2.4.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ได้แก่ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด ถังดักกรวดทราย ถังดักน้ำมันและไขมันถึงตกตะกอน เป็นต้น

1) ตะแกรงหยาบใช้สำหรับดักสิ่งของที่ลอยน้ำ เช่น เศษขยะ เศษผ้า ใบไม้ ถูพลาสติก เป็นต้น ส่วนตะแกรงละเอียดใช้สำหรับดักสิ่งของขนาดเล็กที่ลอยน้ำ โดยตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียดจะมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้เครื่องสูบน้ำเกิดการอุดตัน

2) ถังดักกรวดทรายเป็นถังขนาดเล็กที่ออกแบบให้สามารถดักจับกรวดทรายในน้ำเสียที่ไหลผ่าน ทั้งนี้ถังดักกรวดทรายเป็นสิ่งจำเป็นและควรมีเพื่อป้องกันไม่ให้เครื่องสูบน้ำเกิดการสึกกร่อนและเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการถูกกรวดทรายขัดสี

3) ถังดักน้ำมันและไขมัน โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียหลายประเภทมีน้ำมันหรือไขมันเป็นส่วนประกอบปะปนอยู่ เนื่องจากน้ำมันหรือไขมันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นจึงทำให้น้ำมันและไขมันลอยตัวอยู่เหนือน้ำ เพราะฉะนั้นการดักจับน้ำมันหรือไขมันสามารถทำได้ด้วยการวางถังดักน้ำมันและไขมันอยู่ใต้น้ำซึ่งต่ำกว่าชั้นของน้ำมันและไขมัน ถังดักน้ำมันและไขมันขนาดเล็กเหมาะสำหรับน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการปรุงอาหารซึ่งมักจะมีปริมาณต่ำ ส่วนน้ำเสียที่มีปริมาณสูงมักนิยมใช้ถังดักน้ำมันและไขมันแบบ API (American Petroleum Institute) Separator หากน้ำมันและไขมันเกิดการจับตัวรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำเสีย สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารเคมีหรือใช้การลอยตัว (Flotation) เพื่อให้ไขมันและไขมันแยกตัวออกจากน้ำเสีย

4) ถังตกตะกอนเป็นอุปกรณ์ดักของแข็งหรือสารแขวนลอยที่ลอดผ่านตะแกรงมาได้จะถูกบำบัดออกจากน้ำเสียด้วยถังตกตะกอนซึ่งเป็นถังที่มีขนาดใหญ่ เมื่อน้ำเสียไหลเข้ามาในถังตกตะกอน น้ำเสียจะใช้เวลาอยู่ถึงนี้ประมาณ 2 ถึง 4 ชั่วโมง ทำให้สารแขวนลอยมีเวลาดตกตะกอนลงสู่เบื้องล่างของถัง ดังนั้นน้ำเสียที่ไหลออกจากถังตกตะกอนจึงมีสารแขวนลอยในปริมาณต่ำ ถังตกตะกอนถือว่ามีบทบาทสำคัญในการบำบัดน้ำเสียเกือบทุกประเภท

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี ได้แก่ การโคแอกกูเลชัน (Coagulation) การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

1) การโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการประสานคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งเป็นสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก โดยคอลลอยด์จะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีการตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของคอลลอยด์มีขนาดเล็กเกินไป ซึ่งหลักการโคแอกกูเลชัน คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่น สารส้ม (Aluminum Sulfate) ลงไปในน้ำเสียเพื่อทำให้คอลลอยด์เกิดการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนลงมาได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นสารโคแอกกูแลนต์จึงเปรียบเสมือนตัวประสารีให้อนุภาคมารวมตัวกันเป็นฟล็อก

ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการโคแอกกูเลชันมี 2 ส่วน คือ ถังกวนเร็วและถังกวนช้า โดยถังกวนเร็วจะมีหน้าที่ในการรับน้ำเสียและเติมสารเคมี ซึ่งสารเคมีและน้ำเสียจะผสมกันทันทีอย่างรวดเร็วภายในถังนี้ ส่วนถังกวนช้าจะมีหน้าที่ในการสร้างฟล็อก (Flocculation) ที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ เพื่อส่งไปตกตะกอนในถังตกตะกอนซึ่งอยู่ถัดไปจากถังกวนช้าหรืออาจอยู่ภายในถังกวนช้า อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกบำบัดโดยถังตกตะกอนจะถูกส่งไปบำบัดยังถังกรอง ดังนั้นน้ำที่ออกมาจากถังกรองจึงมีความใสสูงมาก

2) การตกตะกอนเป็นกระบวนการที่ใช้กับโลหะหนักที่พบในน้ำเสียและเป็นปัญหา โดยทั่วไปมักอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนกลายเป็นผลึกแข็ง ซึ่งสามารถทำได้โดยการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ไอออนประจุบวกและไอออนประจุลบรวมกันเป็นตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งเหล่านั้นรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยวิธีการตกตะกอนและการกรอง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการกำจัดโลหะหนักต้องใช้วิธีการตกตะกอนกลายเป็นผลึกแข็งร่วมกับการโคแอกกูเลชัน

โลหะหนัก เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) มักจะเกิดปัญหาเฉพาะกับน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ เนื่องจากโลหะหนักเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ดีในค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ การเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักเหล่านี้ลดลงและสามารถเกิดการตกตะกอนกลายเป็นผลึกแข็งได้ ดังนั้นการเติมสารเคมีประเภทเบส เช่น โซดาไฟ (Sodium Hydroxide) หรือปูนขาว (Calcium Carbonate) ลงไปในน้ำเสียจนมีค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมจะทำให้โลหะหนักสามารถตกตะกอนกลายเป็นผลึกแข็งร่วมกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ได้ จากนั้นจึงทำ

ให้ตะกอนผลึกของแข็งรวมตัวกันเป็นฟล็อกด้วยการโคแอกกูเลชัน แล้วจึงแยกฟล็อกออกจากน้ำเสียด้วยถังตกตะกอน ปริมาณโซดาไฟหรือปูนขาวที่ใช้สามารถคำนวณคร่าว ๆ ได้จากสมการเคมีของปฏิกิริยาการเกิดตะกอน แต่ทางที่ดีควรทำการทดสอบการกำจัดโลหะภายในห้องปฏิบัติการก่อนเพื่อหาระดับค่าความเป็นกรด-เบสและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม โดยทำการไทเทรตกรด-เบส (Titration Curve) ของน้ำเสียที่เกิดจากการเติมสารเคมีประเภทเบสและทำจาร์เทสต์ (Jar Test) เพื่อหาระดับค่าความเป็นกรด-เบสและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม

3) การทำให้เป็นกลางเป็นกระบวนการที่มีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นในการเติมสารเคมีประเภทกรดหรือเบสเพื่อปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียจึงถือว่าเป็นสิ่งจำเป็น น้ำเสียที่มีค่าค่าความเป็นกรด-เบสต่ำสามารถทำให้เป็นการได้ด้วยการใช้โซดาไฟหรือปูนขาว ส่วนน้ำเสียที่มีค่าค่าความเป็นกรด-เบสสูงสามารถทำให้เป็นกลางได้ด้วยการใช้กรดกำมะถัน (Sulfuric Acid) หรือกรดเกลือ (Hydrochloric Acid)

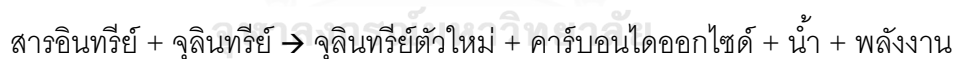
4) การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดไอออนประจุบวก (Cation) และไอออนประจุลบ (Anion) ออกจากน้ำเสียได้ โดยในปัจจุบันสารแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และเรซิน (Resin) ซึ่งเรซินจะเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนที่นิยมมากกว่าซีโอไลต์เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงกว่า ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านถังที่บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนประจุบวกในน้ำเสียจะแลกเปลี่ยนกับไอออนประจุลบของเรซินแบบกรดแก่ (Strong Acid Cation Resin) และเรซินแบบกรดอ่อน (Weak Acid Cation Resin) ได้แก่ ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) หรือไอออนของโซเดียม (Na^+) ส่วนไอออนประจุลบในน้ำเสียจะแลกเปลี่ยนกับไอออนประจุบวกของเรซินแบบเบสแก่ (Strong Base Anion Resin) ได้แก่ ไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) เรซินทุกชนิดเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งก็จะหมดสภาพ แต่สามารถเรียกคืนประสิทธิภาพของเรซินใหม่ได้ด้วยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)

5) การออกซิเดชัน-รีดักชันเกิดขึ้นในกรณีที่ต้องการกำจัดสารมลพิษที่ละลายเจือปนอยู่ในน้ำเสีย แต่ไม่สามารถใช้วิธีการตกตะกอนกลายเป็นผลึกแข็งได้นั้น อาจใช้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยการเปลี่ยนสารมลพิษในน้ำเสียให้เป็นสารที่ไม่มีมลพิษ กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่ การเติมสารเคมีที่อาจเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidant) ได้แก่ โอโซน (Ozone) ออกซิเจน (Oxygen) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) หรือสารรีดิวซ์ (Reductant) ได้แก่ เกลือซัลไฟด์ (Sodium Sulfide) เหล็กซัลไฟด์ (Iron Sulfide) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามหนึ่งเพื่อไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับสารมลพิษ

2.4.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบ่งออกเป็นแบบการใช้ออกซิเจน (Aerobic Process) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Process) ซึ่งการบำบัดแบบการใช้ออกซิเจนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนความสกปรก (สารอินทรีย์) ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) และน้ำ การจำแนกระบบบำบัดน้ำเสียตามลักษณะการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ ระบบบำบัดแบบเติบโตแขวนลอย (Suspended Growth System) เช่น ระบบเอเอส (Activated Sludge) และระบบบำบัดแบบฟิล์มตรึง (Biofilm System หรือ Fixed Film System) เช่น ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) และระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor) ส่วนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนความสกปรกให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน (Methane) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) เช่น กระบวนการย่อยไร้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงแค่การบำบัดแบบการใช้ออกซิเจนเท่านั้น

1) กระบวนการเอเอสเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยอาศัยจุลินทรีย์ซึ่งทั้งหลายในการย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกลดลง หลักการทำงานของระบบเอเอสเป็นวิธีที่เลียนแบบมาจากธรรมชาติ ซึ่งมีปฏิกิริยาทางชีวเคมีของกระบวนการดังนี้



สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ซึ่งใช้เป็นอาหารและสร้างการเจริญเติบโตเพื่อขยายพันธุ์ต่อไป เมื่อสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสียถูกเปลี่ยนมาเป็นจุลินทรีย์ซึ่งแล้วนั้นจะทำให้มีน้ำหนักมากกว่าน้ำและสามารถแยกตัวออกได้ง่ายด้วยการตกตะกอนในถังตกตะกอน

2) ระบบฟิล์มตรึงเป็นระบบที่สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายและใช้พลังงานในการดำเนินงานต่ำ

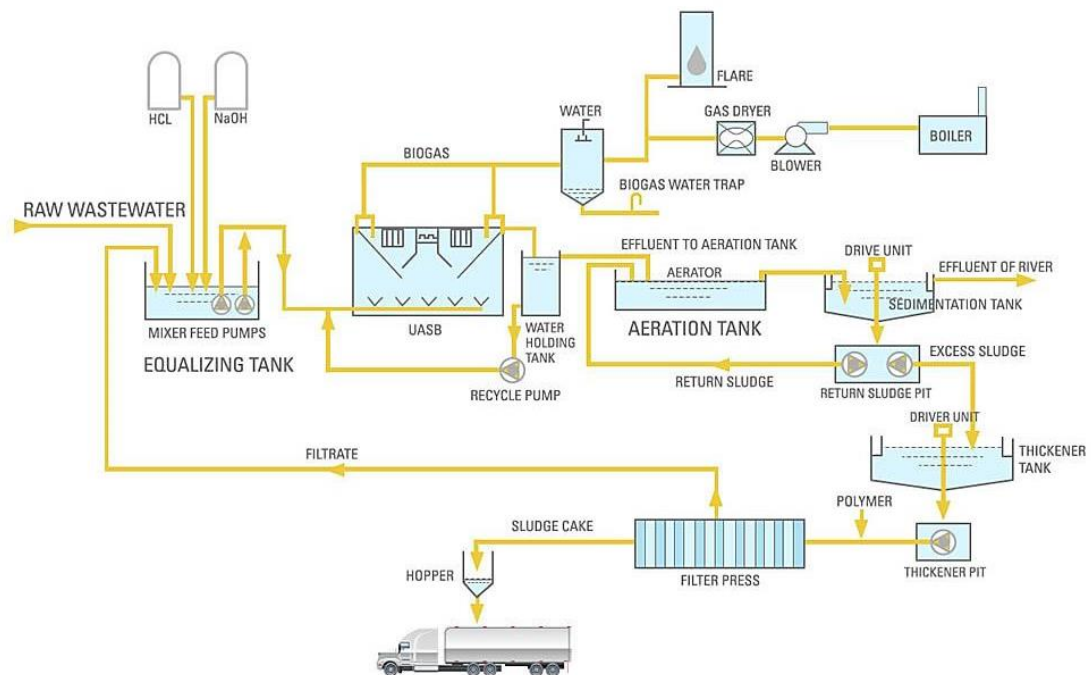
3) ระบบโปรยกรองเป็นระบบที่มีจุลินทรีย์ซึ่งเจริญเติบโตอยู่บนผิวตัวกลาง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วจะถูกปล่อยให้ไหลผ่านชั้นของตัวกลาง จุลินทรีย์ซึ่งเกาะติดอยู่บนตัวกลางจะใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย น้ำเสียที่ไหลผ่านระบบนี้จะ

ถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอนสุดท้ายเพื่อแยกกากตะกอนออกให้ได้น้ำทิ้งที่สามารถระบายทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

กระบวนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด เป็นการผสมระหว่างกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบระบบชั้นตะกอนไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge Process) โดยทั้ง 2 ระบบจะอาศัยสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะเติบโตด้วยการนำพลังงานที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อจุลินทรีย์เหล่านี้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงเกิดเป็นตะกอนเร่ง (Activated Sludge) [13]

กระบวนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 5 ส่วนด้วยกันดังแผนผังในรูปที่ 2.2 [15] กล่าวคือ บ่อรวบรวมน้ำเสีย บ่อชั้นตะกอนไร้อากาศแบบไหลขึ้น บ่อเติมอากาศ บ่อตกตะกอน และบ่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน



รูปที่ 2.2 แผนผังการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

หลักการดำเนินงานของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด [16]

- 1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์จะถูกส่งไปยังบ่อรวบรวมน้ำเสีย (Equalizing Tank) ซึ่งบ่อนี้จะถูกกวนอยู่ตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอน
- 2) น้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียจะถูกส่งไปยังบ่อชั้นตะกอนไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เพื่อให้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้เป็นเป็นแก๊สชีวภาพ
- 3) น้ำเสียจากบ่อชั้นตะกอนไร้อากาศแบบไหลขึ้นจะถูกส่งไปยังบ่อเติมอากาศ (Aeration Tank) เพื่อให้จุลินทรีย์แบบใช้อากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือในน้ำเสียก่อนจะถูกส่งไปยังบ่อตกตะกอน (Sedimentation Tank)
- 4) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากบ่อตกตะกอนจะถูกแยกออกไปยังบ่อพักเพื่อตรวจสอบคุณภาพของน้ำตามมาตรฐานของกรมโรงงานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำไปใช้ภายในโรงงานต่อไป
- 5) ตะกอนที่เหลืออยู่ภายในบ่อตกตะกอนจะถูกส่งไปยังบ่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน (Thickener Tank) เพื่อทำการแยกน้ำที่เหลืออยู่ภายในตะกอนก่อนจะส่งน้ำดังกล่าวกลับไปยังบ่อรวบรวมน้ำเสียอีกครั้ง ส่วนตะกอนที่ผ่านการแยกน้ำแล้วนั้นจะถูกส่งไปกำจัดต่อไป

2.6 กากตะกอนน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

กากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีลักษณะเป็นของแข็งหรือของกึ่งแข็ง โดยกากตะกอนบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น จุลินทรีย์และสารอาหาร และกากตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น กรวดและทราย [17] ตะกอนบำบัดน้ำเสียจะความชื้นค่อนข้างสูง และอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Suspended Solids) โดยมีค่าประมาณ 10,000 ถึง 50,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

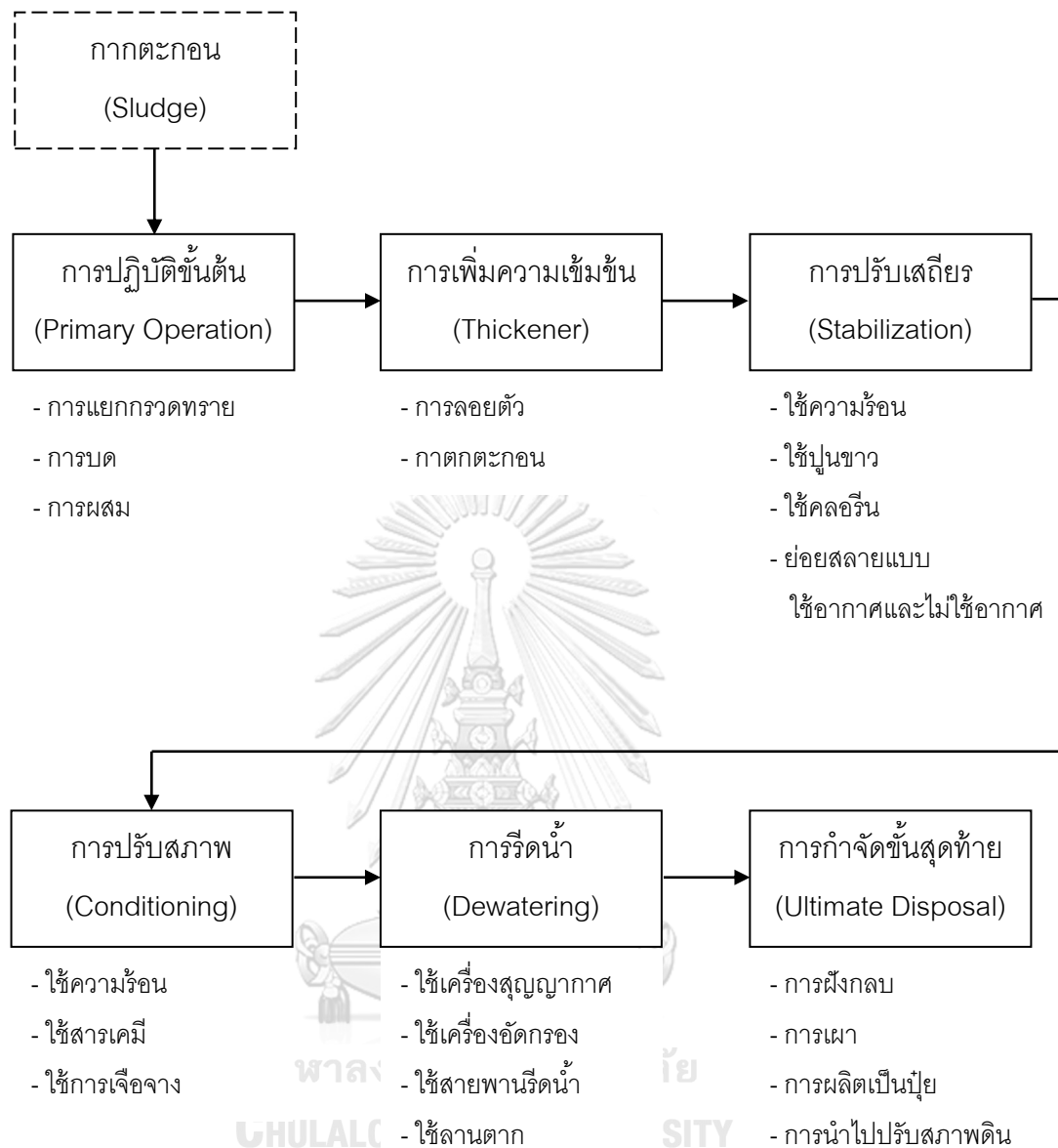
กระบวนการผลิตเบียร์ในประเทศไทยจะมีกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียประมาณ 100 ถึง 120 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.2 [18]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์

องค์ประกอบ	หน่วย	ปริมาณ
ค่าความเป็นกรด-เบส		8.4
ค่าซีไอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	111,915
ค่าของแข็งทั้งหมด	ร้อยละ	12.5
ไนโตรเจน	ร้อยละ	5.98
อินทรีย์คาร์บอน	ร้อยละ	269.0
โลหะหนัก	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ปริมาณต่ำ

2.7 การจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแล้วจำเป็นต้องทำการบำบัดเพื่อป้องกันการเน่าเหม็นของกากตะกอนและป้องกันการเกิดเชื้อโรคก่อนนำไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์ โดยการจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสียประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอน คือ การปฏิบัติขั้นต้น การเพิ่มความเข้มข้น การปรับเสถียร การปรับสภาพ การรีดน้ำ และการกำจัดขั้นสุดท้าย [19] ดังแผนผังในรูป 2.3 [19]



รูปที่ 2.3 แผนผังการจัดการกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

2.7.1 การปฏิบัติขั้นต้น (Primary Operation)

เพื่อให้กากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากทุกแหล่งมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน โดยการแยกกรวดและทราย การบด และการผสม

2.7.2 การเพิ่มความเข้มข้นกากตะกอน (Thickener)

เพื่อลดปริมาณกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนส่งไปยังขั้นต่อไป โดยการใช้บ่อเพิ่มความเข้มข้น ซึ่งประกอบด้วยการใช้กลไกการลอยตัว (Floatation) และกลไกการตกตะกอน (Sedimentation)

2.7.3 การปรับเสถียรกากตะกอน (Stabilization)

เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ ทำให้สามารถทิ้งกากตะกอนบำบัดน้ำเสียได้โดยปราศจากการเน่าเหม็น โดยการใช้ความร้อน ปูนขาว คลอรีน กระบวนการแบบใช้อากาศ หรือกระบวนการแบบไม่ใช้อากาศในการย่อยกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

2.7.4 การปรับสภาพกากตะกอน (Conditioning)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากกากตะกอน ไม่ว่าจะเป็นการปรับสภาพดินสำหรับทำเกษตรกรรม การผลิตเป็นอาหารสัตว์ หรือการผลิตเป็นปุ๋ย เป็นต้น

2.7.5 การรีดน้ำจากกากตะกอน (Dewatering)

เพื่อเพิ่มความสะดวกในการจัดการกากตะกอน ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ประโยชน์ หรือการกำจัด โดยการใช้เครื่องสูญญากาศ (Vacuum Filter) เครื่องอัดกรอง (Filter Press) สายพานรีดน้ำ (Belt Press) และลานตาก (Sludge Drying Bed)

2.7.6 การกำจัดกากตะกอนขั้นสุดท้าย (Ultimate Disposal)

การกำจัดกากตะกอนบำบัดน้ำเสียในขั้นสุดท้ายนี้สามารถจัดการได้โดย [20]

2.6.6.1 การฝังกลบ (Landfill)

การฝังกลบมักจะกระทำกับกากตะกอนที่มีลักษณะแห้ง โดยการฝังกลบควรทำอยู่ถูกสุขลักษณะและถูกสุขอนามัย ซึ่งจำเป็นต้องจัดหาพื้นที่ที่เหมาะสมและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน โดยส่วนใหญ่แล้วพื้นที่ฝังกลบมักจะอยู่ใกล้เคียงกับโรงบำบัดน้ำเสียหรือโรงงานหากไกลจากแหล่งชุมชนหรือพื้นที่ทำการเกษตรกรรม เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อคุณภาพดินและคุณภาพน้ำ

2.6.6.2 การเผา (Incineration)

การเผาหมักเป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการกำจัดกากตะกอน เนื่องจากลักษณะของกากตะกอนมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 80 นั้นหมายความว่าสามารถเกิดการเผาไหม้ได้เองโดยไม่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงอื่น ๆ อีกทั้งการเผายังเป็นการกำจัดกากตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดกากตะกอนด้วยวิธีนี้มักมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ค่อนข้างสูงกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากจำเป็นต้องใช้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูงในการดำเนินการ

2.6.6.3 การผลิตเป็นปุ๋ย (Composting)

การผลิตเป็นปุ๋ยมักจะกระทำกับกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารพิษต่ำ โดยการผลิตเป็นปุ๋ยนี้จะทำการหมักกากตะกอนเป็นเวลา 20 วัน ซึ่งอาจมีการผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบเพื่อให้ปุ๋ยมีลักษณะร่วนซุย ฟางข้าวเพื่อให้ปุ๋ยมีลักษณะแห้ง หรือกากถั่วเหลืองเพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนให้แก่ปุ๋ย เป็นต้น

2.6.6.4 การนำไปปรับสภาพดิน (Land Application)

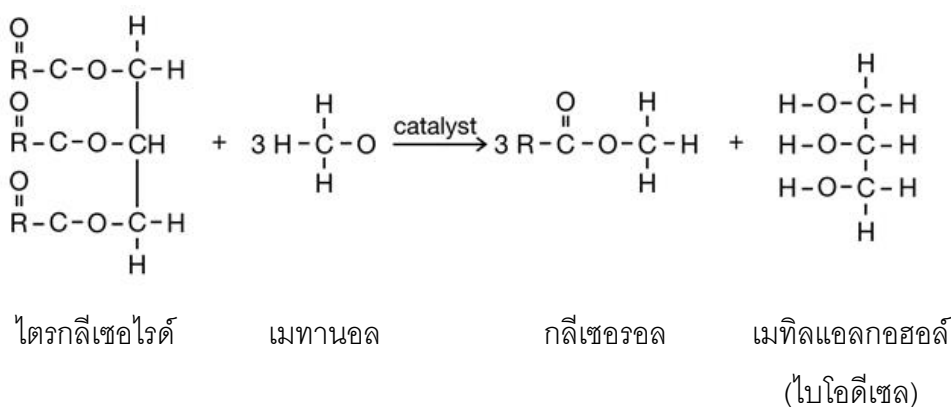
การนำไปปรับสภาพดินสามารถกระทำกับทั้งกากตะกอนเปียกและกากตะกอนแห้ง โดยกากตะกอนจะมีประโยชน์ต่อดินและพืช เนื่องจากมีแร่ธาตุที่จำเป็น เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น ทั้งนี้ข้อควรระวังของการใช้กากตะกอนในการนำไปปรับสภาพดิน คือ ควรเลือกกากตะกอนที่มีจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนหรือระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารพิษในปริมาณต่ำ เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อคุณภาพดิน คุณภาพน้ำ และคุณภาพอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันเชิงเพลิงที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ระหว่างสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) เช่น น้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ และแอลกอฮอล์ (Alcohol) เช่น เมทานอล (Methanol) หรือเอทานอล (Ethanol) โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบมอนออัลคิลเอสเทอร์ (Monoalkyl Ester) ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester) หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ (รูปที่ 2.4

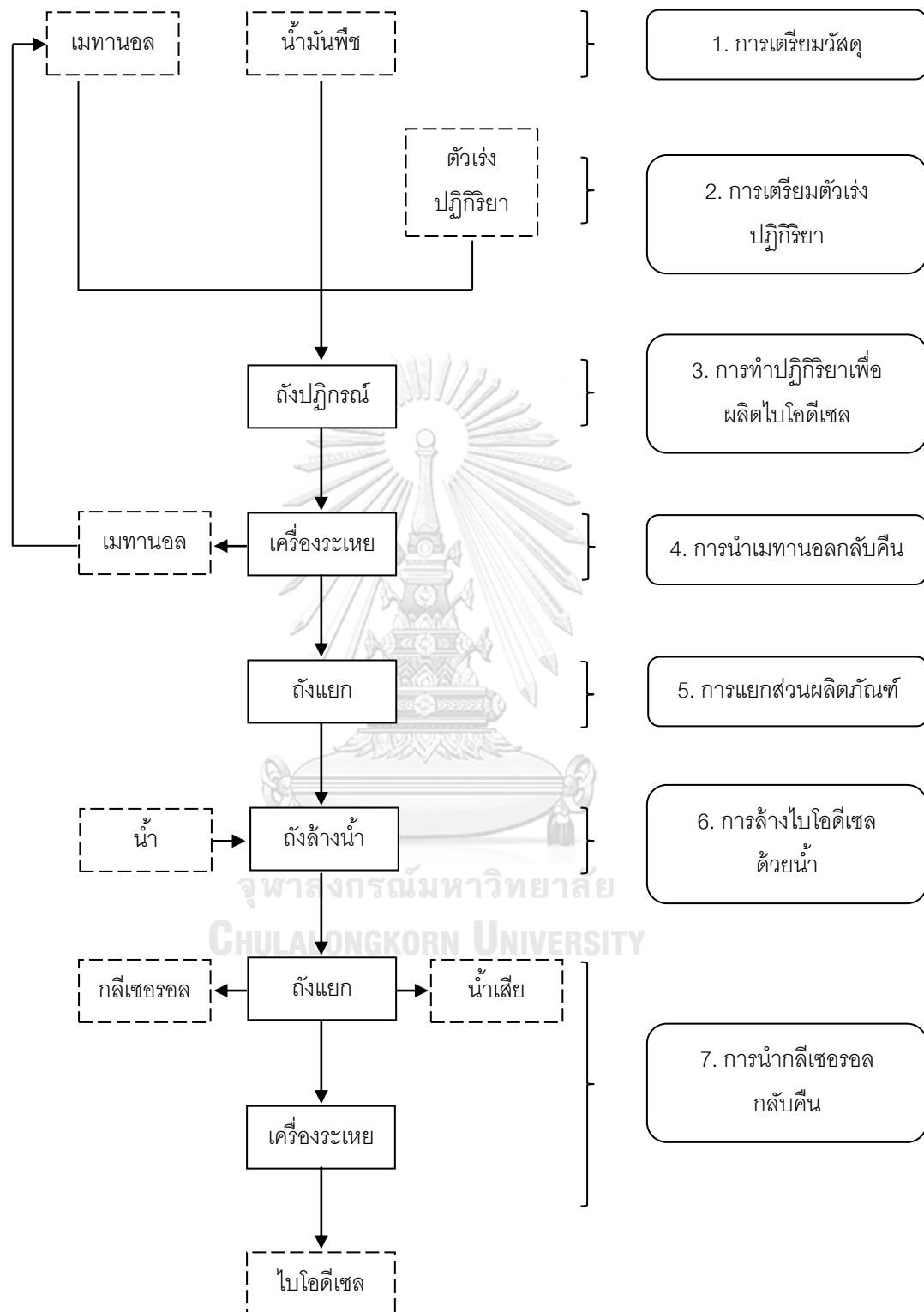
[21] โดยสารประกอบมอนออัลคิลเอสเทอร์ ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันนี้มีลักษณะและคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล จึงเรียกสารประกอบนี้ว่าไบโอดีเซล [21], [22]



รูปที่ 2.4 สมการเคมีสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล

2.9 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

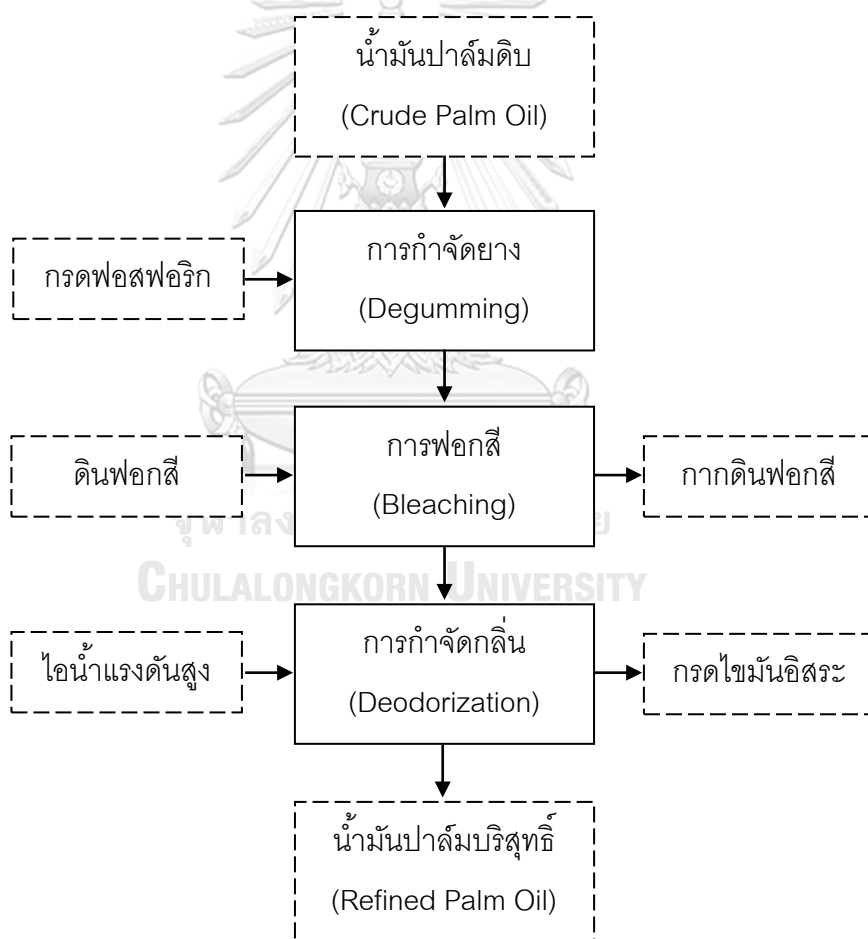
กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์นั้นจะประกอบไปด้วย 7 ขั้นตอนหลักด้วยกัน [23] ดังแผนผังในรูปที่ 2.5 [23] กล่าวคือ การเตรียมวัสดุ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล การนำเมทานอลกลับคืน การแยกส่วนผลิตภัณฑ์ การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และการนำกลีเซอรินกลับคืน



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.9.1 การเตรียมวัสดุ

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมักนิยมใช้น้ำมันปาล์มดิบที่มาจากโรงงานสกัดหรือน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสารตั้งต้น ดังนั้นจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส และปรับสภาพน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ได้แก่ การกำจัดยาง การฟอกสี และการกำจัดกลิ่น ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งกำจัดกรดไขมันอิสระและสารไม่พึงประสงค์ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เช่น ฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) และเลซิธิน (Lecithin) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อผลผลิต (Yield) ของไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งการปรับสภาพน้ำมันปาล์มดิบสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ แต่โดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้วิธีทางกายภาพ ซึ่งมีขั้นตอนดังแผนผังในรูปที่ 2.6 [3], [23], [24]



รูปที่ 2.6 แผนผังกระบวนการปรับสภาพน้ำมันปาล์มดิบ

2.9.1.1 การกำจัดยาง (Degumming)

การกำจัดยางเหนียวในน้ำมันพืชมีอยู่ 6 วิธีด้วยกัน คือ แบบแห้ง (Dry Degumming) แบบเปียก (Water Degumming) แบบกรด (Acid Degumming) แบบเอนไซม์ (Enzymatic Degumming) แบบ EDTA (EDTA Degumming) และแบบเมมเบรน (Membrane Degumming)

การเลือกใช้วิธีในการกำจัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสโฟลิพิดในน้ำมันแต่ละชนิด ซึ่งน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่มีฟอสโฟลิพิดในปริมาณน้อย จึงนิยมใช้วิธีแบบแห้ง วิธีการกำจัดยางทำได้โดยการเติมกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือกรดซิตริก ($C_6H_8O_7$) เข้มข้นร้อยละ 80 ถึง 85 ในน้ำมันปาล์มดิบ จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่น้ำมันด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ถึง 30 นาที เพื่อให้ยางเหนียวเกิดการตกตะกอนแล้วจึงทำการกรองก่อนเข้าสู่กระบวนการฟอกสีในลำดับต่อไป

2.9.1.2 การฟอกสี (Bleaching)

การฟอกสีของน้ำมันปาล์มจะอาศัยกระบวนการสารดูดซับสารที่ทำให้เกิดสีด้วยการใช้ดินฟอกสี (Acid Activated Bleaching Earth) ดินฟอกสีธรรมชาติ (Natural Bleaching Earth) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซิลิเกตสังเคราะห์ (Synthetic Silicates) หรือเรซินสังเคราะห์ (Synthetic Resins)

การฟอกสีของน้ำมันมักจะนิยมใช้ดินฟอกสี โดยสารดูดซับชนิดนี้จะมีองค์ประกอบเป็นไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrated Aluminun-Silicates) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับคลอโรฟิลล์และสารมีสีชนิดอื่นๆ ได้ดี รวมทั้งยังสามารถดูดซับฟอสโฟลิพิดและกรดไขมันอิสระที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการฟอกสีได้อีกด้วย วิธีการฟอกสีทำได้โดยการเติมดินฟอกสีลงไป ในน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการกำจัดยางแล้วประมาณร้อยละ 0.8 ถึง 2.0 ของปริมาณน้ำมันดิบ จากนั้นจึงกวนผสมกันเป็นเวลา 30 ถึง 45 นาที แล้วจึงทำการกรองก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัดกลิ่นในลำดับต่อไป

2.9.1.3 การกำจัดกลิ่น (Deodorization)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการสำคัญในการกำจัดกรดไขมันอิสระ สารระเหยอื่นๆ ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าไตรกลีเซอไรด์ที่ทำให้เกิดกลิ่น รวมทั้งการกำจัดสีของน้ำมันบางส่วนที่ยังเหลือจากกระบวนการก่อนหน้า วิธีการกำจัดกลิ่นทำได้โดยการกลั่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 240 ถึง 270 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง และมีความดันไม่เกิน 10 มิลลิเมตรปรอท ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined

Bleached and Deodorization Palm Oil, RBDPO) เป็นผลิตภัณฑ์ และกรดไขมันปาล์ม (Palm Fatty Acid Distillate, PFAD) เป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้

2.9.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ กรด เบส และเอนไซม์ (Enzyme) กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์จากน้ำมันพืชที่มีคุณภาพดีหรือมีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำที่ต่ำนั้นมักจะนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว

2.9.3 การทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซล

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อให้ได้ซึ่งไบโอดีเซลที่มีคุณภาพดีนั้น จะต้องมีการทำปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ โดยวัสดุที่ผ่านการกำจัดน้ำออกแล้วนั้นจะถูกทำให้มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์และทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง อุณหภูมิของของผสมดังกล่าวจะลดลงเหลือประมาณ 65 องศาเซลเซียส

การเกิดปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้ผลผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดกระบวนการเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ออก

2.9.4 การนำเมทานอลกลับมาใช้

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมักจะใช้เมทานอลในปริมาณที่มากเกินไปพอให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ ดังนั้นหลังจากทำปฏิกิริยาแล้วจึงมักจะมีเมทานอลเหลืออยู่ จึงควรแยกเมทานอลดังกล่าวกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่อีกครั้ง โดยในการนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่นั้นอาจทำได้โดยการกลั่นเมทานอลคืนก่อนการแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลหรือหลังการแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ในการนำเมทานอลกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่นั้นจะต้องระวังไม่ให้มีน้ำปะปนอยู่เมทานอลที่ผ่านการกลั่น เพื่อที่จะทำให้การนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตใหม่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.9.5 การแยกส่วนผลิตภัณฑ์

หลังจากวัสดุผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแล้วนั้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิดด้วยกัน คือ เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล โดยผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยเมทิลเอสเทอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่กลีเซอรอลจะมีความหนาแน่นประมาณ 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดเกิดการแยกชั้นได้ดี โดยเมทิลเอสเทอร์จะอยู่ชั้นบนของถัง ส่วนกลีเซอรอลจะอยู่ชั้นล่างของถัง ในการแยกผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว สามารถทำได้โดยทิ้งผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดให้เย็นไว้ในถังประมาณ 12 ชั่วโมง ชั้นของกลีเซอรอลจะเกิดการแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับอากาศ ส่วนชั้นของเมทิลเอสเทอร์จะยังคงสภาพของเหลวไว้อยู่ ทำให้สามารถแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์ออกจากชั้นของกลีเซอรอลได้ นอกจากนี้ยังสามารถแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลได้โดยการถ่ายชั้นของกลีเซอรอลออกทางด้านล่างของถังในขณะที่ยังร้อนอยู่ เนื่องจากว่าถ้าหากทิ้งกลีเซอรอลไว้ให้เย็นจะทำให้กลีเซอรอลเกิดการแข็งตัวและไม่สามารถถ่ายออกจากถังได้

2.9.6 การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ

ไบโอดีเซลที่ได้จากการแยกผลิตภัณฑ์จากกระบวนการก่อนหน้านี้จะถูกส่งมายังถังล้างด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา กลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นของเมทิลเอสเทอร์ หรือเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดโดยในการกำจัดสารปนเปื้อนดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการล้างด้วยน้ำอุ่นประมาณ 4 ถึง 5 ครั้ง เพื่อให้ได้ซึ่งไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูง ปราศจากสารปนเปื้อน โดยไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำนี้จะมีน้ำปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสามารถกำจัดน้ำออกได้โดยกระบวนการระเหย

2.9.7 การนำกลีเซอรินกลับคืน

กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นจะมีความบริสุทธิ์ที่ค่อนข้างต่ำ กล่าวคือ มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 60 นอกจากนี้ยังมีการปนเปื้อนของน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา โดยกระบวนการในการทำให้กลีเซอรอลดังกล่าวมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยากับกรด เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือกรดเกลือ (HCl) ซึ่งในปฏิกิริยานี้สบูจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันและเกลือ โดยเมื่อตั้งทิ้งไว้กรดไขมันจะเกิดการแยกชั้นออกจากกลีเซอรอล ทำให้ได้กลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น โดยจะมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 80 ถึง 88

2.10 ดินฟอกสี

ดินฟอกสี (Bleaching Clay) ถูกนำมาใช้เพื่อดูดซับสารที่มีสีของน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมันพืช โดยสารที่มีสีจะถูกดูดซับทางกายภาพลงบนพื้นผิวของเม็ดดิน นอกจากนี้ดินฟอกสียังดูดซับสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ผ่านการดูดซับทางเคมีด้วยการเกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent) หรือพันธะไอออนิก (Ionic) กับเม็ดดิน โดยทั่วไปแล้วดินฟอกสีถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดินฟอกสีที่มาจากธรรมชาติ เช่น ฟลูเลอร์เอิร์ธ และดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activated) เช่น เบนโทไนต์ [25], [26] โดยองค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสีทั้ง 2 ชนิดแสดงได้ ดังตารางที่ 2.3 [26], [27]

2.10.1 ฟลูเลอร์เอิร์ธ (Fuller's Earth)

ฟลูเลอร์เอิร์ธเป็นดินที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) ต่ออลูมินา (Al_2O_3) ระหว่าง 4 ถึง 6 และมีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 7.5 โดยทั่วไปแล้วในอุตสาหกรรมผลิตดินฟอกสีที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นมักจะไม่นำฟลูเลอร์เอิร์ธมาเป็นวัสดุ เนื่องจากหลังผ่านกระบวนการทางเคมีแล้วดินชนิดนี้จะไม่สามารถดูดซับสารที่มีสีได้อีก ดังนั้นจึงมักใช้ดินชนิดนี้ในรูปของดินที่มีจากธรรมชาติ

2.10.2 เบนโทไนต์ (Bentonite)

เบนโทไนต์เป็นดินที่ประกอบไปด้วยแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ตั้งแต่ร้อยละ 75 ขึ้นไป โดยแร่ชนิดนี้จะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยอลูมินาหนึ่งชั้นซึ่งถูกประกบอยู่ระหว่างชั้นของซิลิกา ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวสามารถพบได้ในแร่ 2 ชนิด คือ โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ และแคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์

2.10.2.1 โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Sodium Montmorillonite) มีคุณสมบัติในการดูดน้ำและพองตัวได้ดีมาก ทำให้มีลักษณะคล้ายวุ้น ซึ่งใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมหล่อเหล็ก การขุดเจาะน้ำมัน และการขุดเจาะน้ำบาดาล

2.10.2.2 แคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Calcium Montmorillonite) มีคุณสมบัติในการดูดน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย ซึ่งใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมฟอกสีน้ำมัน โดยทั่วไปแล้วแร่ชนิดนี้มักนิยมนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activated) เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฟอกสีน้ำมัน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินฟอกสี

องค์ประกอบธาตุ	ฟลูออไรต์ (ร้อยละ)	เบนโทไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	55.10 - 61.00	67.49 - 68.49
Al ₂ O ₃	9.20 - 14.80	15.11 - 18.86
Fe ₂ O ₃	3.00 - 4.60	1.37 - 1.62
CaO	1.00 - 1.60	1.15 - 2.71
MgO	1.70 - 9.50	0.50 - 0.96
Na ₂ O	0.06 - 0.14	1.24 - 1.53
K ₂ O	0.69 - 1.10	0.26 - 1.03
H ₂ O	14.90 - 19.10	6.75 - 8.75

2.11 กลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จำพวกไตรไฮดริกแอลกอฮอล์ (Trihydric Alcohol) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนืด มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดที่ 17.8 องศาเซลเซียส และ 290 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปแล้วมักใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [28] ดังนั้นจึงควรทำให้เป็นกลางด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ก่อนทำการจำหน่ายหรือนำไปใช้ [29]

กลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีราคาค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังเป็นปัญหาในการกำจัดต่อผู้ผลิตอีกด้วย โดยวิธีในการกำจัดนั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 วิธีคือ วิธีทางเคมี และวิธีทางกายภาพ ซึ่งวิธีทางเคมีนั้นจะเป็นการเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลผ่านการใช้ความดันและอุณหภูมิสูง แต่วิธีทางเคมีนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับกลีเซอรอลดิบที่มีปริมาณของสิ่งปนเปื้อนสูง ส่วนวิธีทางกายภาพนั้นจะเป็นการแปรรูปกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ยกตัวอย่างเช่น สาร 1,3 - โพรเพนไดออล กรดโพรพิโอนิก (CH₃CH₂COOH) ไบโอบิวทานอล และไฮโดรเจน เป็นต้น [28]

1) สาร 1,3 - โพรเพนไดออล (1,3 - Propanediol) การผลิตสาร 1,3 - โพรเพนไดออลจากกลีเซอรอลนั้น จะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีเอนไซม์เฉพาะ เช่น 1,3 - โพรเพนไดออลดีไฮโดรจีเนส (1,3 - Propanediol Dehydrogenase) และ 1,3 - โพรเพนไดออล ออกซิโดรีดักเทส (1,3 - Propanediol Oxidoreductase) โดยอาศัยกลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอน จุลินทรีย์ที่

สามารถผลิต 1,3 - โพรเพนไดออกไซด์ เช่น *Citrobacter freundii* *Klebsiella pneumoniae* และ *Clostridium butyricum* เป็นต้น

2) กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) การผลิตกรดโพรพิโอนิกจากกลีเซอรอลนั้น จะใช้วิธีตรึงเซลล์จุลินทรีย์ *Propionibacterium acidipropionici* และ *Propionibacterium freudenreichii* ssp. *Shermanii* บนแคลเซียมอัลจีเนต (Calcium Alginate) จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตกรดโพรพิโอนิกที่ได้สูงถึง 42 กรัมต่อลิตร โดยประโยชน์ของกรดโพรพิโอนิกนั้นสามารถใช้เป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเซลลูโลสสังเคราะห์ และใช้เป็นสารเติมแต่งป้องกันการเน่าเสียของอาหาร

3) ไบโอบิวทานอล (Biobutanol) การผลิตไบโอบิวทานอลจากกลีเซอรอลนั้น จะอาศัยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศของจุลินทรีย์ *Clostridium pasteurianum* จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตไบโอบิวทานอลที่ได้สูงถึง 19 กรัมต่อลิตร

4) ไฮโดรเจน (Hydrogen) การผลิตไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลนั้น จะอาศัยเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) การแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำร้อน (Reforming) การใช้ความร้อนจากใต้ดินและดวงอาทิตย์ในการแยกน้ำ (Thermochemical Cycles) และการใช้สาหร่ายและจุลินทรีย์ในการหมักแบบไม่ใช้อากาศ จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงถึง 30 มิลลิโมลต่อลิตรต่อชั่วโมง

2.12 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง คือ แหล่งกำเนิดพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานเคมี พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อน โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงจะเป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) หรือสารประกอบที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนอยู่เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ผลผลิตหลักเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ เชื้อเพลิงถูกจำแนกออกตามสถานะได้ 3 สถานะ [19], [30], [31]

1) เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง คือ เชื้อเพลิงที่มีสภาพเป็นของแข็งเมื่ออุณหภูมิปกติ เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านโค้ก ไม้ ฟืน แกลบ และขานอ้อย เป็นต้น

2) เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลว คือ เชื้อเพลิงที่มีสภาพเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิปกติ เช่น น้ำมันเตา น้ำมันเบนซิน และน้ำมันก๊าด เป็นต้น

3) เชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส คือ เชื้อเพลิงที่มีสภาพเป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิปกติ เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สแอลพีจี (LPG) และ แก๊สอื่นๆ ที่ได้จากการรวมวิธีในการผลิต (Producer Gas)

2.13 เชื้อเพลิงอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน และถ่านไม้ ด้วยการนำเอาวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร หรือจากอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้เป็นการป้องกันการขาดแคลนเชื้อเพลิงจากธรรมชาติแล้วนั้น ยังเป็นการเพิ่มประโยชน์ให้แก่วัสดุเหลือใช้อีกด้วย

2.13.1 วัสดุสำหรับทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง

วัสดุสำหรับทำเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม หรือขยะมูลฝอยเป็นต้น ตัวอย่างของวัสดุสำหรับทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง [31] ได้แก่

- 1) เศษพืชหรือวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร (Crop Residues) เช่น ฟางข้าว เศษไม้ ชังข้าวโพด และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น
- 2) วัชพืช (Weeds) เช่น ผักตบชวา ต้นตาลปัดฤๅษี และต้นกก เป็นต้น
- 3) วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม (Industrial Wastes) เช่น กากส่าเหล้า กากส่าเบียร์ และกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น
- 4) ขยะมูลฝอย (Municipal Wastes) เช่น กระดาษสำนักงานใช้แล้ว กระจกพลาสติก และถุงกระดาษ เป็นต้น

2.13.2 วิธีการอัดแท่งเชื้อเพลิง

การอัดแท่งเชื้อเพลิงสามารถทำได้หลายรูปร่าง เช่น การอัดเป็นเม็ด (Pelleting) การอัดเป็นแท่งฟืน (Briquetting) การอัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) และการอัดเป็นฟ่อน (Baling) เป็นต้น [32] โดยวิธีในการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ การอัดร้อน และการอัดเย็น [33]

2.13.2.1 การอัดร้อน (Hot Pressing)

การอัดร้อนเป็นการอัดวัสดุที่ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่านมาก่อน เมื่ออัดเป็นแท่งเสร็จสมบูรณ์แล้วจึงค่อยนำเข้าเตาเผาเพื่อทำให้เป็นถ่านอีกครั้งหนึ่ง วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยวิธีอัดร้อน คือ แกลบ และขี้เลื่อย เนื่องจากวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มีสารลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ทำให้สามารถเชื่อมประสานกันได้ [31]

2.13.2.2 การอัดเย็น (Cold Pressing)

การอัดเย็นเป็นการอัดวัสดุที่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่านมาก่อน โดยอาศัยวัสดุประสานสำหรับวัสดุที่ไม่มียางเหนียวในตัว เช่น กะลามะพร้าว เป็นต้น และไม่อาศัยวัสดุเชื่อมประสานสำหรับวัสดุที่มียางเหนียวในตัว เช่น พีชสด เป็นต้น

2.13.3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

องค์ประกอบหลักที่สำคัญที่ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีคุณสมบัติและคุณภาพที่ดี [32] ได้แก่

2.13.3.1 ปริมาณความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้น คือ ปริมาณความชื้นต่อปริมาณของเนื้อเชื้อเพลิงอัดแท่งอบแห้ง ปริมาณความชื้นมีผลทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าความร้อนแท่งลดลง จุดติดไฟได้ยาก และแตกร่วนได้ง่าย

2.13.3.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

ปริมาณสารระเหย คือ ปริมาณของเนื้อเชื้อเพลิงอัดแท่งอบแห้งระเหยได้ ซึ่งประกอบไปด้วย ออกซิเจน ไฮโดรเจน และสารประกอบคาร์บอน

2.13.3.3 ปริมาณเถ้า (Ash Content)

ปริมาณเถ้า คือ ส่วนของสารอินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาปในเตาเผา ซึ่งประกอบไปด้วย ซิลิกา (SiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

2.13.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ปริมาณคาร์บอนคงตัว คือ มวลของคาร์บอนที่เหลือในเชื้อเพลิงอัดแท่งหลังจากผ่านการเอาสารระเหยออกไปแล้ว

2.13.3.5 ค่าความร้อน (Calorific Value or Heating Value)

ค่าความร้อน คือ ค่าความร้อนของการสันดาปโดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนที่อยู่ภายในเชื้อเพลิงอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ดีนั้นจะต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง แต่มีปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้าต่ำ ส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีปริมาณความชื้นสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าต่ำ ซึ่งเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อนสูงจะถือว่าเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีคุณภาพในการให้พลังงานที่ดี

2.14 กระบวนการคาร์บอนไนซ์

กระบวนการทำให้เป็นถ่านหรือกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonize) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) รูปแบบหนึ่งซึ่งมีผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแข็ง หรือที่เรียกว่าถ่านชาร์ (Char) มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของเหลวและแก๊ส กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นกระบวนการที่ต้องการความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จะอยู่ในช่วง 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส

2.14.1 กระบวนการผลิตถ่านชาร์

กระบวนการผลิตถ่านชาร์แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ในทางปฏิบัติ เมื่อถ่านชาร์ถูกผลิตขึ้นในเตา ขั้นตอนเหล่านี้จะคาบเกี่ยวและอาจเกิดขึ้นพร้อมกันได้ [34], [35]

2.14.1.2 ขั้นตอนที่ 1 การไล่ความชื้น

การไล่ความชื้น เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่อุณหภูมิบรรยากาศจนถึง 180 องศาเซลเซียส ช่วงนี้วัสดุจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free Water) และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ (Bound Water) ควันที่ออกมาจะมีสีขาวปนน้ำเงินอ่อน ซึ่งจะมีแต่ไอน้ำ ไม่มีกลิ่นฉุน ไม่สแปตาและจุ่มก

2.14.1.2 ขั้นตอนที่ 2 การไล่สารระเหิด

การไล่สารระเหิด เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 180 ถึง 270 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้จะเกิดกระบวนการแตกตัวทางความร้อนของวัสดุ โดยการสลายตัวของเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ควันที่ออกมาจะเริ่มมีสีจาง และมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และกรดน้ำส้ม (CH_3COOH) ปนออกมากับควัน

2.14.1.3 ขั้นตอนที่ 3 การเปลี่ยนวัสดุเป็นถ่าน

การเปลี่ยนวัสดุเป็นถ่าน เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 270 ถึง 400 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้วัสดุจะสลายตัวจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) ควันที่ออกมาจะมีสีขาวปนเหลือง มกกลิ่นฉุนจัด สามารถติดไฟได้

2.14.1.4 ขั้นตอนที่ 4 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์

การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ ถ่าน เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส แม้ว่าวัสดุจะกลายเป็นถ่านแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส แต่ยังมีปริมาณน้ำมันทาร์ในปริมาณสูง โดยน้ำมันทาร์ที่เผาไหม้จะเกิด

สารประกอบเบนโซไพเรน (Benzopyrene) และไดเบนซานทรานเซน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงควรกำจัดน้ำมันทาร์ออกก่อน

2.14.2 ปัจจัยที่มีผลต่อถ่านชาร์

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณของถ่านที่ได้จากวิธีการผลิต ได้แก่

2.14.2.1 อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ (Temperature)

อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของถ่านชาร์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นถ่านชาร์ที่ได้จะมีปริมาณลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเพิ่มพลังงานในการสลายพันธะภายในของวัสดุ ส่งผลให้วัสดุเกิดการปลดปล่อยสารระเหยในปริมาณที่มาก นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงยังส่งผลให้ถ่านชาร์ที่ได้มีโครงสร้างเป็นระเบียบ และมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

2.14.2.2 เวลาในการคาร์บอนไนซ์ (Time)

เวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของถ่านชาร์ กล่าวคือ การเพิ่มเวลาสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวขั้นทุติยภูมิอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ถ่านชาร์มีปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้การแตกตัวของน้ำมันทาร์ยังส่งผลให้ปริมาณน้ำมันทาร์ลดลง ซึ่งนำไปสู่การเกิดแก๊สมีเทนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

2.14.2.3 อัตราการให้ความร้อนแก่วัสดุ (Heating Rate)

อัตราการให้ความร้อนแก่วัสดุมีผลต่อความว่องไวและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในถ่านชาร์ กล่าวคือ เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้น สารระเหยภายในวัสดุจะถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้คาร์บอนในถ่านชาร์มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เกิดช่องว่าง และรูพรุนขนาดใหญ่

2.14.2.4 ขนาดของอนุภาควัสดุ (Particle Size)

ขนาดของอนุภาควัสดุมีผลต่อปริมาณและการกระจายตัวถ่านชาร์ กล่าวคือ เมื่ออนุภาควัสดุที่มีขนาดเล็กอัตราการให้ความร้อน ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนและการกระจายความร้อนจะเร็วและดีกว่าอนุภาควัสดุที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงส่งผลให้อนุภาควัสดุที่มีขนาดเล็กมีการปลดปล่อยสารระเหยในปริมาณที่มาก แต่อย่างไรก็ตามขนาดของอนุภาควัสดุที่เล็กเกินไปจะเกิดการสลายตัวขั้นที่สอง (Secondary Decomposition) ได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ถ่านชาร์มีปริมาณลดลง

2.15 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ดังนั้นหากต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่สนใจนั้นมีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ในการทดลอง (Experimental Error) ซึ่งวิธีการทางสถิติเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ เพราะฉะนั้นแล้วสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาในการทดลอง คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ [36]

2.15.1 ประเภทของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [37] ได้แก่

1) การออกแบบการทดลองแบบ One Factor at a Time (OFAT) คือ เป็นการออกแบบการทดลองที่ศึกษาทีละปัจจัย ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งนั้นจะเปลี่ยนค่าของปัจจัยต่าง ๆ ได้เพียงแค่ว่าปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่น ๆ โดยจะค่าของปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องการศึกษาจะคงที่ไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลจากการทดลองได้ เฉพาะผลกระทบหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ไม่สามารถสรุปและวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองประเภทนี้ยังมีขนาดตัวอย่างและจำนวนการทดลองค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับ การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment

2) การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE) คือ การออกแบบการทดลองที่ศึกษาหลายปัจจัยและมีระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ (Level) ดังนั้นจึงทำให้สามารถสรุปและวิเคราะห์ผลจากการทดลองได้ทั้งผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง อีกทั้งการออกแบบการทดลองประเภทนี้ยังมีขนาดตัวอย่างและจำนวนการทดลองน้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบ One Factor at a Time อีกด้วย โดยการออกแบบการทดลองประเภทนี้สามารถแบ่งย่อยออกได้อีก 2 รูปแบบ คือ

- รูปแบบที่ 1 คือ การออกแบบการทดลองเพื่อต้องการศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งการทดลองรูปแบบนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะทำการทดลองแค่ 2 ระดับเท่านั้นในแต่ละปัจจัย เพื่อเป็นการลดจำนวนการทดลอง ซึ่งการออกแบบการทดลองประเภทนี้ได้แก่ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

- รูปแบบที่ 2 คือ การออกแบบการทดลองเพื่อต้องการศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนองเพื่อต้องการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ตรงเป้าหมาย ซึ่งการทดลองรูปแบบนี้เป็น การทดลองเพื่อศึกษาว่า ปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะทำการทดลองมากกว่า 2 ระดับขึ้นไปในแต่ละปัจจัย โดยการออกแบบการทดลองประเภทนี้ ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

2.15.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่สามารถเป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ซ้ำ (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล จะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ปัจจัยนั้น แต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง โดยสามารถแทนระดับดังกล่าวด้วยเครื่องหมาย - และ + ตามลำดับ [36]

2.15.2.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการศึกษาร่วมกัน ผู้ทดลองจะใช้จำนวนระดับของปัจจัยที่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ดังนั้นปัจจัยที่วิกฤติ (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาอย่างละเอียดจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามาก เมื่อพิจารณาแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งสามารถเขียนสมการตัวแบบได้ดังนี้ คือ

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

เมื่อ y_{ijk} คือ ผลการตอบสนอง (Response) ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j ทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k ; $i = 1, 2$; $j = 1, 2$; $k = 1, 2, \dots, n$

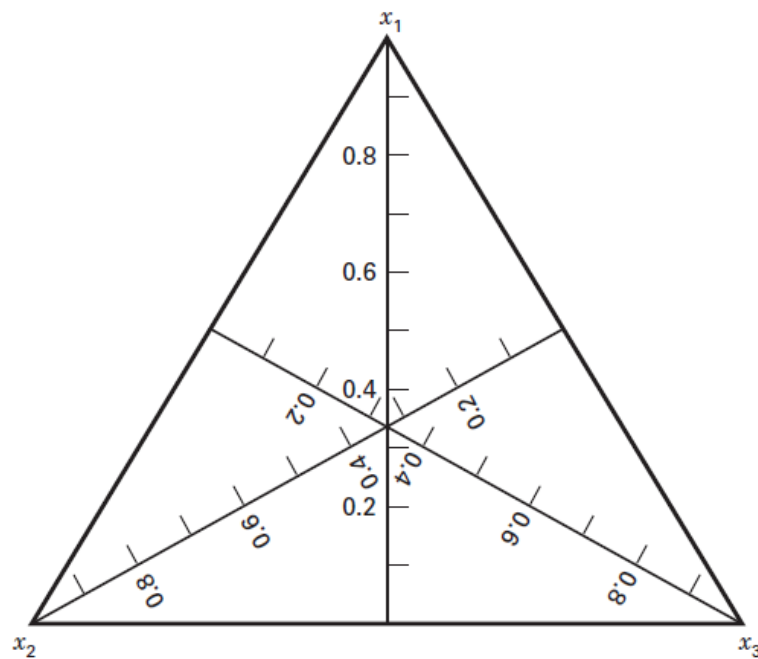
μ	คือ ค่าเฉลี่ยรวม (Grand mean)
α_i	คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับที่ i
β_j	คือ ค่าผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับที่ j
$(\alpha\beta)_{ij}$	คือ ค่าอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย B ที่ระดับที่ j
ϵ_{ijk}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับที่ i และปัจจัย B ที่ระดับที่ j โดยทำการทดลองซ้ำครั้งที่ k

2.15.2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน (Factorial Factorial Experiment)

การใช้งานโดยส่วนใหญ่ของการออกแบบการทดลองชนิดสัดส่วนเรียกว่า การทดลองเพื่อการวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening Experiment) กล่าวคือ เป็นการทดลองซึ่งใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลการตอบสนองของระบบมากที่สุด ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการทดลองในขั้นตอนแรก การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน คือ การทดลองที่ทำโดยลดรูปลงจากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบในสัดส่วนของจำนวนระดับปัจจัย กล่าวคือ การทดลอง $2^{k-p} = 2^k/2^p$ เมื่อ $p=1$ จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ $[0.50(2^k)]$ ของ k ปัจจัย (One-half Fraction Factorial) $p=2$ จำนวนวิธีปฏิบัติทั้งหมดจะเท่ากับ $2^k/2^p = [0.25(2^k)]$ หรือ One-fourth Fraction Factorial

2.15.3 การออกแบบการทดลองแบบผสม

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมกับการสร้างแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันของร้อยละของส่วนประกอบ (Components) โดยการออกแบบการทดลองแบบผสมมีข้อจำกัด คือ ระดับของปัจจัยหรือส่วนประกอบจะไม่เป็นอิสระต่อกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าของผสมที่จะทำการทดลองประกอบไปด้วย 3 ส่วน โดยแต่ละของผสมสามารถใช้ได้ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 โดยผลรวมของแต่ละของผสมจะต้องเท่ากับ 100 โดยของผสม 3 ส่วน บริเวณของการทดลองที่ถูกจำกัดจะสามารถเขียนอยู่บนแกนสามเส้น (Trilinear Coordinate) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 [38], [39]



รูปที่ 2.7 ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น

ข้อจำกัดของของผสมสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ

2.15.3.1 การมีข้อจำกัดล่างของของผสม

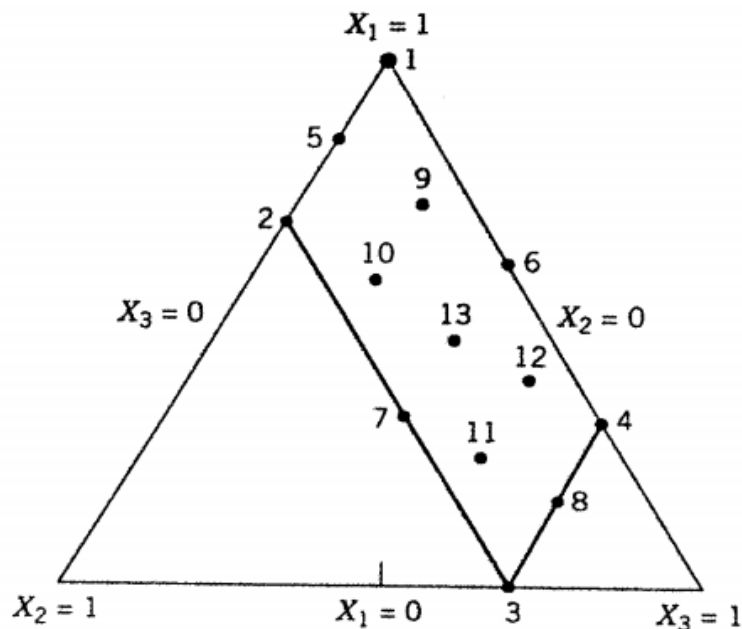
ในบางการทดลองจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้แก่ของผสมบางตัว โดยอาจมีเหตุผลมาจากเรื่องของต้นทุน เรื่องของสารเคมีในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ $L_i \leq x_i \leq 1$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, c$ โดยที่ L_i คือ ขอบเขตล่าง กล่าวคือ ปริมาณน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ของของผสมนั้น ๆ

2.15.3.2 การมีข้อจำกัดบนของของผสม

ในบางการทดลองจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าสูงสุดที่เป็นไปได้แก่ของผสมบางตัว โดยอาจมีเหตุผลมาจากเรื่องของต้นทุน เรื่องความเป็นอันตราย ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ $0 \leq x_i \leq U_i$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, q$ โดยที่ U_i คือ ขอบเขต $[0, U_i]$ กล่าวคือ ปริมาณมากที่สุดที่ยอมรับได้ของของผสมนั้น ๆ

2.15.3.3 การมีข้อจำกัดบนและล่างของของผสม

ในบางการทดลองจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เป็นไปได้แก่ของผสมบางตัวหรือทุกตัว ซึ่งไม่สามารถใช้การออกแบบแบบซิมเพลกซ์ (Simplex) ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้การออกแบบแบบ ดี-ออฟติมอล (D-optimal) แทน โดยในการเลือกจุดที่จะนำมาทดลองนั้น จะขึ้นอยู่กับผู้ทดลองว่าต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบไหน แต่โดยทั่วไปแล้วการทดลองแบบผสมมักต้องการเทอมอันตรกิริยา (Interaction) ปრაกฏอยู่ในแบบจำลอง ซึ่งจุดที่มักจะถูกเลือกได้แก่ จุดยอดมุมของรูปหลายเหลี่ยมที่กำหนดได้ (Extreme Vertices) จุดกึ่งกลางด้าน (Edge Center) จุดศูนย์กลางของรูปหลายเหลี่ยม (Overall Centroid) และจุดบนแกนสำคัญ เช่น จุดบนเส้นทแยงมุมหรือจุดบนแกนสมมาตรของรูปหลายเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.8 [39]



รูปที่ 2.8 การกำหนดจุดด้วยการออกแบบแบบดี-ออฟติมอล

2.16 การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลจะอาศัยเครื่องมือทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน การทดสอบความถูกต้องของสมมติฐาน และการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.16.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบหาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) [40] การวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นถือเป็นวิธีพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก [36] ดังนี้

2.16.1.1 ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation)

ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้เป็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างที่เกิดมาจากวิธีการปฏิบัติที่ถูกใช้ในการออกแบบการทดลอง

2.16.1.2 ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation)

ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้เป็นการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างที่ยังไม่มีข้อมูลมาสนับสนุน อาจเกิดจากการยังไม่มีความรู้ หรือยังมีความรู้ไม่มากพอ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะความแตกต่างในรูปแบบของความผิดพลาด (Error or Residual)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อใช้ยืนยันความเชื่อมั่นของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ปัจจัยและมีอันตรกิริยาจะต้องทำการทดสอบสมมติฐาน 3 อย่าง ดังนี้

2.16.1.3 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากตัวแปรที่หนึ่ง คือ

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.16.1.4 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความเท่ากันของผลที่เกิดจากตัวแปรที่สอง คือ

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 = \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.16.1.5 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างตัวแปรที่หนึ่งและตัวแปรที่สอง คือ

$$H_0 = (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุก } i, j$$

$$H_1 = (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจะพิจารณาว่าสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis, H_0) ถูกยอมรับหรือถูกปฏิเสธ ถ้าสมมติฐานหลักถูกยอมรับแสดงว่าสมมติฐานนั้นเป็นจริง แต่ถ้าสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธแสดงว่าสมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง โดยจะมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งเรียกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติ (Probability Value, P-value) ซึ่งค่านัยสำคัญทางสถิตินี้จะอ้างอิงกับ α กล่าวคือ ถ้าค่านัยสำคัญทางสถิติมีค่ามากกว่า α จะยอมรับสมมติฐานหลัก แต่ถ้าค่านัยสำคัญทางสถิติมีค่าน้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก [41]

2.16.2 การทดสอบความถูกต้องของสมมติฐาน (Hypothesis Adequacy Checking)

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองจำเป็นต้องทำทุกครั้งก่อนสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) ได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ ความเป็นอิสระ และความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน [37]

2.16.2.1 ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

การทดสอบทำได้โดยการพิจารณาผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของส่วนตกค้าง นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งข้อมูลจะต้องมีลักษณะหรือแนวโน้มใกล้เคียงเส้นตรง

2.16.2.2 ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

การทดสอบทำได้โดยการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลอง (Order) ซึ่งข้อมูลจะต้องมีลักษณะไม่แสดงสัญญาณของการเกิดแนวโน้มของข้อมูล

2.16.2.3 ส่วนตกค้างมีค่าความแปรปรวนคงที่

การทดสอบทำได้โดยการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าฟิต (Fitted) ซึ่งข้อมูลจะต้องมีลักษณะการกระจายตัวแบบสุ่ม

2.16.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared, R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยว่ามีการเปลี่ยนแปลงผลการตอบสนองได้เป็นสัดส่วนเท่าใด โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยิ่งมีค่ามากเท่าใด แสดงว่าแบบจำลองที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้นเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อตัวแปรอิสระมีจำนวนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า (Adjusted R-squared, R^2_{adj}) แทน

2.17 กำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้า คือ การบ่อนแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในโหลดเพื่อทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้ามียุทธวัตเป็นกิโลวัตต์ (kW) กำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิดสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 [42]

$$P = I \times V \quad (2.3)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	V	คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

2.18 พลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้า คือ พลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งได้ ซึ่งการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้จะต้องทำการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับวงจรไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานแสงสว่าง พลังงานกล หรือพลังงานความร้อน เป็นต้น โดยพลังงานไฟฟ้ามียุทธวัตเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิดสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 [42]

$$Q = P \times t \quad (2.4)$$

เมื่อ	Q	คือ พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
	P	คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
	t	คือ เวลา (ชั่วโมง)

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Babel และคณะ (2008) [18] ศึกษาการใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนร่วมกับกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียบ้านเรือนร่วมกับกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์โดยน้ำหนักเป็น 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณแก๊สมีเทน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดคือ 25:75 โดยปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ และปริมาณแก๊สมีเทนเท่ากับ ร้อยละ 7.80 ร้อยละ 63.2 และ 1.15 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ตามลำดับ

Morarat และคณะ (2012) [19] ศึกษาการใช้กากตะกอนจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษร่วมกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเศษฝุ่นไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนจากน้ำเสียกับชีวมวลแต่ละชนิดโดยน้ำหนักเป็น 1:0 1:1 1:2 1:3 2:1 3:1 และอัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนจากน้ำเสียกับชีวมวลทั้ง 2 ชนิดโดยน้ำหนักเป็น 1:0:0 1:1:1 1:1:2 1:2:1 1:2:2 2:1:1 และ 3:1:1 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุดคือ 1:3 จากเศษฝุ่นไม้ยูคาลิปตัส โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 3.00 ร้อยละ 66.70 ร้อยละ 27.30 ร้อยละ 3.00 และ 3,852.4 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

Chaiyadejtayakul และคณะ (2001) [30] ศึกษาการใช้กากตะกอนจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตกระดาษร่วมกับเศษชิ้นไม้สับเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนจากน้ำเสียกับเศษชิ้นไม้สับโดยน้ำหนักเป็น 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และ 0:100 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณกำมะถันรวม และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุดคือ 70:30 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณกำมะถันรวม และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 4.75 ร้อยละ 38.60 ร้อยละ 21.87 ร้อยละ 41.52 ร้อยละ 0.75 และ 4,072.4 แคลอรีต่อกรัม เมื่อนำไปศึกษาด้านการลงทุน พบว่ามีอัตราผลตอบแทนการลงทุนสูงถึง ร้อยละ 30.73 ณ ราคาขาย 9 บาทต่อกิโลกรัม

Mahapram และคณะ (2012) [32] ศึกษาการใช้กากตะกอนจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตนมร่วมกับเปลือกกล้วยน้ำว่าเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนจากน้ำเสียกับเปลือกกล้วยน้ำว่าโดยน้ำหนักเป็น 95:5 75:25 50:50 25:75 และ 5:95 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุด คือ 25:75 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 9.70 ร้อยละ 15.80 ร้อยละ 61.80 ร้อยละ 12.70 และ 4,195.0 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

Kitipattaworn และคณะ (2013) [33] ศึกษาการใช้กากตะกอนเปียกจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตเอทานอลร่วมกับเปลือกมังคุดและเปลือกทุเรียนเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งและอาศัยน้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากตะกอนเปียกกับเปลือกผลไม้แต่ละชนิดโดยน้ำหนักเป็น 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 รวมทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง และทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ให้ค่าความร้อนและร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุด คือ 5:5 จากทั้งเปลือกมังคุดและเปลือกทุเรียน โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนเปียกผสมร่วมกับเปลือกมังคุดให้ค่าความร้อนสูงกว่าเปลือกทุเรียน โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,518.7 แคลอรีต่อกรัม และ 4,273.1 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนเปียกผสมร่วมกับเปลือกทุเรียนให้ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่าเปลือกมังคุด โดยมีร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 39.9 และ 39.6 ตามลำดับ

Uttamaprakrom และคณะ (2012) [43] ศึกษาการใช้กากตะกอนเปียกของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันเส้นเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบอัดร้อนและแบบอัดเย็น โดยมีอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เป็น 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ในแต่ละช่วงอุณหภูมิทำการทดลองที่ระยะเวลา 30 45 60 และ 90 นาที ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที โดยที่สภาวะดังกล่าวมีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ ร้อยละ 1.17 ร้อยละ 34.43 ร้อยละ 16.57 และร้อยละ 47.84 เมื่อเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพการให้พลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งทั้ง 2 ชนิด พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบอัดเย็นมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 59.01 และมีค่าความร้อนเท่ากับ 5,925.2 แคลอรีต่อกรัม ในขณะที่เชื้อเพลิงอัดแท่งแบบอัดร้อนมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 42.66 และมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,841.6 แคลอรีต่อกรัม

Tantisattayakul และคณะ (2015) [44] ศึกษาการใช้เปลือกสับปะรดเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยวิธีอัดเย็นและอาศัยน้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างเปลือกสับปะรดกับน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเป็น 10:5 10:6 10:7 10:8 และ 10:9 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงสุด คือ 10:7 โดยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 20.50 ร้อยละ 3.10 ร้อยละ 63.3 ร้อยละ 13.0 และ 3,389.0 แคลอรีต่อกรัม เมื่อนำไปศึกษาด้านการลงทุน พบว่ามีอัตราผลตอบแทนการลงทุนร้อยละ 9.40 และใช้ระยะเวลาในการคืนทุน 6 ปี 6 เดือน

Srisang และคณะ (2015) [45] ศึกษาการใช้กากดินฟอกสีร่วมกับแกลบ และแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างกากดินฟอกสี แกลบ และแป้งมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเป็น 80:0:20 70:20:10 60:20:20 และ 50:20:30 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุด คือ 60:20:20 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 10 ร้อยละ 39 ร้อยละ 53 ร้อยละ 6 และ 3,900 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

Suhartini และคณะ (2014) [46] ศึกษาการใช้กากดินฟอกสีร่วมกับมอลโตเดคตรินเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนของมอลโตเดคตรินที่ร้อยละ 8 ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และแรงอัด 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตัวแปรที่ศึกษา คือ ร้อยละของผลได้ ปริมาณความชื้น และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมและแรงอัดที่ดีที่สุด คือ มอลโตเดคตริน ร้อยละ 10 และแรงอัดที่ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีร้อยละของ

ผลได้ ปริมาณความชื้น และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 92.90 ร้อยละ 6.66 และ 2,617.75 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

Chavalparit และคณะ (2013) [47] ศึกษาศึกษาการใช้กลีเซอรอลดิบร่วมกับทางปาล์ม น้ำมันเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบที่ร้อยละ 19 22 26 29 32 35 39 42 และ 45 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุด คือ กลีเซอรอลดิบร้อยละ 45 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 4.35 ร้อยละ 11.90 ร้อยละ 81.30 ร้อยละ 2.38 และ 4,872.46 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

Asavatesanupap และคณะ (2010) [48] ศึกษาการใช้กลีเซอรอลดิบร่วมกับเปลือกทุเรียนและชานอ้อยเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบกับชีวมวลแต่ละชนิดเป็น 95:5 90:10 85:15 80:20 75:25 70:30 65:45 60:40 55:45 และ 50:50 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ค่าความร้อน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุด คือ 70:30 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 4,301.62 แคลอรีต่อกรัม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเงื่อนไขในกระบวนการคาร์บอนไนซ์และสัดส่วนผสมที่ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุ

3.1.1 กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปทุมธานีบิวเวอรี จำกัด

3.1.2 กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบ

กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บางจากไบโอฟูเอล จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 การคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

1. เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ WTB Binder
2. เตาเผา (Electric Furnace) ยี่ห้อ UniTemp
3. ถ้วยเซรามิก (Crucible)
4. เครื่องชั่งละเอียด (Digital Balance) ยี่ห้อ Sartorius

3.2.2 การอัดแท่งเชื้อเพลิง

1. ปีกเกอร์ (Beaker)
2. แท่งคนสาร (Stirrer Rod)
3. แม่แบบสำหรับอัดแท่ง (Mold)
4. เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Machine)

3.3 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน และได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลเต็มรูปแบบ และการออกแบบการทดลองแบบผสม เพื่อศึกษาเงื่อนไขในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาเงื่อนไขในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลเต็มรูปแบบ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

ตอนที่ 2 การศึกษาสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย กากดินฟอกสี และ กลิเซอรอลดิบ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อน

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

สมบัติของวัสดุที่ทำการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ และสมบัติเชิงเชื้อเพลิง

3.4.2 การคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

การคาร์บอนไนซ์เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัวให้แก่กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย (กากตะกอนดิบ) ในการศึกษาเงื่อนไขในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย โดยมีตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ โดยทำการศึกษาขอบเขตของอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเวลาการคาร์บอนไนซ์เป็น 30 นาที หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาขอบเขตของเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 120 นาที โดยกำหนดอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เป็น 300 องศาเซลเซียส โดยมีแผนการทดลองการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบ ดังตารางที่ 3.1 และมีวิธีดำเนินงานดังนี้

1. นำกากตะกอนดิบ ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกากตะกอนดิบประมาณ 20 กรัม ใส่ลงในถ้วยเซรามิค
3. นำกากตะกอนดิบไปเผาในเตาเผา
 - ในการศึกษาขอบเขตของอุณหภูมิ ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จากอุณหภูมิห้อง ไปที่ 100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจน หลังจากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เป็น 200 ถึง 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

- ในการศึกษาขอบเขตของเวลา ทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จากอุณหภูมิห้อง ไปที่ 300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจน หลังจากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเวลาในการคาร์บอนไนซ์เป็น 20 ถึง 120 นาที ตามลำดับ

4. นำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (กากตะกอนเผา) และทิ้งไว้จนเย็นแล้วเก็บใส่ในภาชนะ เพื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งต่อไป

5. วิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนเผา โดยพิจารณาที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นหลัก

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)					
	10	20	30	60	90	120
100			x			
200			x			
300	x	x	x	x	x	x
350			x			
400			x			
500			x			
600			x			
700			x			

* หมายถึง x หมายถึง การทดลอง

หลังจากทราบช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูงแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยทำการกำหนดระดับของตัวแปรดังตารางที่

ตารางที่ 3.2 ระดับของตัวแปรในการทำการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ			หน่วย
	สูง	กลาง	ต่ำ	
อุณหภูมิ	400	350	300	องศาเซลเซียส
เวลา	90	60	30	นาที

เมื่อได้ระดับของตัวแปรที่เหมาะสมแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab เป็นตัวช่วยในการสร้างเมตริกการออกแบบ (Design Matrix) โดยทำการทดลองแบบสุ่มซ้ำ 3 ครั้ง รวมจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 27 การทดลอง

3.4.3 การผสมของวัสดุระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบ

การผสมกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบเป็นวิธีการเพิ่มค่าความร้อนให้แก่เชื้อเพลิงอัดแท่ง ในงานวิจัยนี้จะสนใจปริมาณของกากตะกอนเผาเป็นหลักและมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งทำการทดลองหาสัดส่วนของกลีเซอรอลดิบที่เหมาะสมที่ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถคงรูปอยู่ในมือได้ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของของผสมดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองการหาอัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบในเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ส่วนผสมที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผสมระหว่าง per hundred mixture*		
	กากตะกอนเผา	กากดินฟอกสี	กลีเซอรอลดิบ
1	55	45	10
2	55	45	20
3	55	45	30

* หมายเหตุ per hundred mixture* หมายถึง ร้อยละของส่วนผสม (mixture)

mixture หมายถึง ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี

หลังจากทราบสัดส่วนของกลีเซอรอลดิบที่เหมาะสมแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองแบบผสม โดยมีแผนการทดลองการผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบ ดังตารางที่ 3.4 และมีวิธีดำเนินงานดังนี้

1. นำกากตะกอนเผาไปบดให้มีขนาดประมาณ 3 มิลลิเมตร
2. นำกากตะกอนเผาที่บดแล้วมาผสมกับกากดินฟอกสีให้เข้ากัน โดยมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของของผสม ซึ่งมีสัดส่วนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ดังนี้
 - ร้อยละของกากตะกอนเผา คือ ร้อยละ 55 ถึง 95 โดยน้ำหนัก
 - ร้อยละของกากดินฟอกสี คือ ร้อยละ 5 ถึง 45 โดยน้ำหนัก
3. ทำการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรและมีความยาว 5 เซนติเมตร โดยการนำวัสดุที่ผสมกันเรียบร้อยแล้วใส่ในแม่แบบสำหรับอัดแท่งและทำการอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก
4. วิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ และสมบัติเชิงเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองการผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ส่วนผสมที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผสมระหว่าง		per hundred mixture*
	กากตะกอนเผา	กากดินฟอกสี	
1	55	45	30
2	65	35	30
3	75	25	30
4	85	15	30
5	95	5	30

* หมายเหตุ per hundred mixture* หมายถึง ร้อยละของส่วนผสม (mixture) mixture หมายถึง ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสี

เมื่อได้ระดับของตัวแปรที่เหมาะสมแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองแบบผสมด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab เป็นตัวช่วยในการสร้างเมตริกการออกแบบ โดยทำการทดลองแบบสุ่มซ้ำ 2 ครั้ง รวมจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 10 การทดลอง

3.4.4 การทดสอบสมบัติของวัสดุและเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การทดสอบสมบัติของวัสดุและเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

3.4.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นบรรจุ (ภาคผนวก ก)

3.4.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว (ภาคผนวก ข)

3.4.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าความร้อน (ภาคผนวก ค)

3.4.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับสัดส่วนผสมของวัสดุ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับสัดส่วนผสมของวัสดุสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.1

$$HV_{CAL} = m_{BS}HV_{BS} + m_{BE}HV_{BE} + m_{CG}HV_{CG} \quad (3.1)$$

เมื่อ HV_{CAL} คือ ค่าความร้อนจากการคำนวณของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
 m_{BS} คือ เศษส่วนมวลของกากตะกอนเผา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 HV_{BS} คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกากตะกอนเผา (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
 m_{BE} คือ เศษส่วนมวลของกากดินฟอกสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 HV_{BE} คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกากดินฟอกสี (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
 m_{CG} คือ เศษส่วนมวลของกลีเซอรอลดิบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 HV_{CG} คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกลีเซอรอลดิบ (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)

โดยเศษส่วนมวลของวัสดุแต่ละชนิดสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$m_{MAT} = \frac{W_{MAT}}{M_{MIX}} \quad (3.2)$$

เมื่อ W_{MAT} คือ น้ำหนักของวัสดุ (กิโลกรัม)
 W_{MIX} คือ น้ำหนักรวมของของผสม (กิโลกรัม)

3.4.6 การคำนวณผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การหาคำนวณผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่

3.3

$$EP = \frac{E_o}{E_i} \quad (3.3)$$

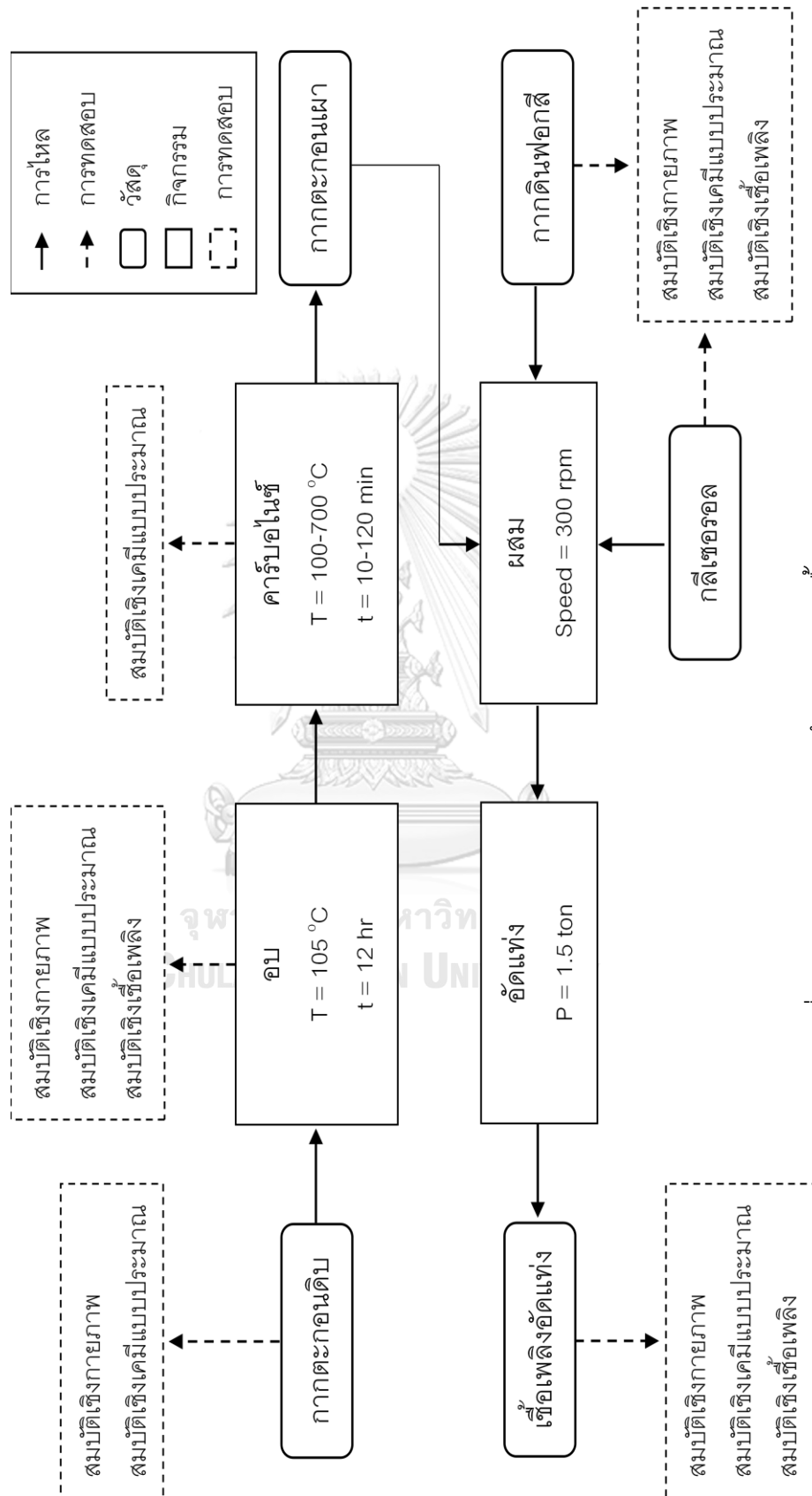
เมื่อ	EP	คือ ผลิตภาพด้านพลังงาน (Energy Productivity)
	E_o	คือ ค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
	E_i	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)

โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง คือ กากรวมกันของพลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งกับพลังงานไฟฟ้าในการคาร์บอนไนซ์ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.๓

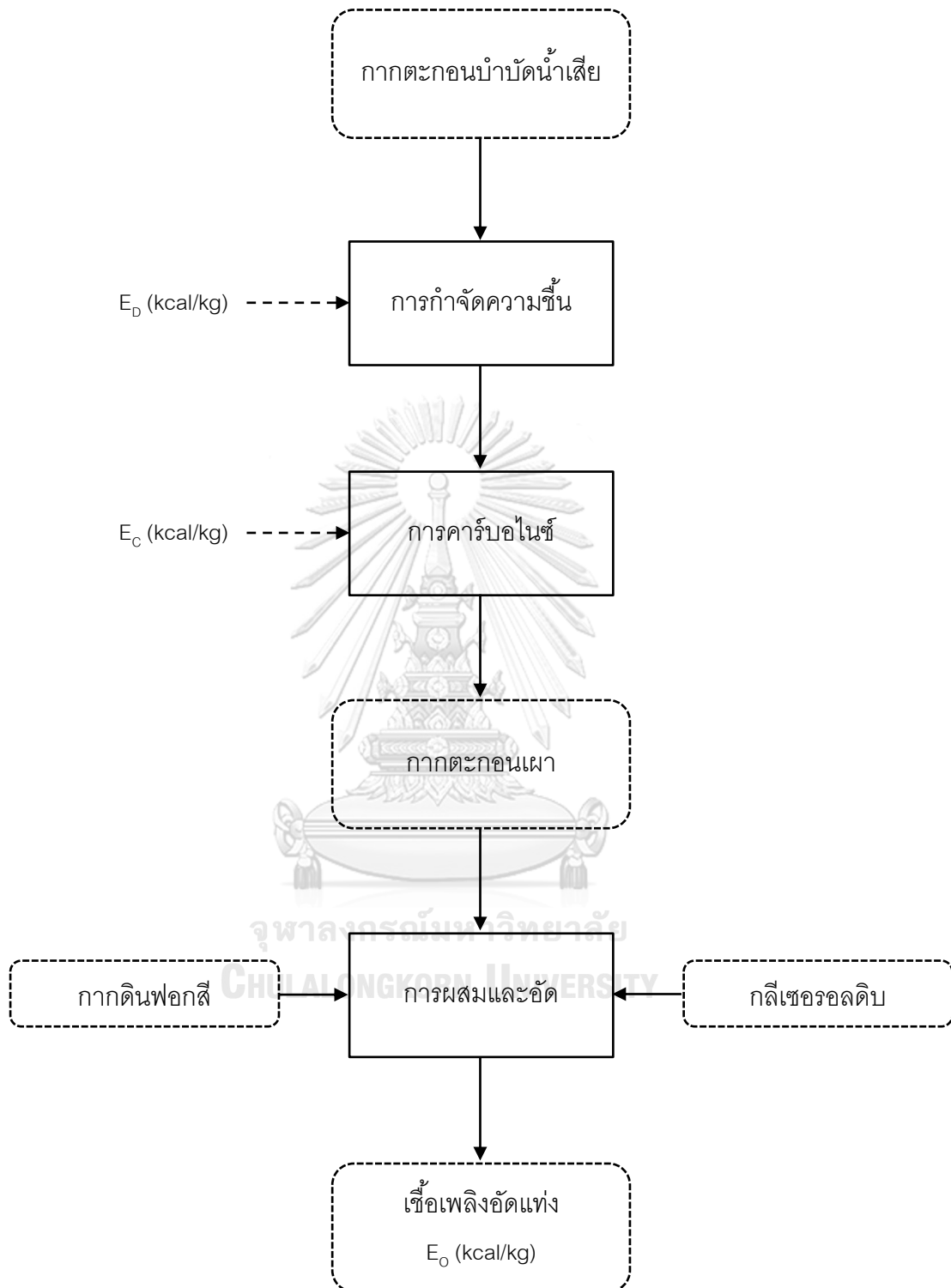
$$E_i = E_D + E_C \quad (3.4)$$

เมื่อ	E_D	คือ พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
	E_C	คือ พลังงานไฟฟ้าในการคาร์บอนไนซ์ (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)

แผนภูมิกระบวนการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และแผนภูมิการคำนวณผลิตภาพด้านพลังงานได้แสดงสรุปไว้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แผนภูมิกระบวนการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 3.2 แผนภูมิการคำนวณผลผลิตภาพด้านพลังงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ศึกษาเงื่อนไขในกระบวนการคาร์บอนไนซ์ที่ทำให้กากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล และศึกษาสัดส่วนผสมที่ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าความร้อนสูงที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบสัดส่วนผสม ซึ่งได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิดด้วยกัน คือ กากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์ (กากตะกอนดิบ) กากดินฟอสเฟตและกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์ก่อนทำการลดความชื้นจะมีสีดำเข้มลักษณะคล้ายดินเหนียว หลังผ่านการลดความชื้นแล้วจะมีสีอ่อนลง กากดินฟอสเฟตจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีน้ำตาลเข้มลักษณะคล้ายดินทรายเปียกน้ำ ส่วนกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีเหลืองเข้มลักษณะคล้ายน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติด้านต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	สมบัติเชิงกายภาพ (กิโลกรัมต่อลิตร)		สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		สมบัติเชิงข้อเพลิง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	
	ความหนาแน่น	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหย	ปริมาณแก็สคาร์บอนคงตัว	ปริมาณคาร์บอน	ค่าความร้อน
ข้อเพลิง	-	< 15	< 70	< 20	> 15	> 3,000
มาตรฐาน [19], [49]	-	< 15	< 70	< 20	> 15	> 3,000
กากตะกอนดิบ	2.90	81.73	-	-	-	-
ก่อนลดความชื้น	2.90	81.73	-	-	-	-
กากตะกอนดิบ	2.73	7.48	57.06	30.96	4.36	3,045.35
หลังลดความชื้น	2.98	1.44	30.35	65.34	2.66	2,553.25
กาลีเซอรอลดิบ	3.34	-	-	-	-	3,534.98 [47]

4.1.1 สมบัติเชิงกายภาพของกากตะกอนดิบ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบ

เมื่อนำกากตะกอนดิบ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนดิบก่อนลดความชื้นแล้วจะมีความหนาแน่นบรรจุสูงกว่ากากตะกอนดิบก่อนลดความชื้นเฉลี่ย 1.1 เท่า เช่นเดียวกับกากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบที่มีความหนาแน่นบรรจุสูงกว่ากากตะกอนดิบก่อนลดความชื้นเฉลี่ย 1.1 เท่า และ 1.2 เท่า ตามลำดับ

4.1.2 สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนดิบและกากดินฟอกสี

เมื่อนำกากตะกอนดิบและกากดินฟอกสีมาวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนดิบก่อนลดความชื้นมีปริมาณความชื้นสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 5.4 เท่า แต่กากตะกอนดิบหลังลดความชื้นและกากดินฟอกสีมีปริมาณความชื้นและปริมาณสารระเหยผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่มีปริมาณเถ้าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเฉลี่ย 1.5 เท่า และ 3.3 เท่า ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเฉลี่ย 3.4 เท่า และ 5.6 เท่า ตามลำดับ

4.1.3 สมบัติเชิงเชื้อเพลิงของกากตะกอนดิบ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบ

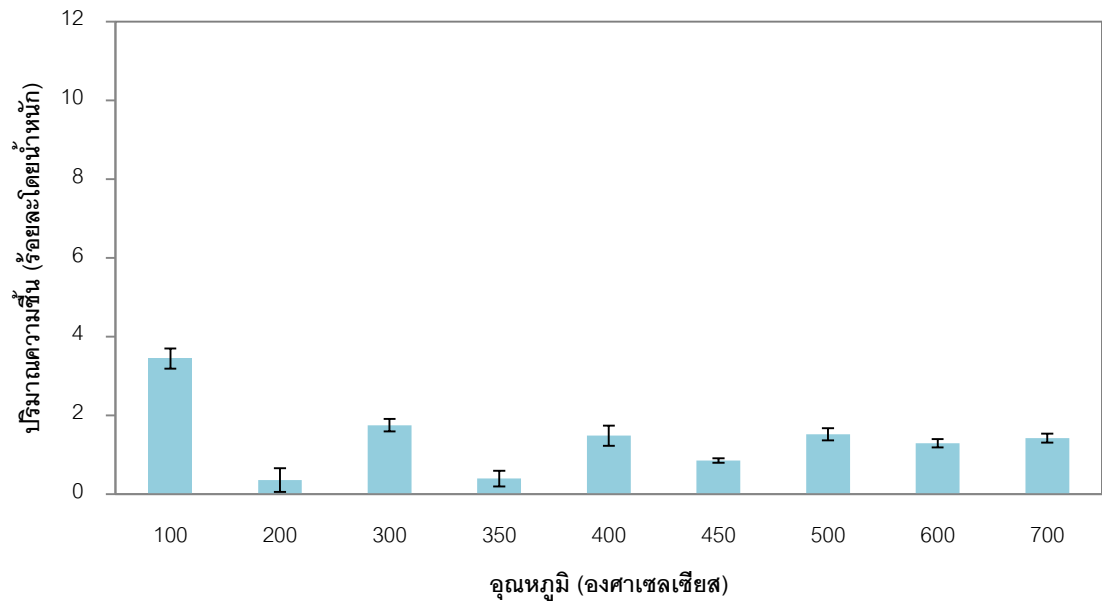
เมื่อนำกากตะกอนดิบ กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบมาวิเคราะห์สมบัติเชิงเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ากากตะกอนดิบและกลีเซอรอลดิบมีค่าความร้อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเฉลี่ย 1.0 และ 1.9 เท่า ตามลำดับ ในขณะที่กากดินฟอกสีมีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเฉลี่ย 1.2 เท่า

4.2 ผลของการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียกับสมบัติต่าง ๆ

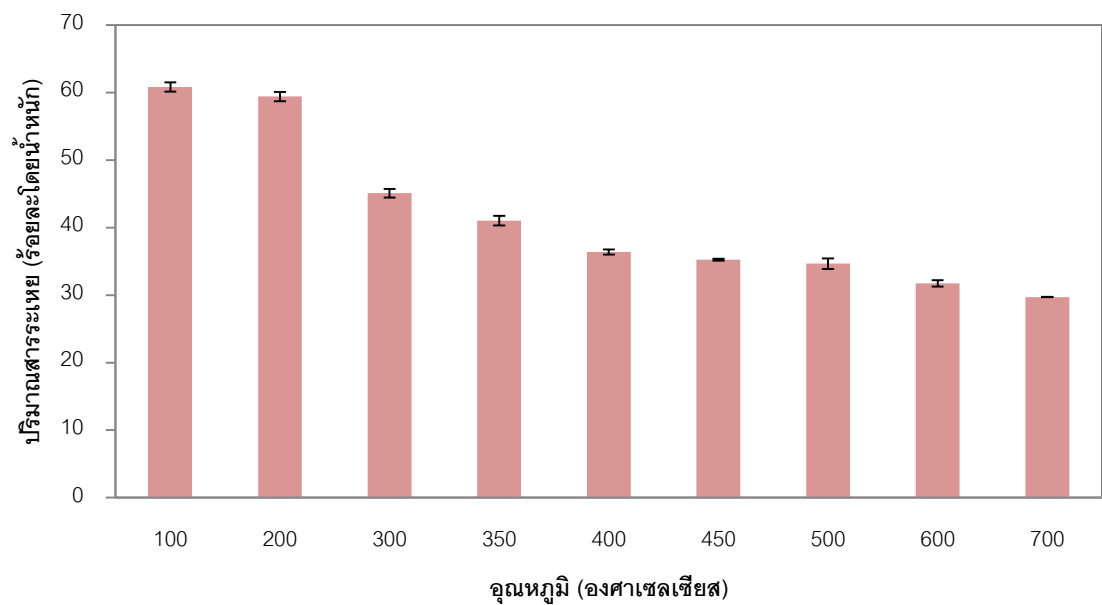
ในการศึกษาเงื่อนไขในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย (กากตะกอนดิบ) เพื่อให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด จะมีตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์

4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

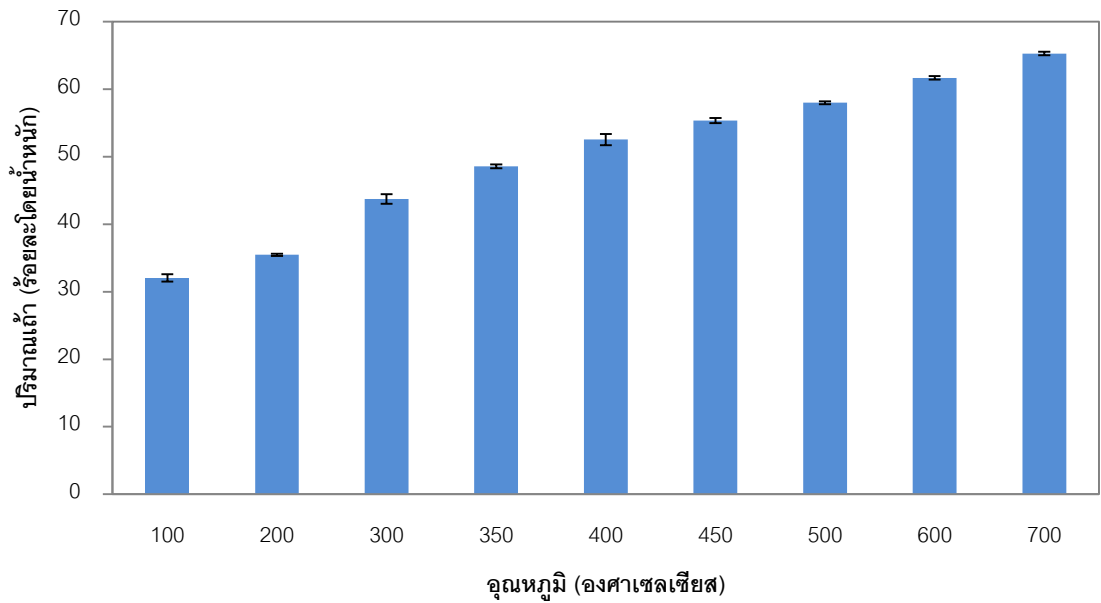
เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (กากตะกอนเผา) ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ดังที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนเผา กล่าวคือ ปริมาณความชื้นของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีลักษณะไม่เป็นแนวโน้ม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดของช่วงเวลาในการทดลองและการควบคุมวัสดุ ในขณะที่ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนเผา มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 60.82 ± 0.69 เป็นร้อยละ 29.71 ± 0.04 และปริมาณเถ้าของกากตะกอนเผา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 32.04 ± 0.53 เป็นร้อยละ 65.28 ± 0.26 ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนเผา พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 100 เป็น 350 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3.69 ± 0.18 เป็นร้อยละ 10.01 ± 0.30 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 350 เป็น 700 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนคงตัวกลับลดลงจากร้อยละ 10.01 ± 0.30 เป็นร้อยละ 3.58 ± 0.17 โดยอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ที่ 100 และ 700 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าร้อยละ 4.36 ± 0.21 ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ โดยสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนเผาที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ดังนั้นขอบเขตการศึกษาอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบเพื่อใช้ในการผสมเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียส



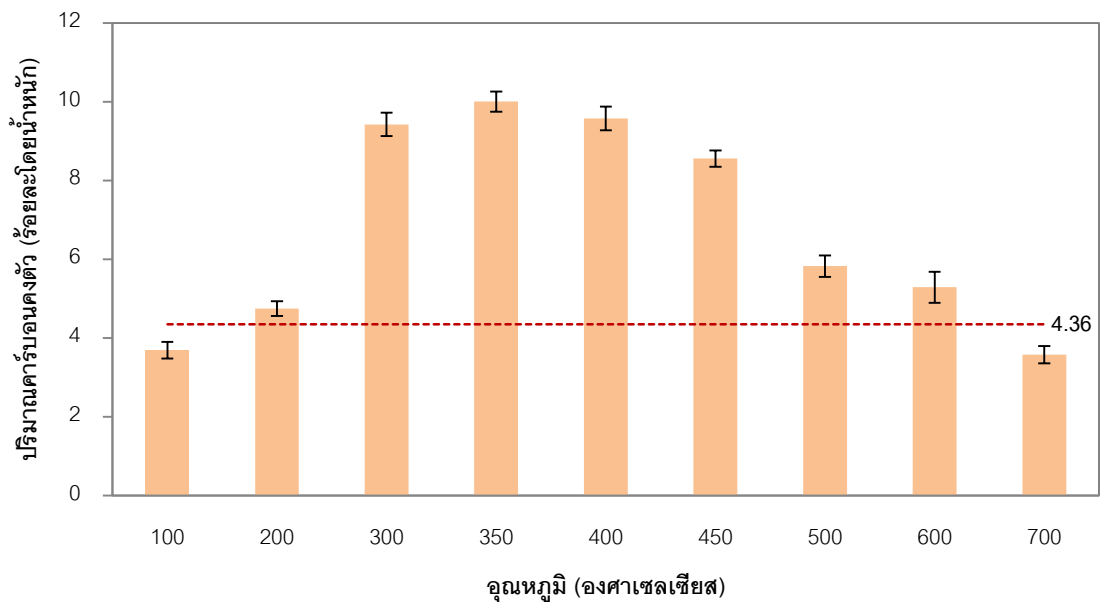
รูปที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของอากาศจากตราบที่อุณหภูมิจากตราบในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.2 ปริมาณสารระเหยของอากาศจากตราบที่อุณหภูมิจากตราบในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



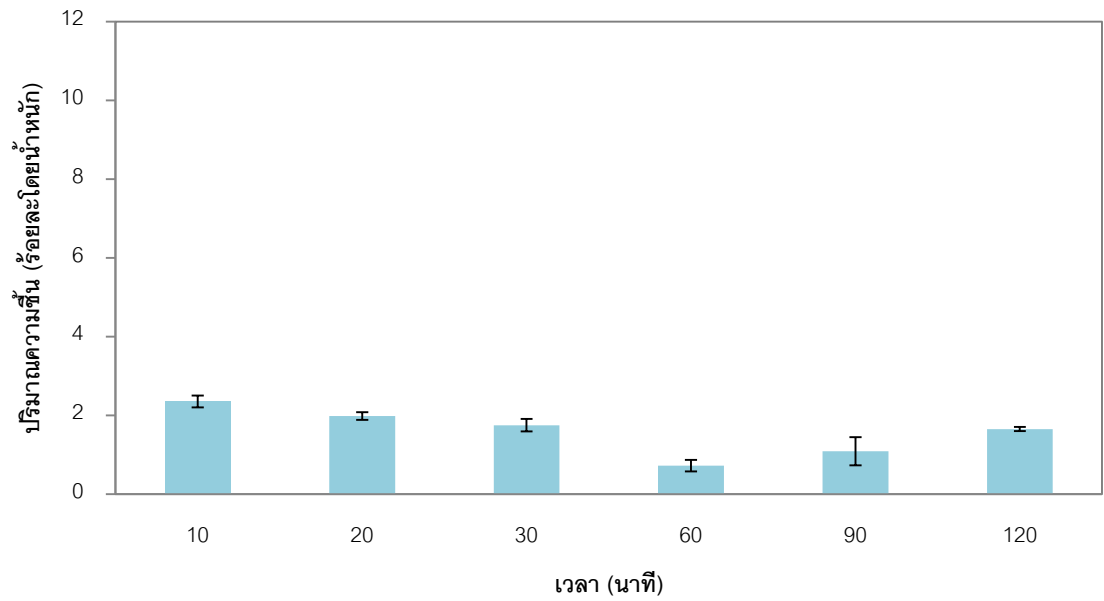
รูปที่ 4.3 ปริมาณไอน้ำของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



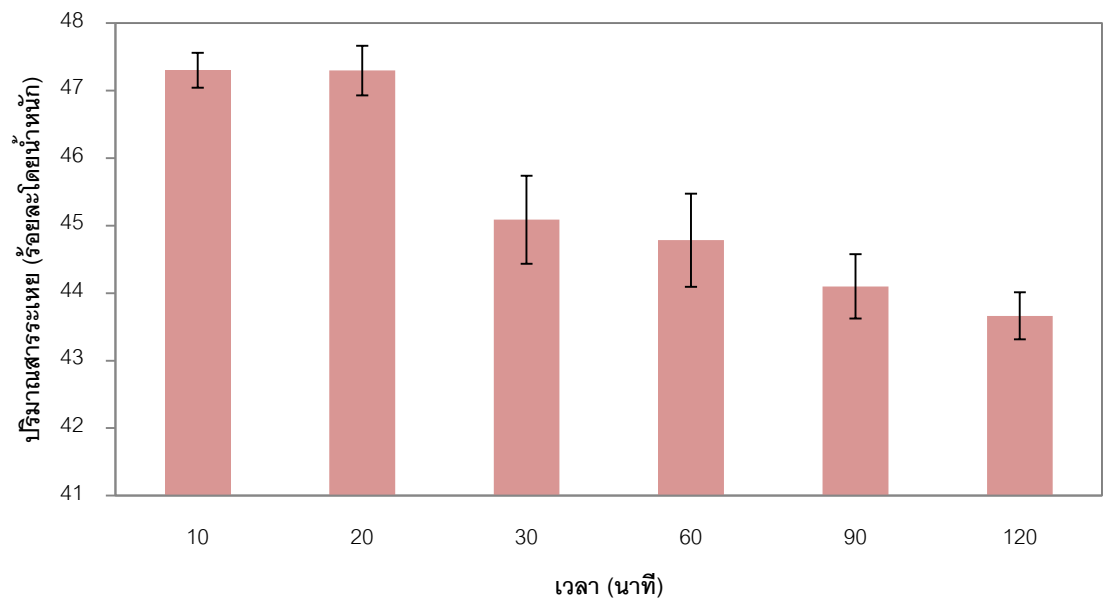
รูปที่ 4.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนเผาที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

4.2.2 ผลของเวลาที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

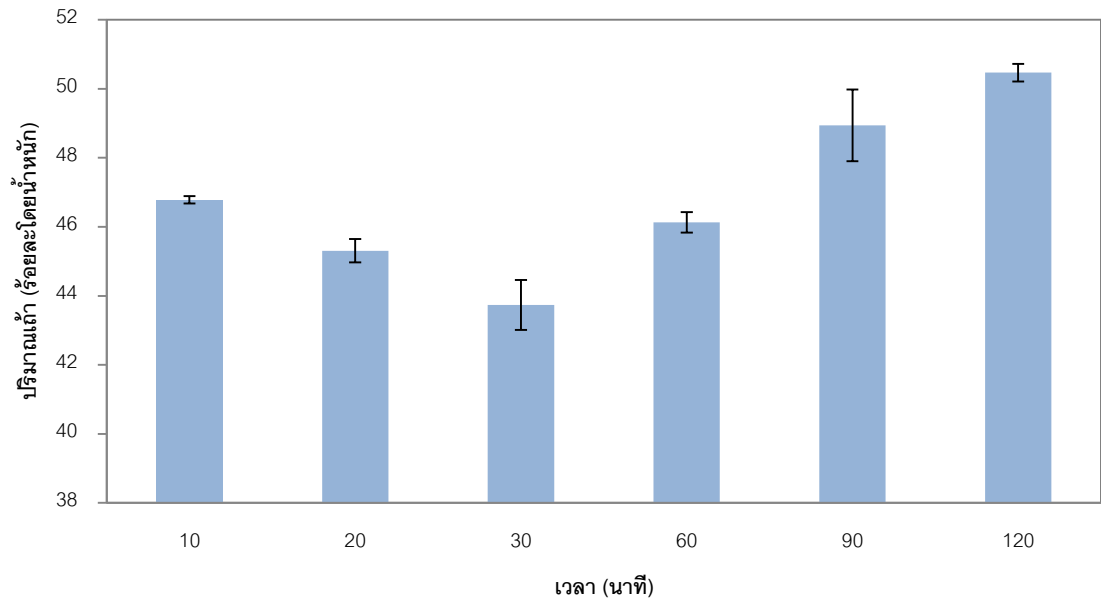
รูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.8 แสดงผลของเวลาในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ โดยใช้เวลาในการคาร์บอนไนซ์ 10 ถึง 120 นาทีที่ 300 องศาเซลเซียส พบว่า เวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนเผา กล่าวคือ เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 10 เป็น 60 นาที ปริมาณความชื้นของกากตะกอนเผาจะลดลงจากร้อยละ 2.36 ± 0.15 เป็นร้อยละ 0.73 ± 0.15 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 60 เป็น 120 นาที ปริมาณความชื้นกลับเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.73 ± 0.15 เป็นร้อยละ 1.66 ± 0.05 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดของการควบคุมวัสดุ ในขณะที่ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนเผาที่มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 49.34 ± 0.26 เป็นร้อยละ 43.66 ± 0.35 และปริมาณเถ้าของกากตะกอนเผาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.78 ± 0.11 เป็นร้อยละ 50.46 ± 0.26 ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนเผา พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 10 เป็น 30 นาที ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.52 ± 0.22 เป็นร้อยละ 9.42 ± 0.26 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 30 เป็น 120 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนคงตัวกลับลดลงจากร้อยละ 9.42 ± 0.26 เป็นร้อยละ 4.22 ± 0.15 โดยเวลาในการคาร์บอนไนซ์ที่ 120 นาทีที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวน้อยกว่าร้อยละ 4.36 ± 0.21 ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนคงตัวของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ โดยสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนเผาที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว ดังนั้นขอบเขตการศึกษาเวลาในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนดิบเพื่อใช้ในการผสมเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ 30 60 และ 90 นาที



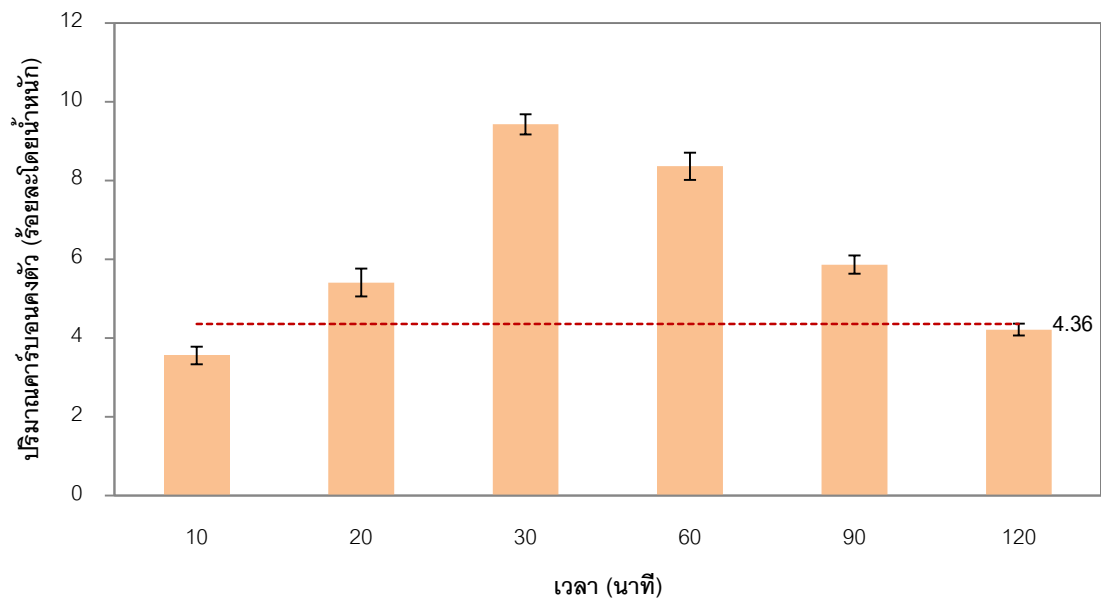
รูปที่ 4.5 ปริมาณความชื้นของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



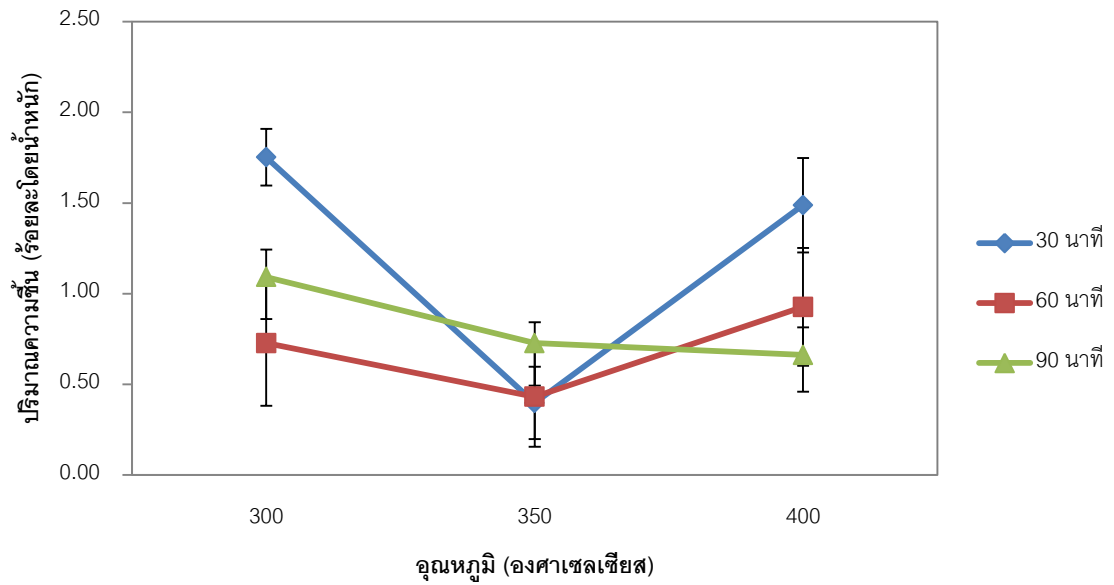
รูปที่ 4.7 ปริมาณไอน้ำของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



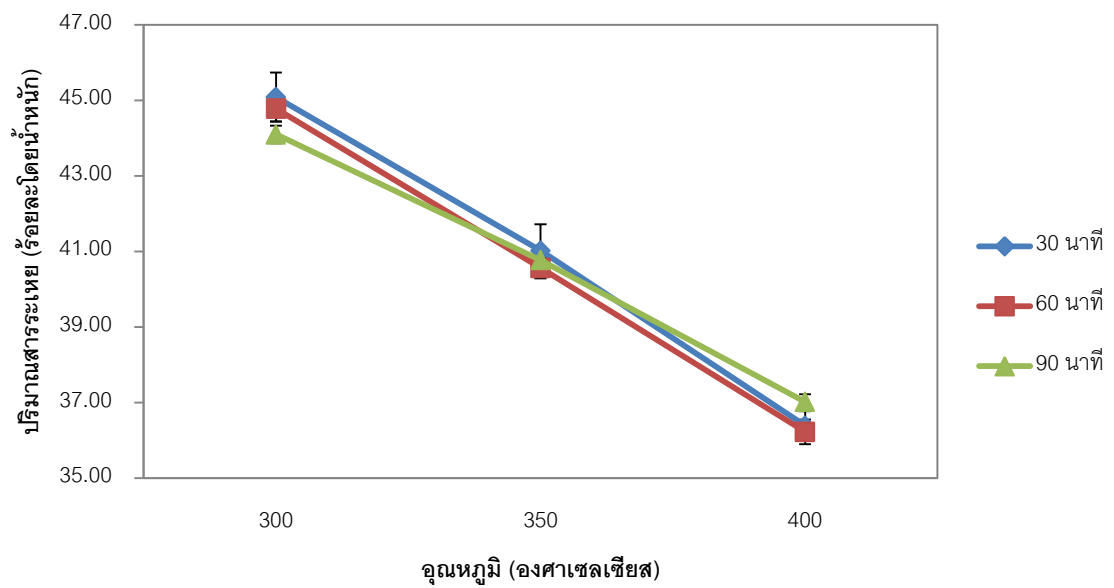
รูปที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ของกากตะกอนเผาที่เวลาในช่วง 10 ถึง 120 นาที
ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

4.2.3 ผลของอุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียสและเวลาในช่วง 30 ถึง 90 นาทีที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

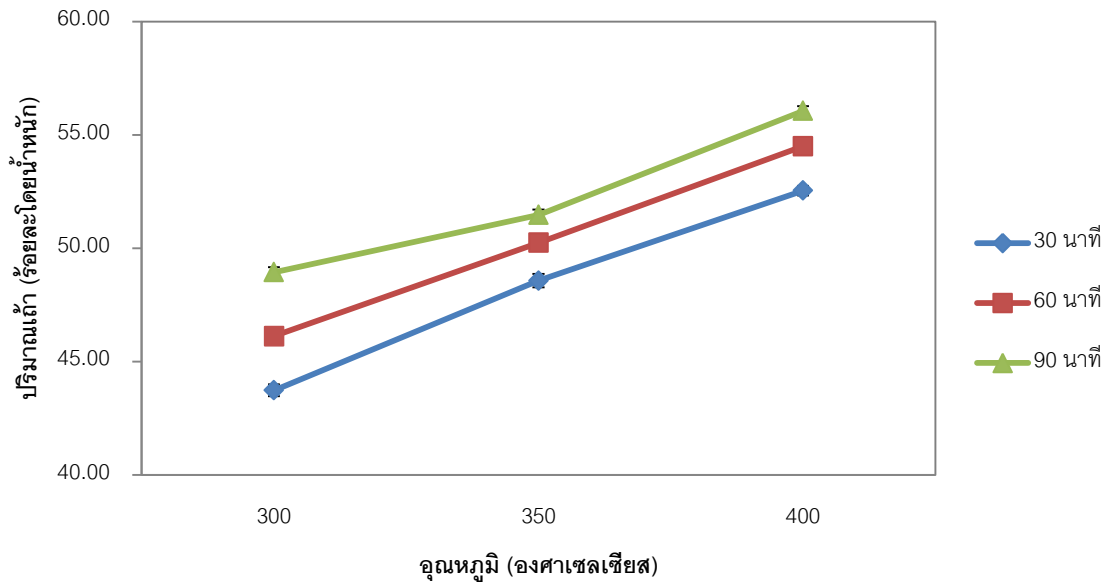
เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (กากตะกอนเผา) ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 ถึง 90 นาที โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบสุ่มซ้ำ 3 ครั้ง ดังที่ 4.9 ถึง รูปที่ 4.12 พบว่า อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนเผา กล่าวคือ ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณความชื้นที่ต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 0.40 ± 0.20 ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ส่วนปริมาณสารระเหยมีแนวโน้มลดลง โดยมีปริมาณสารระเหยที่สูงที่สุด คือ ร้อยละ 45.09 ± 0.65 ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ในขณะที่ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณเถ้าที่ต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 43.74 ± 0.72 ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส และลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส เป็น 400 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงที่สุด คือ ร้อยละ 10.01 ± 0.30 ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นหลัก



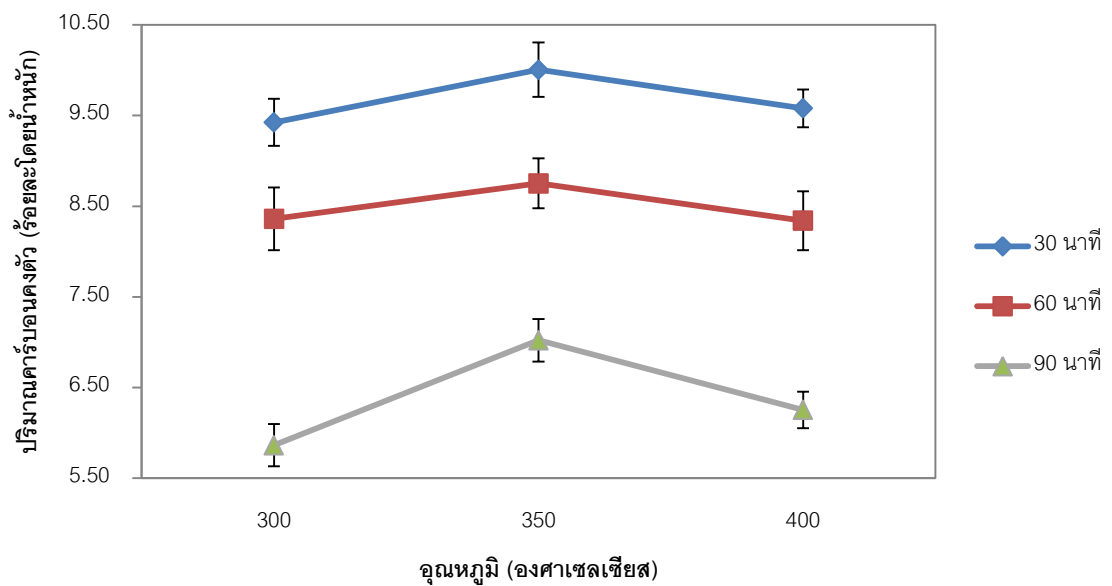
รูปที่ 4.9 ปริมาณความชื้นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที



รูปที่ 4.10 ปริมาณสารระเหยของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ ที่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที



รูปที่ 4.11 ปริมาณไอน้ำของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิจาก 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที



รูปที่ 4.12 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิจาก 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที

4.2.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์ผลการวิจัยทางสถิติจะมีการใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาช่วย เพื่อเพิ่มความสะดวกและความรวดเร็วในการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลการวิจัยทางสถิตินี้จะประกอบไปด้วยการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐาน เพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการวิจัย โดยจะตรวจสอบสมมติฐาน 3 ประการ ได้แก่ สมมติฐานด้านการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง สมมติฐานด้านความสม่ำเสมอของความแปรปรวน และสมมติฐานด้านความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ถึงตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Assumption)

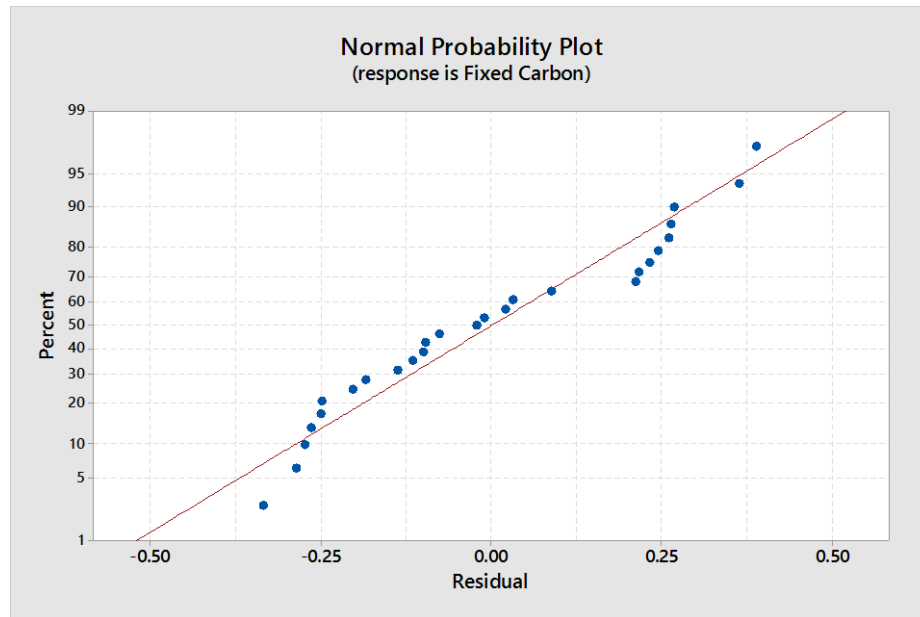
จากการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวดังรูปที่ 4.13 พบว่าการเรียงตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะใกล้เคียงเส้นตรง โดยมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.062 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

จากการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวดังรูปที่ 4.14 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดเป็นรูปแบบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่

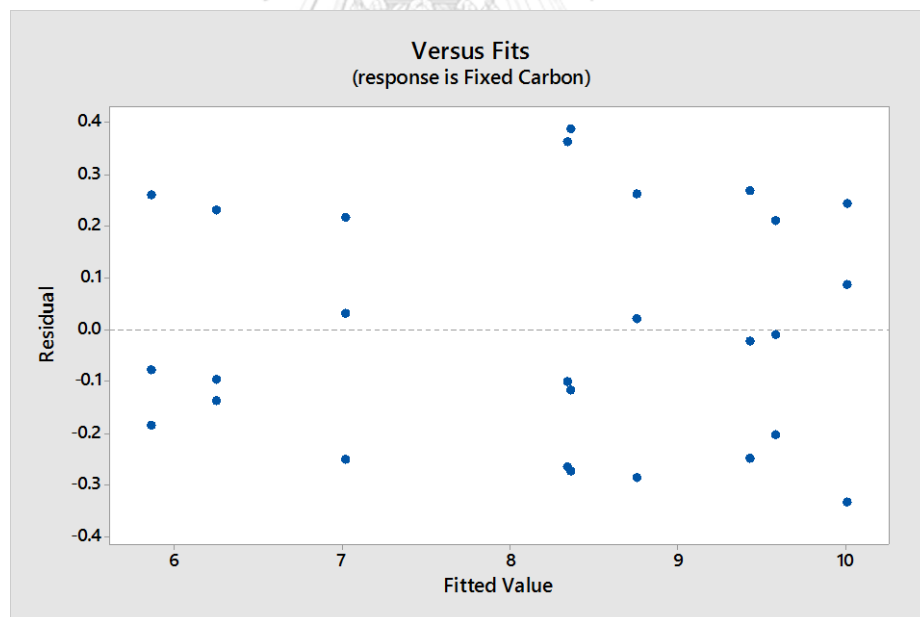
3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual)

จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวดังรูปที่ 4.15 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดแนวโน้มของข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

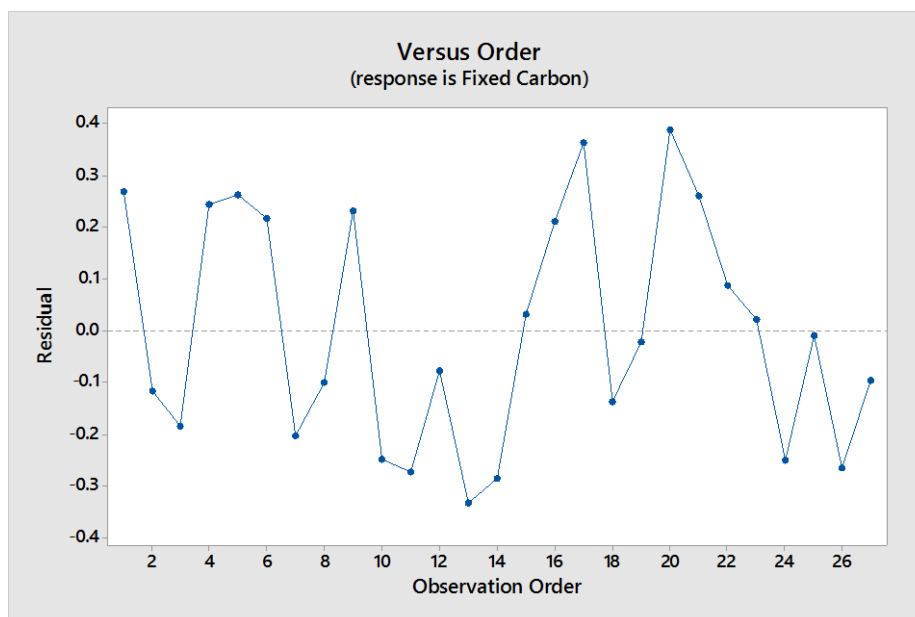


รูปที่ 4.13 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคง

ตัว



รูปที่ 4.14 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัว



รูปที่ 4.15 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัว

สรุปผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความแปรปรวนคงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน

4.2.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4.6

เมื่อพิจารณาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม พบว่าผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย คือ อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับในนัยสำคัญที่ 0.05 ในขณะที่ผลกระทบร่วมของตัวแปรระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย มีค่า P-value เท่ากับ 0.198 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับในนัยสำคัญที่ 0.05 โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า (R^2_{adj}) เท่ากับ ร้อยละ 97.60 และร้อยละ 96.54 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์โดยมีอุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรอิสระ

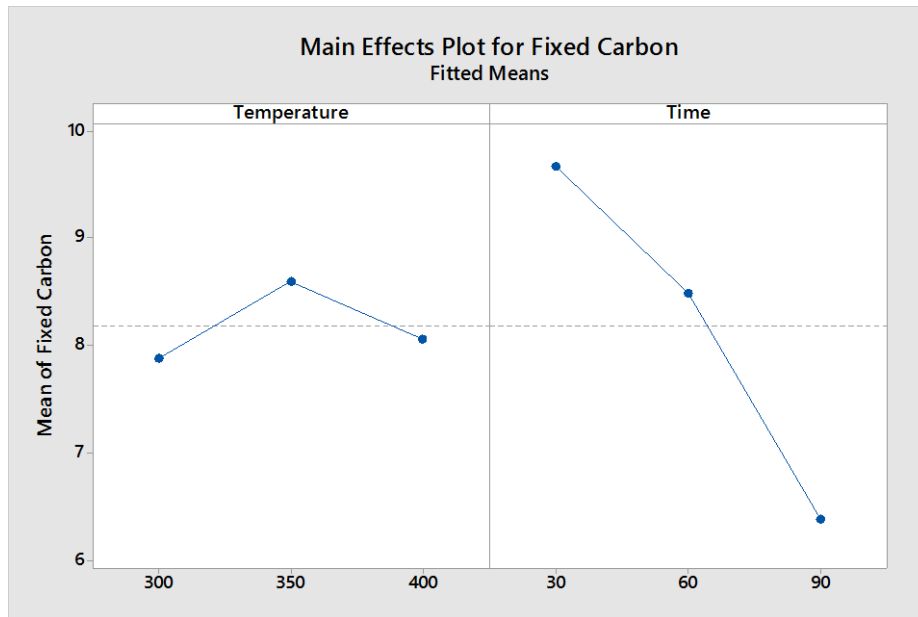
Term	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Temperature	2	2.4622	1.2311	17.06	0.000
Time	2	49.9611	24.9806	346.24	0.000
Temperature*Time	4	0.4854	0.1213	1.68	0.198
Error	18	1.2987	0.0721		
Total	26	54.2073			

S = 0.269

R-sq = 97.60%

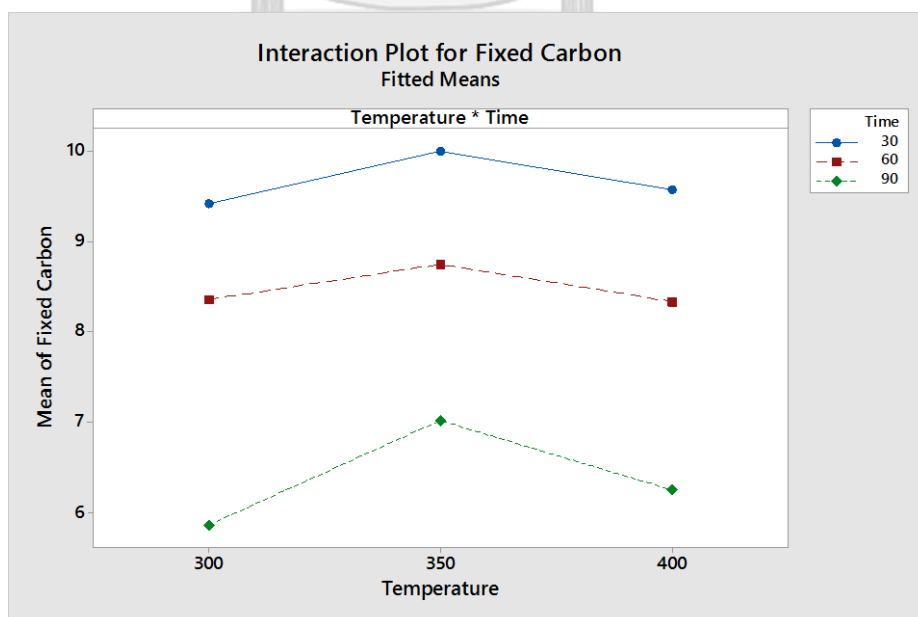
R-sq(adj) = 96.54%

รูปที่ 4.16 แสดงผลของผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 300 เป็น 400 องศาเซลเซียส แต่จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมากที่สุด ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมวล (Mass Conversion) [50] นอกจากนี้ยังเกิดการสลายตัวของโมเลกุล (Devolatilization) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) [51] ในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย แต่หากเพิ่มอุณหภูมิสูงมากเกินไปจะทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือ เกิดความเรียงตัวไม่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนภายในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้เกิดการหายไปของอะตอมคาร์บอนและสารประกอบของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) [52] บนผิวของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ในส่วนของการเพิ่มเวลาในการคาร์บอนไนซ์จาก 30 เป็น 90 นาที จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวในกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาในการคาร์บอนไนซ์บ่งบอกถึงการแตกตัวของสารอินทรีย์ (Organic Compounds) [53] ภายในการตะกอนบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นหากใช้เวลาในการคาร์บอนไนซ์มากเท่าไร การแตกตัวของอะตอมคาร์บอนภายในสารอินทรีย์ยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 4.16 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

รูปที่ 4.17 แสดงผลกระทบร่วมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่าตัวแปรทั้ง 2 ตัวมีแนวโน้มไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกัน โดยเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์กาทะกอนดิบเท่ากับ 350 องศาเซลเซียส (ระดับกลาง) และเวลาในการคาร์บอนไนซ์กาทะกอนดิบเท่ากับ 30 นาที จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกาทะกอนเผาสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

จากผลการวิจัยข้างต้น พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุด คือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งแสดงได้ตารางที่ 4.5 โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับร้อยละ 10.01 ± 0.30 และมีค่าความร้อนเท่ากับ $3,480.65 \pm 0.78$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

4.3 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ในการศึกษาสัดส่วนผสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง เพื่อให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนในระดับสูง จะมีตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปรคือ อัตราส่วนผสมของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ (กากตะกอนเผา) ในช่วงร้อยละ 55 ถึง 95 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมของกากดินฟอกสีในช่วงร้อยละ 5 ถึง 45 โดยน้ำหนัก และมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสาน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม แบบสุ่มซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับตัวแปรตอบสนองในด้านปริมาณคาร์บอนคงตัว และแบบสุ่ม 2 ซ้ำ สำหรับตัวแปรตอบสนองในค่าความร้อน

4.3.1 ผลของสัดส่วนของกลีเซอรอลดิบที่มีต่อลักษณะรูปร่างของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการวิเคราะห์การอัดแท่งเชื้อเพลิงระหว่างกากตะกอนเผาที่อัตราส่วนร้อยละ 55 โดยน้ำหนักกับกากดินฟอกสีที่อัตราส่วนร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก โดยมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสานตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของของผสม พบว่า กลีเซอรอลดิบที่อัตราส่วนร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของของผสม ไม่สามารถอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ ดังตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3 ลักษณะของรูปร่างเชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนของกลีเซอรอลดิบต่าง ๆ

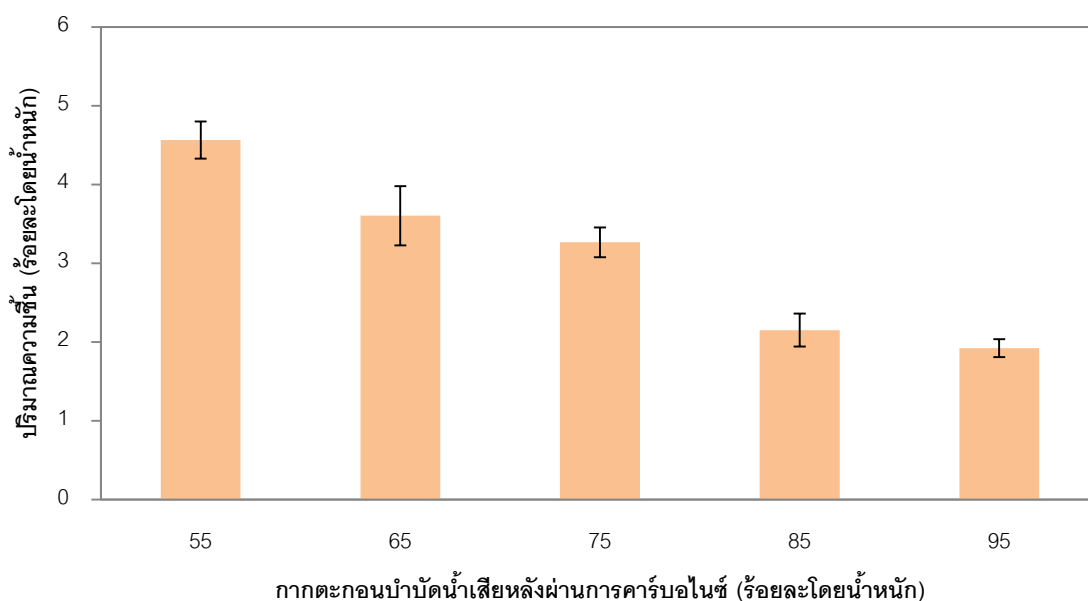
ส่วนผสม ที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผสม ระหว่าง		per hundred mixture*	ลักษณะรูปร่างของ เชื้อเพลิงอัดแท่ง
	กากตะกอนเผา	กากดินฟอกสี		
			กลีเซอรอลดิบ	
1	55	45	10	ไม่สามารถอัดแท่ง
2	55	45	20	ไม่สามารถอัดแท่ง
3	55	45	30	สามารถอัดแท่งได้

* หมายเหตุ per hundred mixture* หมายถึง ร้อยละของส่วนผสม (mixture)

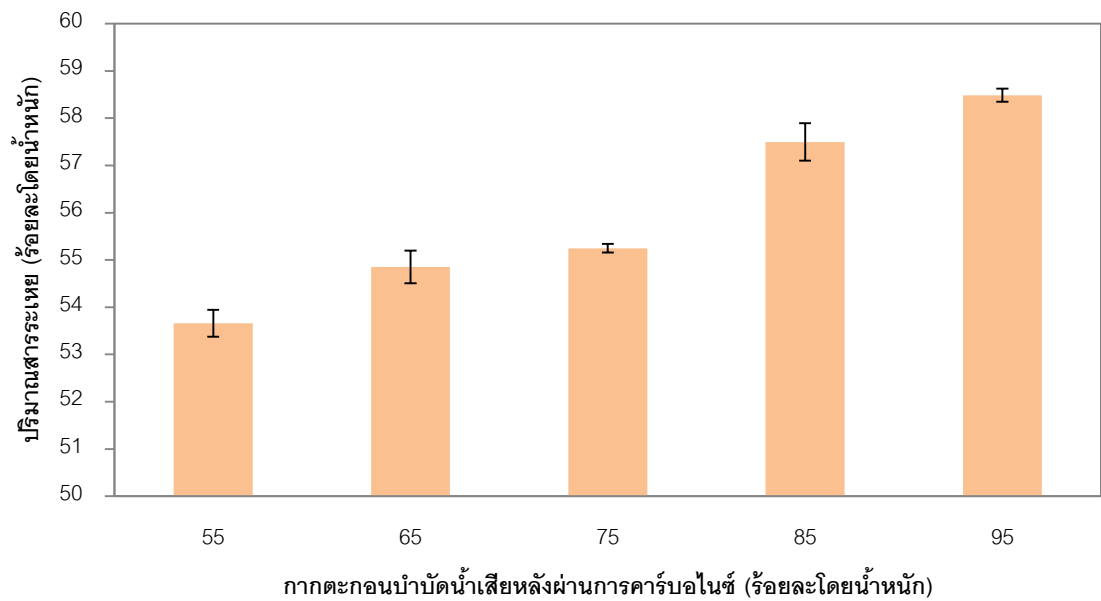
mixture หมายถึง ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสี

4.3.2 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ

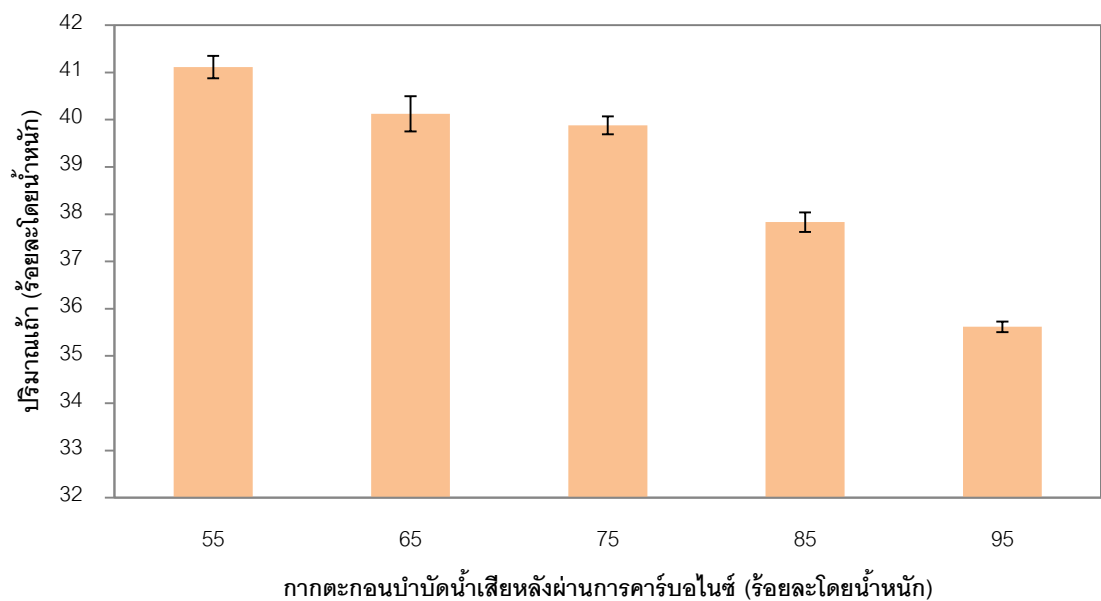
รูปที่ 4.18 ถึง รูปที่ 4.21 แสดงผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบต่อสมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ พบว่า สัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผาและกากดินฟอกสีที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนเผาจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 4.57 ± 0.24 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 1.92 ± 0.11 โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับปริมาณเถ้าที่มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 41.11 ± 0.29 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 35.62 ± 0.08 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มจากร้อยละ 53.66 ± 0.29 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 58.49 ± 0.14 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 0.66 ± 0.21 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 3.97 ± 0.16 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นหลัก



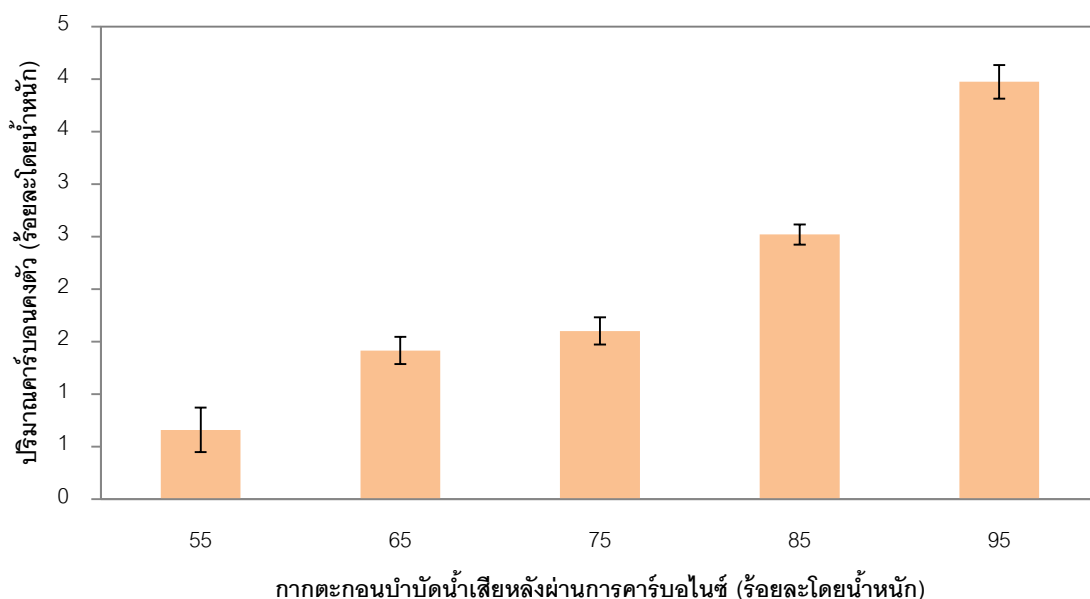
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหยกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง



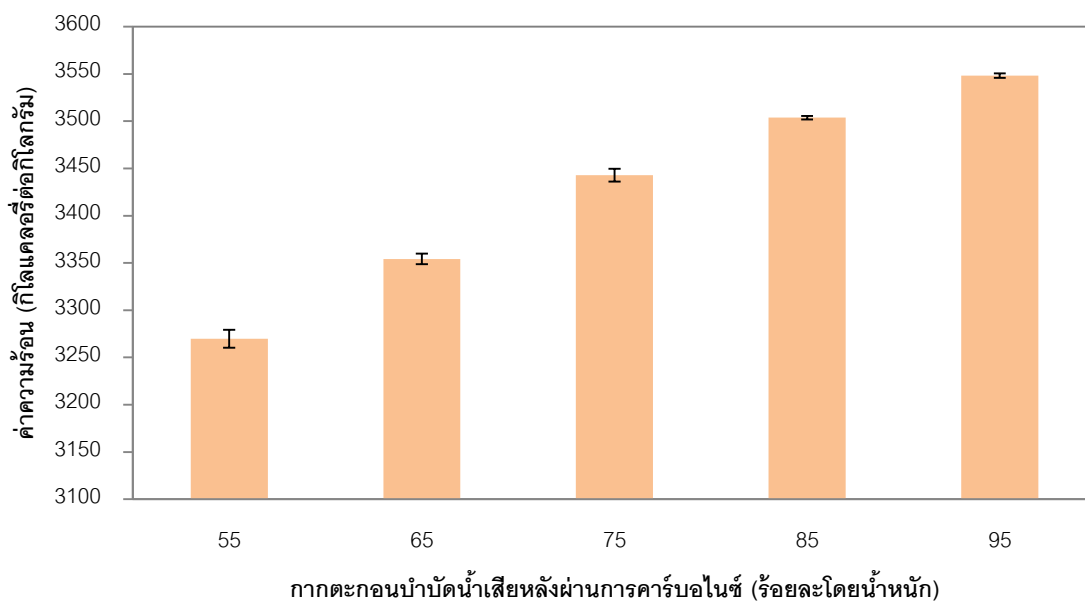
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแฉะกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนคงตัวกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสีในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

4.3.2 ผลของสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่มีต่อสมบัติเชิงเชื้อเพลิง

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผาและกากดินฟอกสีที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังที่ 4.22 พบว่า ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก $3,269 \pm 9.62$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม เป็น $3,548.10 \pm 2.33$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอนเผา



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับสัดส่วนผสมร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนเผากับกากดินฟอสฟอรัสในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

4.3.3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์ผลการวิจัยทางสถิติจะมีการใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาช่วย เพื่อเพิ่มความสะดวกและความรวดเร็วในการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลการวิจัยทางสถิตินี้จะประกอบไปด้วยการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐาน เพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการวิจัย โดยจะตรวจสอบสมมติฐาน 3 ประการ ได้แก่ สมมติฐานด้านการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง สมมติฐานด้านความสม่ำเสมอของความแปรปรวน และสมมติฐานด้านความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ถึงตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Assumption)

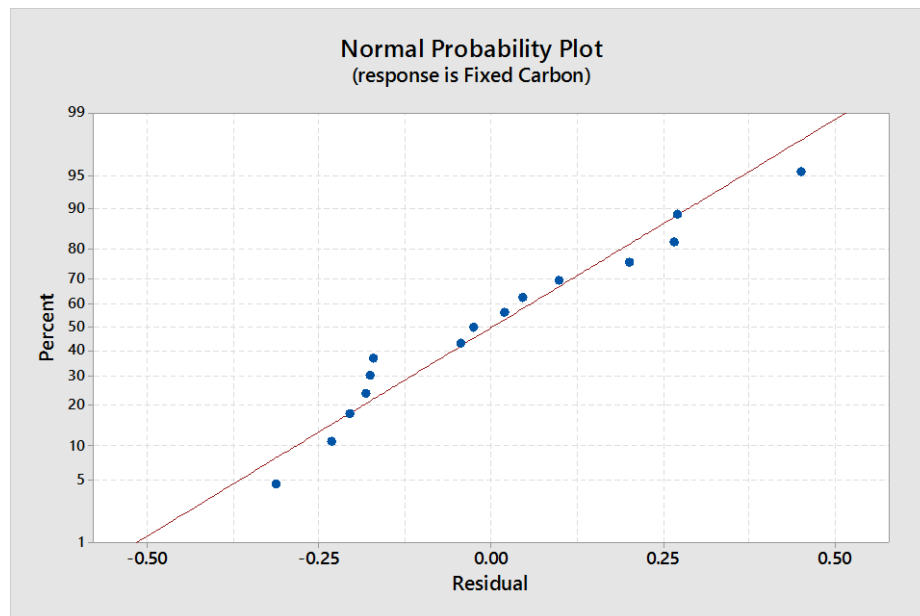
จากการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.23 พบว่าการเรียงตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงเส้นตรง โดยมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.435 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

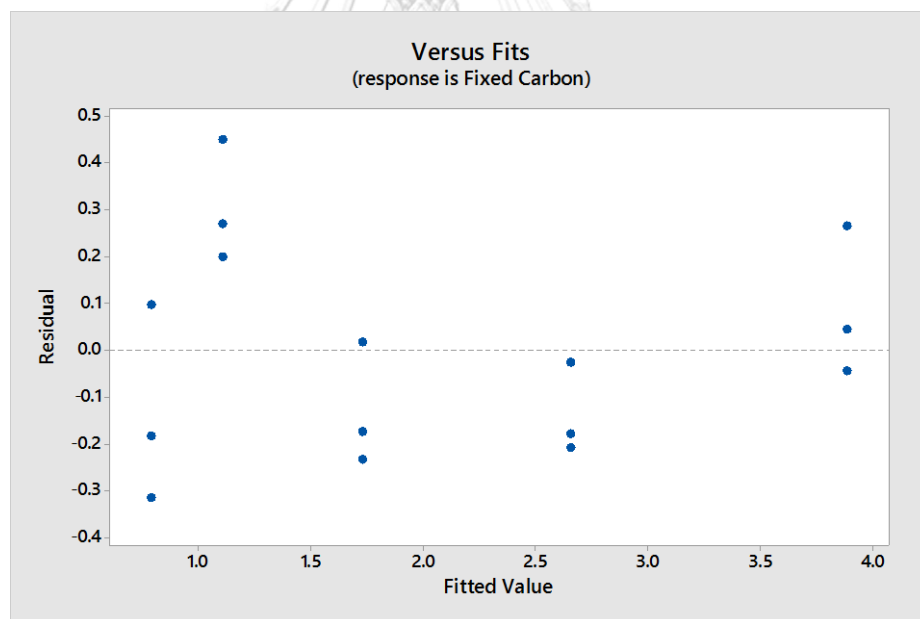
จากการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.24 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดเป็นรูปแบบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual)

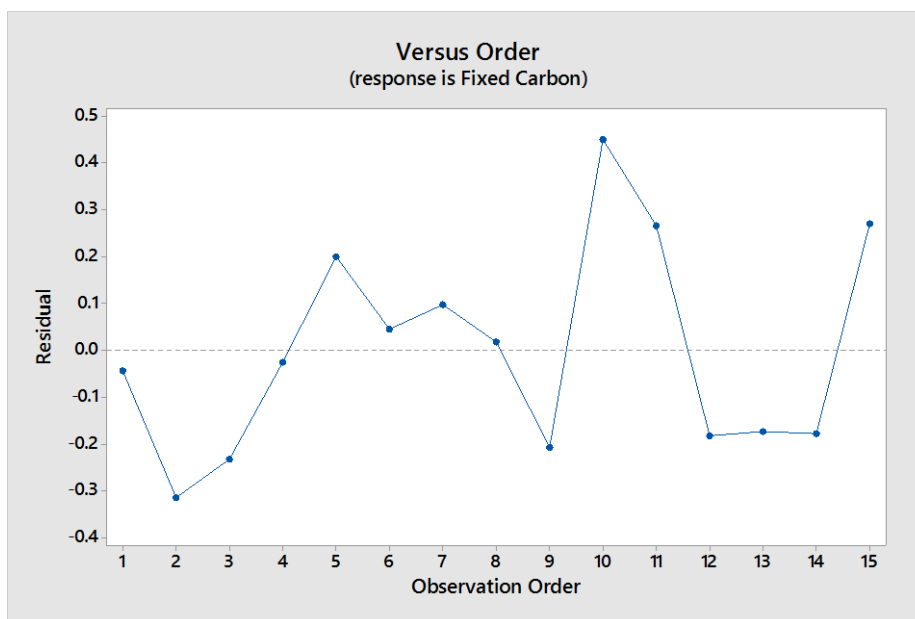
จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.25 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดแนวโน้มของข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.23 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.24 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.25 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของปริมาณคาร์บอนคงตัวใน
เชื้อเพลิงอัดแท่ง

สรุปผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความแปรปรวนคงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน

4.3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างมีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอสฟอรัสที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อพิจารณาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม พบว่าผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง คือ สัดส่วนของกากตะกอนเผาและกากดินฟอสฟอรัส ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 นอกจากนี้ค่า P-value ผลกระทบร่วมของทั้ง 2 ตัวแปรยังมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 อีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลกระทบร่วมของตัวแปรระหว่างสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอสฟอรัสที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวในแท่งเชื้อเพลิง โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า (R^2_{adj}) เท่ากับ ร้อยละ 96.49 และร้อยละ 95.90ตามลำดับ

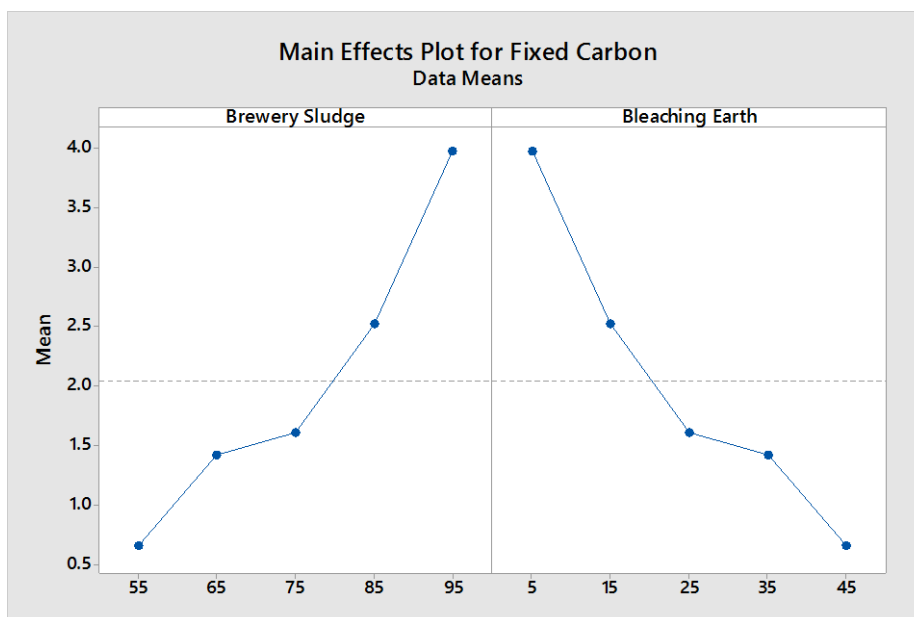
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยมีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีเป็นตัวแปรอิสระ

Term	Coef	SE Coef	P-value	VIF
Brewery Sludge	4.61	0.201	<0.001	6.160
Bleaching Earth	4.47	2.031	<0.001	89.118
Brewery Sludge*Bleaching Earth	-15.17	3.694	0.001	119.058

* หมายถึง Brewery Sludge คือ กากตะกอนเผา และ Bleaching Earth คือ กากดินฟอกสี

S = 0.239 R-sq = 96.49% R-sq(adj) = 95.90%

รูปที่ 4.26 แสดงผลของผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่าปริมาณปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิงอัดแท่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากร้อยละ 55 เป็นร้อยละ 95 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อสัดส่วนของกากดินฟอกสีร้อยละ 5 จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุด ทั้งนี้เพราะกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวมากกว่ากากดินฟอกสี ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจึงเป็นการเพิ่มองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้แก่เชื้อเพลิงอัดแท่งจึงเป็นการเพิ่มช่วงเวลาในการลุกไหม้แก่เชื้อเพลิงอัดแท่ง [33] ส่งผลให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.26 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัว

4.3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่มีผลต่อค่าความร้อน

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้าง (Normal Assumption)

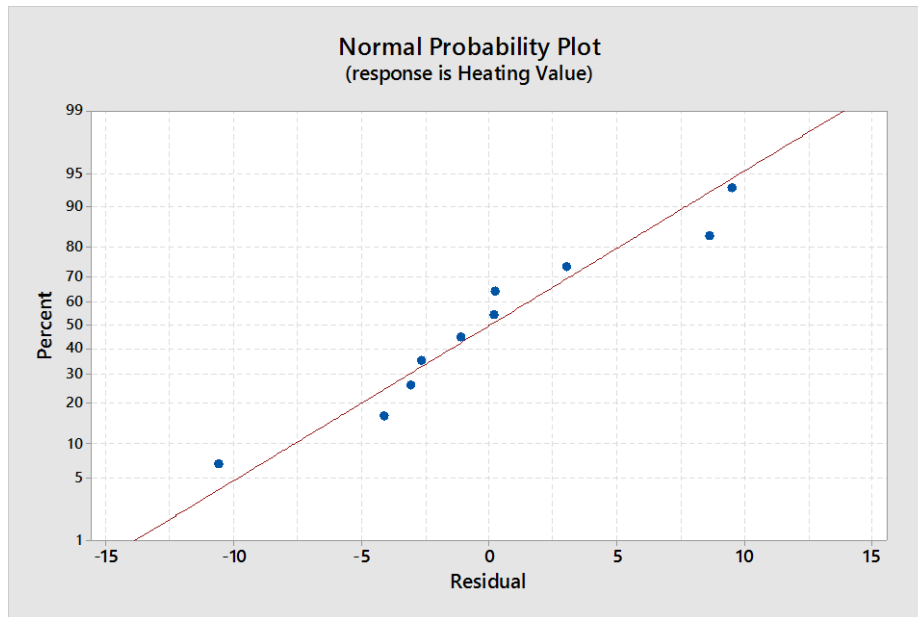
จากการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.27 พบว่าการเรียงตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะค่อนข้างใกล้เคียงเส้นตรง โดยมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.487 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน (Variance Stability)

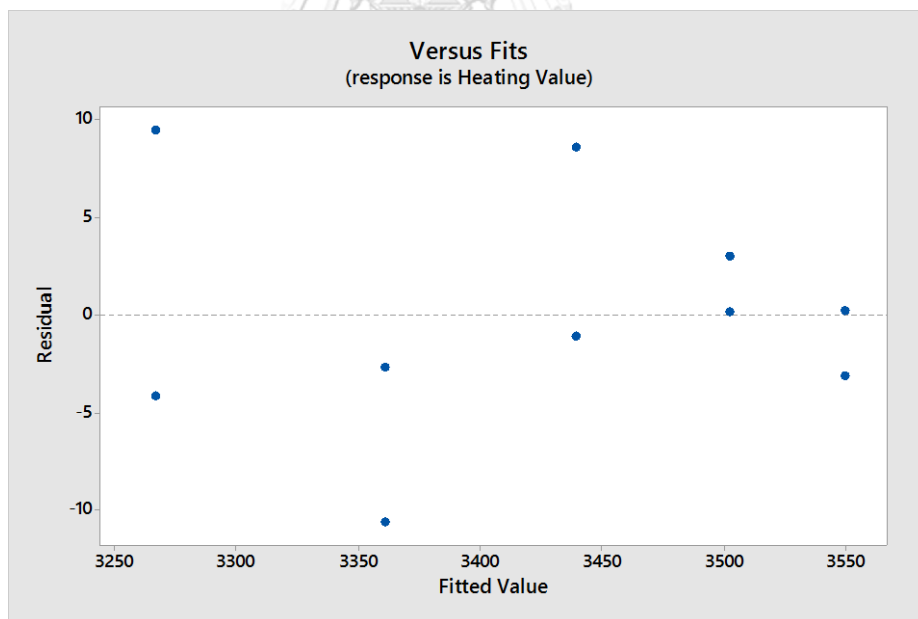
จากการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.28 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดเป็นรูปแบบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual)

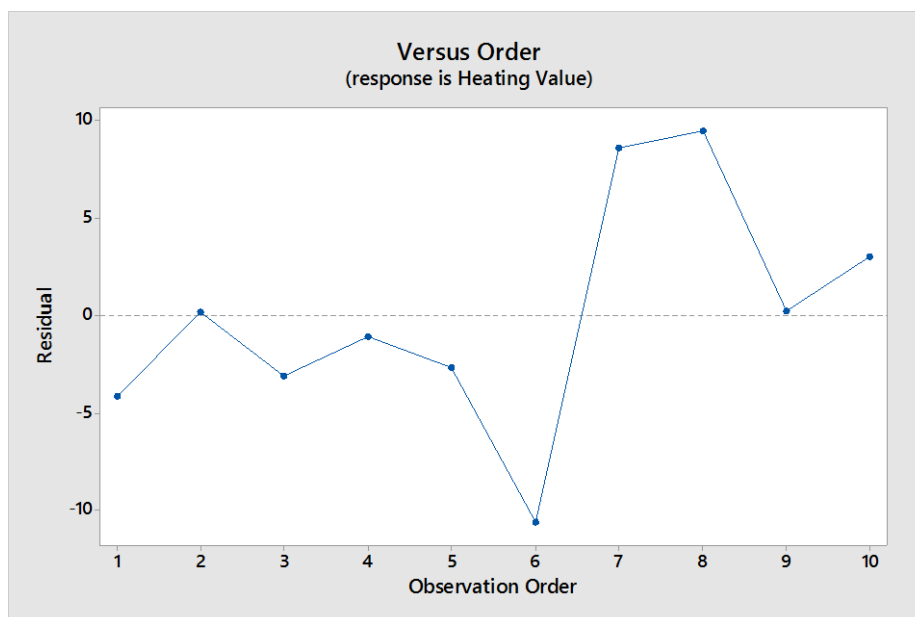
จากการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งดังรูปที่ 4.29 พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวในลักษณะสุ่ม และไม่เกิดแนวโน้มของข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.27 ผลของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของส่วนตกค้างของค่าความร้อน
ในเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.28 ผลของการตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของค่าความร้อน
ในเชื้อเพลิงอัดแท่ง



รูปที่ 4.29 ผลของการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัด
แท่ง

สรุปผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความแปรปรวนคงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามสมมติฐาน

4.3.3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่มีผลต่อค่าความร้อน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างมีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เมื่อพิจารณาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม พบว่าผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่ง คือ สัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสี ซึ่งมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 นอกจากนี้ค่า P-value ผลกระทบร่วมของทั้ง 2 ตัวแปรยังมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 อีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าผลกระทบร่วมของตัวแปรระหว่างสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีมีอิทธิพลต่อค่าความร้อนในแท่งเชื้อเพลิง โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า (R^2_{adj}) เท่ากับ ร้อยละ 99.69 และร้อยละ 99.60 ตามลำดับ

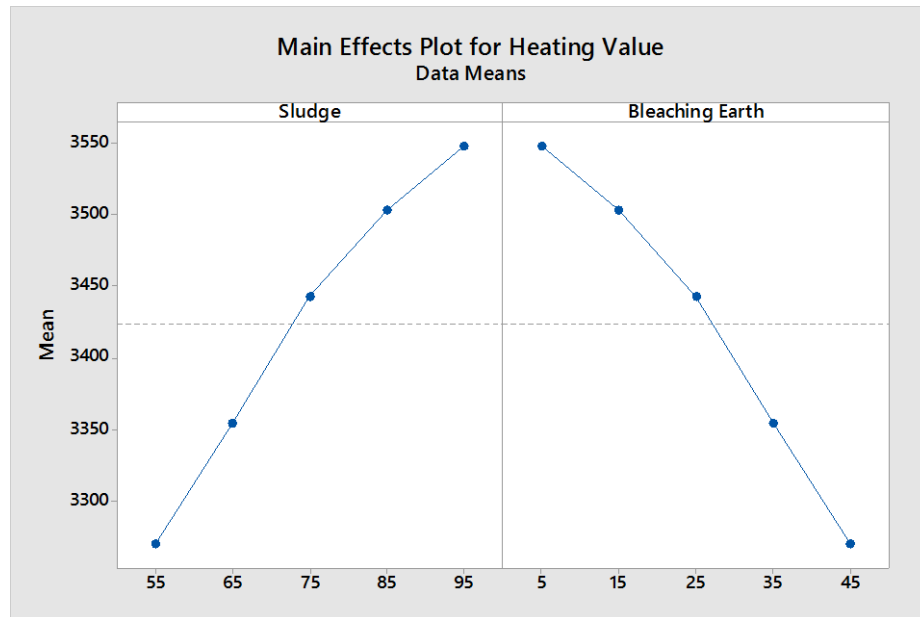
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยมี สัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีเป็นตัวแปรอิสระ

Term	Coef	SE Coef	P-value	VIF
Brewery Sludge	3567.5	6.951	<0.001	6.160
Bleaching Earth	2476.2	70.246	<0.001	89.118
Brewery Sludge*Bleaching Earth	770.5	127.728	0.001	119.058

* หมายเหตุ Brewery Sludge คือ กากตะกอนเผา และ Bleaching Earth คือ กากดินฟอกสี

S = 6.759 R-sq = 99.69% R-sq(adj) = 99.60%

รูปที่ 4.30 แสดงผลของผลกระทบหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อน พบว่า ปริมาณค่าความร้อนในเชื้อเพลิงอัดแท่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากร้อยละ 55 เป็นร้อยละ 95 โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีสัดส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ร้อยละ 95 ต่อสัดส่วนของกากดินฟอกสีร้อยละ 5 จะมีค่าความร้อนมากที่สุด ทั้งนี้เพราะกาก ตะกอนบำบัดน้ำเสียมีค่าความร้อนมากกว่ากากดินฟอกสี ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของกากตะกอน บำบัดน้ำเสียจึงเป็นการเพิ่มช่วงเวลาในการลุกไหม้แก่เชื้อเพลิงอัดแท่ง นอกจากนี้ค่าความร้อนยัง มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคาร์บอนคงตัว กล่าวคือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็น องค์ประกอบในรูปของคาร์บอนหรือสารประกอบคาร์บอนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นเมื่อใน ขั้นตอนการสันดาปจะเกิดการสลายตัวและให้พลังงานความร้อนออกมาจึงส่งผลให้เชื้อเพลิงอัด แท่งมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น [19]



รูปที่ 4.30 ผลของการวิเคราะห์ผลกระทบทหลักของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อน

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	สมบัติเชิงกายภาพ		สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		สมบัติเชิงสีที่เคลือบ (กิโลเมตรต่อทศไมครอน)	
	ความหนาแน่น	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	ค่าความชื้น
เชื้อเพลิง						
มาตรฐาน [19] , [49]	-	< 15	< 70	< 20	> 15	> 3,000
กากตะกอนดิบ	2.73	7.48	57.06	30.96	4.36	3,045
กากตะกอนเผา	-	0.40	41.02	48.57	10.01	3,548
กากดินฟอสซี	2.98	1.44	30.35	65.34	2.66	2,553
กิลเซอรอลดิบ	3.34	-	-	-	-	3,535
เชื้อเพลิงขัดแต่ง ที่อัตราส่วนผสม						
ระหว่างกาก	-	1.89	58.56	35.62	3.97	3,548
ตะกอนเผาและ						
กากดินฟอสซีที่						
95:5						

4.4 การเปรียบเทียบค่าความร้อน

การเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าความร้อนก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุ โดยใช้ค่าความร้อนจากการคำนวณ และหลังทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุ โดยใช้ค่าความร้อนจากการทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนทั้ง 2 ส่วนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

4.6.1 ค่าความร้อนก่อนทำการคาร์บอนไนซ์

ค่าความร้อนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนของกากตะกอนบับัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อกากดินฟอกสีร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง และมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวประสานร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของของผสม ก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุมีค่าความร้อนจากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ค่าความร้อนจากการคำนวณก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุ

วัสดุ	ค่าความร้อนจากการทดลอง ¹ (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ² (กิโลกรัม)	ค่าความร้อนจากการคำนวณ (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
กากตะกอนบับัดน้ำเสีย	3,045	0.73	2,225
กากดินฟอกสี	2,553	0.04	98
กลีเซอรอลดิบ	3,535	0.23	816
รวม		1.00	3,139

* หมายเหตุ ค่าความร้อนจากการทดลอง¹ ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter อัตราส่วนโดยน้ำหนัก² ได้จากการกำหนดให้น้ำหนักโดยรวมของเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็น 1 กิโลกรัม

เมื่อนำค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณก่อนทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัสดุ	อัตราส่วนที่เหมาะสมโดยน้ำหนัก	ค่าความร้อน (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
สุริยา ชัยเดชชยากุล [30]	กากตะกอนน้ำเสียชุมชนและเศษชิ้นไม้สับ	40:60	2,818
กิตติมาและคณะ [32]	กากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมนมและเปลือกกล้วยน้ำว้า	25:75	4,195
Naruebodee และคณะ [45]	กากดินฟอกสี แกลบ และแป้งมันสำปะหลัง	60:20:20	3,800
Sri และคณะ [46]	กากดินฟอกสีและมอลโตเดกตริน	10% ของมอลโตเดกตริน	2,618
Orathai และคณะ [47]	กลีเซอรอลดิบและทางปาล์มน้ำมัน	45% ของกลีเซอรอลดิบ	4,872
Channarong และคณะ [48]	กลีเซอรอลดิบและเปลือกทุเรียน	70:30	4,302
งานวิจัยนี้	กากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมเปียร์ กากดินฟอกสีและกลีเซอรอลดิบ	95:5 กลีเซอรอลดิบ 30% ของของผสม	3,139

จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนประกอบของวัสดุที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์จะมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 2,800 ถึง 4,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยค่าความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงเดียวกับค่าความร้อนที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณในงานวิจัยนี้ คือ 3,139.41 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

4.6.2 ค่าความร้อนหลังทำการคาร์บอนไนซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุ ได้แก่ กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งแล้วจะมีค่าความร้อนจากการทดลองเท่ากับ 3,548.10 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ดังนั้นจึงนำค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณหลังทำการคาร์บอนไนซ์วัสดุกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัสดุ	สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์	ค่าความร้อน (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
เอกลักษณ์ กิติภักดิ์ ถาวร [33]	กากตะกอนน้ำเสีย อุตสาหกรรมเอทานอล และกะละมะพร้าว	720 นาที	4,665
Wilairat และคณะ [43]	กากตะกอนน้ำเสีย อุตสาหกรรมเอทานอล	500 องศาเซลเซียส 60 นาที	5,925
Chao และคณะ [54]	กากตะกอนบำบัดน้ำ เสียชุมชน	200 องศาเซลเซียส 240 นาที	3,604
Daegi และคณะ [55]	กากตะกอนบำบัดน้ำ เสียและถ่านหินฟีด	250 องศาเซลเซียส 60 นาที	6,592
Yousheng และคณะ [56]	กากตะกอนเยื่อกระดาษ	210 องศาเซลเซียส 30 นาที	2,333
Yousheng และคณะ [57]	ขยะชุมชน	280 องศาเซลเซียส 60 นาที	3,695
งานวิจัยนี้	ตะกอนน้ำเสีย อุตสาหกรรมเบียร์ กาก ดินฟอสเฟตและกลีเซอรอล ดิบ	350 องศาเซลเซียส 30 นาที	3,548

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนประกอบของวัสดุที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้ คือ 3,548.10 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนและเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากขยะชุมชน

จากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนประกอบของวัสดุที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์จะให้ค่าความร้อนที่มากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนประกอบของวัสดุที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอัตราส่วนของวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอัตราส่วนของวัสดุสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.1

$$HV_{CAL} = m_{BS}HV_{BS} + m_{BE}HV_{BE} + m_GHV_G \quad (4.1)$$

เมื่อ HV_{CAL} คือ ค่าความร้อนจากการคำนวณของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)

0.7693 คือ ค่าคงที่ในการเปลี่ยนจากร้อยละ 130 เป็นร้อยละ 100

m_{BS} คือ เศษส่วนมวลของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

HV_{BS} คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย หลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,481 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

m_{BE} คือ เศษส่วนมวลของกากดินฟอกสี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

HV_{BE} คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกากดินฟอกสี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,553 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

m_G คือ เศษส่วนมวลของกลีเซอรอลดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 30

HV_G คือ ค่าความร้อนจากการทดลองของกลีเซอรอลดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,535 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

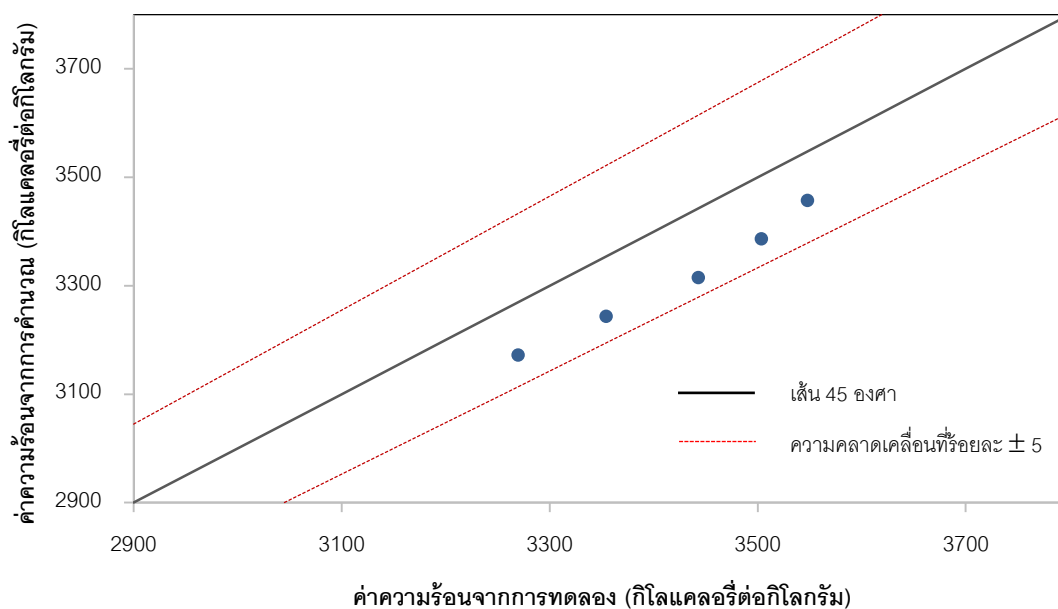
จากการคำนวณค่าความร้อนจากการคำนวณของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากสมการที่ 1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.10 ค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและกากดินฟอกสีต่าง ๆ

สัดส่วนผสมทั้งหมด			ค่าความร้อน	ค่าความร้อน
สัดส่วนผสมรวม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			จากการทดลอง	จากการคำนวณ
กากตะกอนเผา	กากดินฟอกสี	per hundred mixture* กลีเซอรอลดิบ	(กิโลแคลอรีต่อ กิโลกรัม)	(กิโลแคลอรีต่อ กิโลกรัม)
55	45	30	3,270	3,172
65	35	30	3,354	3,243
75	25	30	3,443	3,315
85	15	30	3,504	3,386
95	5	30	3,548	3,457

* หมายเหตุ per hundred mixture* หมายถึง ร้อยละของส่วนผสม (mixture)

mixture หมายถึง ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผากับกากดินฟอกสี



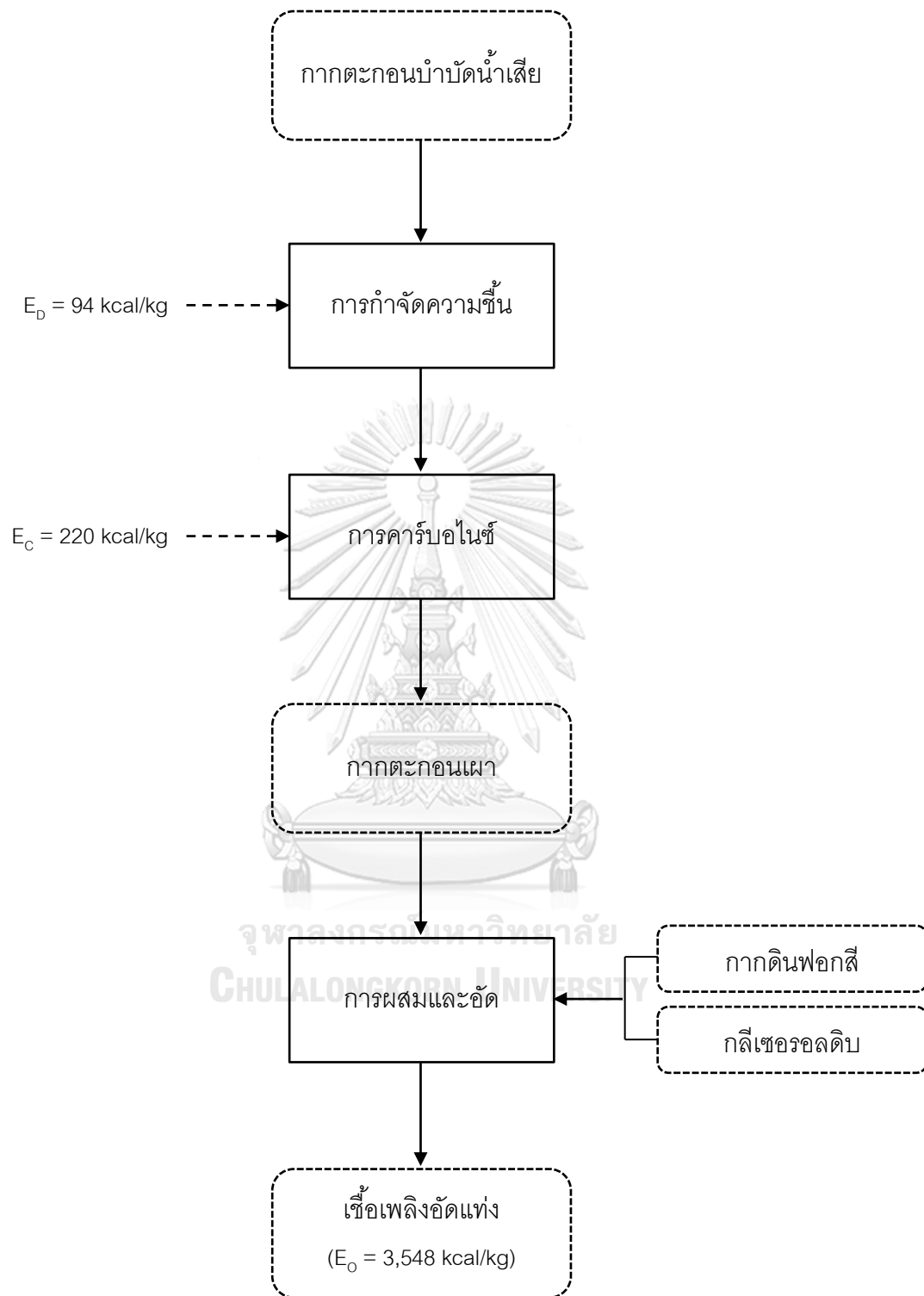
รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการคำนวณกับค่าความร้อนจากการทดลองในอัตราส่วนต่าง ๆ ของวัสดุ

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความร้อนจากการทดลองมีความสัมพันธ์ร่วมกันกับค่าความร้อนจากการคำนวณ ซึ่งอยู่ภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ ± 5 นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้ว่าหากอัตราส่วนของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ กากตะกอนบำบัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อกากดินฟอกสีร้อยละ 5

4.6 ผลการคำนวณผลิตภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การคำนวณพลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการกำจัดความชื้น และส่วนการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.32 โดยจะแสดงเฉพาะอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนเผา กากดินฟอกสี และกลีเซอรอลดิบที่ 95:5:30





รูปที่ 4.32 สมดุลพลังงาน

สัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งในสัดส่วนผสมต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งในกรณีที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

อัตราส่วน BS:BE	E_D (kcal/kg)	E_I (E_D) (kcal/kg)	E_O (kcal/kg)	EP (E_O/E_I)
55:45	94	94	2,988	31.57
65:35	94	94	3,026	31.97
75:25	94	94	3,064	32.38
85:15	94	94	3,102	32.78
95:5	94	94	3,139	33.17

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งในกรณีที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียผ่านการคาร์บอนไนซ์

อัตราส่วน BS:BE	E_D (kcal/kg)	E_C (kcal/kg)	E_I (E_D+E_C) (kcal/kg)	E_O (kcal/kg)	EP (E_O/E_I)
55:45	94	220	314	3,270	10.41
65:35	94	220	314	3,354	10.67
75:25	94	220	314	3,443	10.96
85:15	94	220	314	3,504	11.15
95:5	94	220	314	3,548	11.29

* หมายเหตุ BS คือ กากตะกอนเผา BE คือ กากดินฟอสเฟต GE คือ กลิเซอรอลดิบ
 E_D คือ พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง E_C คือ พลังงานไฟฟ้าในการคาร์บอนไนซ์
 E_I คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย E_O คือ ค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง
 EP คือ ผลิตภาพด้านพลังงาน

จากตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 พบว่าการกำจัดความชื้นจากตะกอนบำบัดน้ำเสีย จะใช้พลังงานไฟฟ้า 94 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยจะเป็นการลดความชื้นจากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากร้อยละ 81.73 เหลือร้อยละ 7.48 และการคาร์บอนไนซ์จากตะกอนบำบัดน้ำเสียจะใช้พลังงานไฟฟ้า 220 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถบอกได้ว่าขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

นอกจากนี้สัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งในแต่ละสัดส่วนการผสมต่าง ๆ มีค่ามากกว่า 1 ทั้งในกรณีที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียผ่านการคาร์บอนไนซ์และไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ นั้นแสดงให้เห็นว่าการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากการตะกอนบำบัดน้ำเสียร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่าในด้านพลังงาน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์ผสมร่วมกับกากดินฟอสเฟตและกลีเซอรอลดิบจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง เพื่อให้ได้ปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

1) จากผลการวิจัยหาช่วงของอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ตั้งแต่ 100 ถึง 700 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงอุณหภูมิที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูง ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 9.42 ± 0.26 โดยน้ำหนัก ถึง 9.58 ± 0.21 โดยน้ำหนัก ดังนั้นขอบเขตของอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส

2) จากผลการวิจัยหาช่วงของเวลาในการคาร์บอนไนซ์ตั้งแต่ 30 ถึง 120 นาที พบว่าช่วงของเวลาที่กากตะกอนบำบัดน้ำเสียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวในระดับสูง ได้แก่ ช่วงเวลา 30 ถึง 90 นาที ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 9.42 ± 0.26 โดยน้ำหนัก ถึง 5.86 ± 0.23 โดยน้ำหนัก ดังนั้นขอบเขตของเวลาในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ 30 ถึง 90 นาที

3) จากผลการวิจัยการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ถึง 90 นาที พบว่า การคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่ร้อยละ 10.01 ± 0.30 โดยน้ำหนัก และให้ค่าความร้อนเท่ากับ $3,480.65 \pm 0.78$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสียดังที่กล่าวมาข้างต้นถือว่าเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง เนื่องจากมีอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์น้อยจึงทำให้ประหยัดพลังงานและเวลา นอกจากนี้กากตะกอนบำบัดน้ำเสียยังมีค่าความร้อนที่มากกว่าเกณฑ์เชื้อเพลิงมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม [19]

4) จากผลการวิจัยหาสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเบียร์และกากดินฟอสเฟตจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยมีกลีเซอรอลดิบเป็นตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของของผสม เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงอัดแท่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูง พบว่า สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักกากตะกอนบำบัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อกากดินฟอสเฟตร้อยละ 5 ให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่ร้อยละ 3.97 ± 0.16 โดยน้ำหนัก

และให้ค่าความร้อนสูงที่สุดที่ $3,548.10 \pm 2.33$ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน [54] และเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากขยะชุมชน [57] นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ยังมีค่าความร้อนมากกว่าเกณฑ์เชื้อเพลิงมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

5) จากการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับอัตราส่วนของวัสดุ พบว่า ค่าความร้อนจากการทดลองมีความสัมพันธ์ร่วมกันกับค่าความร้อนจากการคำนวณ ซึ่งอยู่ภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ ± 5

6) งานวิจัยนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการวิจัยทั้งหมด 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของการลดความชื้นกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและส่วนของการคาร์บอนไนซ์กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย โดยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 94 และ 220 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งเมื่อคำนวณสัดส่วนของพลังงานที่ได้ต่อพลังงานที่ใช้จากการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งพบว่าทุกสัดส่วนมีค่ามากกว่า 10 ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตได้มีความคุ้มค่าในด้านพลังงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้อย่างนี้ผู้วิจัยขอเพิ่มข้อเสนอแนะและประเด็นที่น่าสนใจเพื่อเป็นประโยชน์ในการวิจัยในโอกาสต่อไปเป็น 2 ส่วน ดังนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้อย่างนี้

- 1) ควรมีการศึกษาวิธีลดความชื้นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ ด้วยการนำไปตากแดดอาจจะช่วยให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งลงได้
- 2) ควรมีการศึกษาวิธีการบดย่อยวัสดุแต่ละประเภทให้มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อวัสดุมีความสามารถในการยึดเกาะกันมากขึ้นในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในโอกาสต่อไป

- 1) ควรมีการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 2) ควรมีการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนในวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยในการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งไปใช้งานจริง
- 3) ควรมีการศึกษาต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งสำหรับการผลิตแบบอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

1. ธนาคารแห่งประเทศไทย. เครื่องบ่งชี้การใช้จ่ายเพื่อการอุปโภคบริโภคภาคเอกชน. [cited 2016 24 มกราคม]; Available from: <http://www2.bot.or.th/statistics/ReportPage.aspx?reportID=108>.
2. Kanagachandran K. and Jayaratne R., *Utilization potential of brewery waste water sludge as an organic fertilizer*. Journal of the Institute of Brewing, 2006. 112(2): p. 92-96.
3. ศิริกานต์ สัตตวิชัยพิชญ์, เทคโนโลยีการกลั่นน้ำมันปาล์มบริโภค. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 2558. 77: p. 13-20.
4. กษิรา ไสภณพงษ์, นิภารัตน์ มีวรรณะ, and พิระพงษ์ เลิศเมธา, การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำสาร ฟอสฟอรัสใช้แล้วของอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มกลับไปใช้ประโยชน์ในลักษณะของอิฐดินปูนซีเมนต์และเชื้อเพลิงแท่ง. โครงการปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
5. วรินทร์ กิตติธรรมวงศ์, et al., การสกัดน้ำมันปาล์มที่ตกค้างจากกากดินฟอสฟอรัสด้วยสารละลายสารลดแรงตึงผิว. นเรศวรวิจัย, 2559. 12: p. 397-407.
6. Thompson J. C. and He B. B., *Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks*. Applied Engineering in Agriculture, 2006. 22(2): p. 261-265.
7. กรสรวง หิรัญเมธากิจ, การสื่อสารการตลาดเครื่องมือแอลกอฮอล์ในลานเบียร์กับการปฏิบัติภายใต้ พระราชบัญญัติควบคุมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ พ.ศ. 2551. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิเทศศาสตร์ คณะนิเทศศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
8. มาร์เก็ตพลัส. 'ไฮเนเก้น-ไทเกอร์-เชียร์' จัดทัพบุกตลาดเบียร์ไทย. 2559 [cited 2560 12 กุมภาพันธ์]; Available from: <http://www.marketplus.in.th/content/detail.php?id=5>.
9. บริษัท บุญรอด บริวเวอรี่ จำกัด. ขั้นตอนการผลิต. [cited 2560 16 กุมภาพันธ์]; Available from: <https://www.boonrawd.co.th/th/boonrawd-brewery-products-brewing-process.php>.

10. Zvauya R., Parawira W., and Mawadza C., *Aspects of aerobic thermophilic treatment of Zimbabwean traditional opaque-beer brewery wastewater*. Bioresource Technology, 1994. **48**(3): p. 273-274.
11. Adesoji T. J. and Joseph K. B., *Treatment technology for brewery wastewater in a water-scarce country: A review*. South African Journal of Science, 2016. **112**(3-4): p. 1-8.
12. Abimbola M. E., et al., *Characterization of brewery wastewater composition*. International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 2015. **9**(9): p. 1073-1076.
13. ศิววรรณ พูลพันธุ์, การผลิตโปรตีนจากเซลล์ด้วยกระบวนการตะกอนเร่ง ที่มีอัตราสูงจากน้ำทิ้งโรงงานเบียร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
14. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, ระบบบำบัดมลพิษน้ำ. 2545, กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
15. บริษัท บุญรอด บริวเวอรี่ จำกัด. ระบบบำบัดน้ำทิ้ง. [cited 2560 16 กุมภาพันธ์]; Available from: <https://www.boonrawd.co.th/th/boonrawd-brewery-commitment-environment.php>.
16. วิชาการ.คอม. ว่าด้วยเรื่องของเบียร์. [cited 2560 18 กุมภาพันธ์]; Available from: <http://www.vcharkarn.com/blog/37836>.
17. ชันัญญา หาวารี, การประเมินศักยภาพการนำกากตะกอนอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ โดยการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
18. Sandhya B., Jenjira S., and Athapol P., *Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land application*. International Journal of Environmental Science and Technology, 2009. **6**(1): p. 131.
19. ชาญวิทย์ โมรารัตน์, ป.บ. อธิราภรณ์ ศรีมันตะ, and เพ็ญนภา ประกิจ, การนำตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2554.

20. สุเทพ สิริวิทยาปกรณ, เทคโนโลยีน้ำเสีย. 2549: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
21. จักรพงษ์ ไชยบุรี, การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา *Sodium Hydrogen Tartrate (C4H5NaO6)*. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 2556. 18(1): p. 49-55.
22. ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, การควบคุมคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล. กรมวิทยาศาสตร์บริการ., 2550.
23. พิศมัย เจนวนิชปัญญกุล and ลลิตา อัดทนโถ, รอบรู้...เรื่องราวไบโอดีเซล. 2549, ปทุมธานี: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
24. ภัทรติกรณ รัชชศักดิ์ศรี, การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
25. เฉลิมขวัญ สุทธิศักดิ์ภักดี and อติวิศว์ ศิริฐานนท์, การสกัดแคโรทีนอยด์จากดินฟอกสีที่ดูดซับไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มดิบโดยวิธีการสกัดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
26. สมาลัย ศรีกำไลทอง, et al., การผลิตดินฟอกสี. 2524, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
27. Sam H. P., *Fuller's earth and other industrial mineral resources of the Meigs-Attapulcus-Quincy District, Georgia and Florida*. 1974, USGPO.
28. ชนกพร วงษ์วัน, การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับ ของเสี้ยกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
29. สุวานิสรา ชูชัย, ผลิตภัณฑ์จากแกซีฟิเคชันของกากกะลาปาล์มผสมกลีเซอรอลดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
30. สุรียา ชัยเดชทยากุล, การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชา

- เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2544.
31. อรรถกร ฤกษ์วีร์, เชื้อเพลิงแข็งจากขยะมูลฝอยชุมชนอัดแท่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2529.
 32. กิตติมา มหาพราหมณ์, สิริมา มงคล, and เบญจพล กวีคงคา, การนำกากตะกอนของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตนมมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง กรณีศึกษา: บริษัท ฟริสแลนด์คัมพิน่า เฟรช (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2555.
 33. เอกลักษณ์ กิติภักดิ์ถาวร, เชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลและตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
 34. สุพัฒตรา ส่งเสริม, การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบด้วยวิธีการอัด แบบเอ็กทรูชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
 35. อัษฎรัตน์ กันดอก, ผลของแกมมาอะลูมินาต่อคาร์บอนในเซชันกะลาปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2556.
 36. ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
 37. นภัตสวรรค์ ไอสถศิลป์, การออกแบบการทดลอง. เอกสารประกอบการสอนวิชาการปรับปรุงคุณภาพ, 2559.
 38. Douglas C. M., *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley.
 39. อรวรรณ พรรณบัวหลวง, การออกแบบการทดลองแบบผสมเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตทินเนอร์สำหรับพ่นสีรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.

40. ศกลธน ราโชภาณูจน์, สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการฟื้นผิวตอบสนอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
41. ภูมินทร์ แจ่มเชื้อ, การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
42. United Fire Brigades' Association of New Zealand. *Calculation of electrical energy*. Available from: <http://www.ufba.org.nz/images/documents/calculationofelectricalenergy.pdf>.
43. Walairat U. and Tharapong V., *Production of Smokeless Briquette Charcoals from Wet Cake Waste of Ethanol Industry*. Engineering Journal, 2012. 16(2).
44. ธนาพล ต้นดีสัตยกุล, et al., การศึกษาความเหมาะสมการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกสับปะรด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2558. 23(5): p. 754-773.
45. Naruebodee S., et al. *Fuel briquette made of biomass mixed with residual bleaching earth from palm oil plant*. in the XVI TSAE National Conference and the VIII TSAE International Conference. 2015. Bangkok.
46. Sri S., Nur H., and Sieni W., *Physical properties characterization of fuel briquette made from spent bleaching earth*. Biomass and Bioenergy, 2011. 35(10): p. 4209-4214. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
47. Orathai C., Maneerat O., and Krittiporn T., *Production of pelletized fuel from biodiesel-production wastes: oil palm fronds and crude glycerin*. Engineering Journal, 2013. 17(4).
48. Channarong A. and Malee S., *A feasibility study on production of solid fuel from glycerol and agricultural wastes*. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 2010. 1(1): p. 43-51.
49. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. 2555, กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็มเอสเอ็นจีเนียร์ริง.

50. Shrikalaa K., Yvan G., and GS Vijaya R., *Optimization and characterization of hydrochar produced from microwave hydrothermal carbonization of fish waste*. Waste Management, 2017. **65**: p. 159-168.
51. Beiping Z., et al., *Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace*. International Journal of Hydrogen Energy, 2011. **36**(1): p. 355-363.
52. Haoran Y., et al., *Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015. **112**: p. 284-289.
53. Haoran Y., et al., *Influence of temperature on product distribution and biochar properties by municipal sludge pyrolysis*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2013. **15**(3): p. 357-361.
54. Chao H., Apostolos G., and Jing-Yuan W., *Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: hydrochar fuel characteristics and combustion behavior*. Applied Energy, 2013. **111**: p. 257-266.
55. Daegi K., Seyong P., and Ki Young P., *Upgrading the fuel properties of sludge and low rank coal mixed fuel through hydrothermal carbonization*. Energy, 2017. **141**: p. 598-602.
56. Yousheng L., et al., *Effect of hydrothermal carbonization temperature on combustion behavior of hydrochar fuel from paper sludge*. Applied Thermal Engineering, 2015. **91**: p. 574-582.
57. Yousheng L., et al., *Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes*. Fuel, 2016. **181**: p. 905-915.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพ

การวิเคราะห์ความหนาแน่นบรรจุ (Bulk Density) (ASTM E 873-82)

วิธีการคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นบรรจุ} = \frac{\text{มวลของวัสดุ (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของภาชนะ (ลิตร)}} \quad (\text{ก.1})$$

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนาแน่นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนการอบแห้ง

ครั้งที่	ปริมาตร (ลิตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลิตร)
1	1	2.91	2.91
2	1	2.90	2.90
3	1	2.90	2.90
เฉลี่ย		2.90	2.90

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความหนาแน่นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ครั้งที่	ปริมาตร (ลิตร)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลิตร)
1	1	2.72	2.72
2	1	2.74	2.74
3	1	2.74	2.74
เฉลี่ย		2.73	2.73

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีแบบประมาณ

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

วิธีวิเคราะห์

1. อุ่นเตาเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
2. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้แห้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
3. ชั่งกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง
4. อบสารจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และคำนวณปริมาณความชื้นในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

วิธีการคำนวณ

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

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

วิธีวิเคราะห์

1. เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง
3. เผากากตะกอนบำบัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาให้ปิดฝาถ้วยกระเบื้อง) ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น คำนวณปริมาณสารระเหยในกากตะกอนบำบัดน้ำเสีย

วิธีการคำนวณ

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

3. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) (ASTM D 3174-95)

วิธีวิเคราะห์

1. เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. ชั่งกากตะกอนบับัดน้ำเสียหนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง

3. เผากากตะกอนบับัดน้ำเสียที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (เปิดฝาถ้วยกระเบื้องขณะเผา) คำนวณปริมาณเถ้าในกากตะกอนบับัดน้ำเสีย

วิธีการคำนวณ

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

4. การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} &\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} \\ &= 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสารระเหย}) \quad (\text{ข.4}) \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมบัติเชิงเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) (ASTM D 5865-13)

สารเคมี

1. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
2. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange)

วิธีการวิเคราะห์

1. ตัดลวด (Fuse wire) ยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งเหล็กด้านล่างของฝาบอมบ์
2. ใส่เชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ประมาณ 1 กรัมลงในถ้วย
3. วางถ้วยบนช่วงปลายเหล็กด้านฝาบอมบ์ จัดลวดให้สัมผัสตัวอย่าง เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิเมตรลงในถ้วย
4. ประกอบฝาบอมบ์กับถ้วยบอมบ์ นำไปอัดออกซิเจนให้ได้ความดันประมาณ 30 บรรยากาศ นำไปวางในถังบรรจุบอมบ์
5. ใส่น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิประมาณ 24 องศาเซลเซียสปริมาณ 2 ลิตร ลงในถัง (Bucker) เสียบสายไฟที่ใช้ในการจุดระเบิด 2 เส้น เข้ากับถ้วยบอมบ์ แล้วปิดฝาเครื่อง
6. เปิดสวิตช์ อ่านอุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุบอมบ์กับน้ำที่อยู่ในตัวหุ้ม (Jacket) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ จึงยุติการทดลอง
7. นำถ้วยบอมบ์ออก ปล่อยให้ก๊าซออกจากถ้วยบอมบ์อย่างช้า ๆ
8. ล้างฝาบอมบ์และถ้วยที่อยู่ในบรรจุเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยน้ำกลั่น
9. วัดความยาวลวดที่เหลือ แล้วป้อนค่าเข้าสู่เครื่อง เครื่องจะทำการคำนวณแล้วพิมพ์ค่าความร้อนของตัวอย่างออกมาทางเครื่องพิมพ์

ภาคผนวก ง

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในการวิจัย

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในการลดความชื้นของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียก่อนการอบแห้ง

กำหนดให้

- เตาอบมีกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.4 แอมแปร์
- เตาอบมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 230 โวลต์
- เตาอบมีประสิทธิภาพการใช้งานร้อยละ 60
- เตาอบมีความจุร้อยละ 60 ของความจุรวม (30 ลิตร)
- เตาอบมีการใช้งาน 12 ชั่วโมง
- เตาอบมีการใช้งานที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- เตาอบมีอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที
- ความหนาแน่นของกากตะกอนดิบก่อนอบแห้งเท่ากับ 2.90 กิโลกรัมต่อลิตร
- 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงเท่ากับ 859.85 กิโลแคลอรี

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{ความจุของเตาอบ} &= \text{ร้อยละของความจุรวม} \times \text{ความหนาแน่น} \times \text{ความจุของเตาอบ} \\
 &= 0.60 \times 2.90 \times 30 \\
 &= 52.22 \text{ กิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \text{กระแสไฟฟ้า} \times \text{แรงดันไฟฟ้า} \times \text{ประสิทธิภาพ} \\
 &= 3.4 \times 230 \times 0.60 \\
 &= 469.20 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้า} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{เวลา} \\
 &= 469.20 \times (12.00 + 0.25) \\
 &= 5,747.7 \text{ วัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= 5.75 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\
 &= 4,942.13 \text{ กิโลแคลอรี} \\
 &= 94.64 \text{ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม}
 \end{aligned}$$

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในการคาร์บอนไอซ์ของกากตะกอนบำบัดน้ำเสียหลังการอบแห้ง

- กำหนดให้
- เตาเผามีกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 15.2 แอมแปร์
 - เตาเผามีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 โวลต์
 - เตาเผามีประสิทธิภาพการใช้งานร้อยละ 60
 - เตาเผามีความจุร้อยละ 60 ของความจุรวม (9 ลิตร)
 - เตาเผามีการใช้งาน 0.5 ชั่วโมง
 - เตาเผามีการใช้งานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส
 - เตาเผาใช้อัตรการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
 - ความหนาแน่นของกากตะกอนดิบหลังอบแห้งเท่ากับ 2.73 กิโลกรัมต่อลิตร
 - 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงเท่ากับ 859.85 กิโลแคลอรี

วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ความจุของเตาเผา} &= \text{ร้อยละของความจุรวม} \times \text{ความหนาแน่น} \times \text{ความจุของเตาเผา} \\ &= 0.60 \times 2.73 \times 9 \\ &= 14.76 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า} &= \text{กระแสไฟฟ้า} \times \text{แรงดันไฟฟ้า} \times \text{ประสิทธิภาพ} \\ &= 15.2 \times 400 \times 0.60 \\ &= 3,648.00 \text{ วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า} &= \text{กำลังไฟฟ้า} \times \text{เวลา} \\ &= 3,648.00 \times (0.50 + 0.53) \\ &= 3,769.60 \text{ วัตต์-ชั่วโมง} \\ &= 3.77 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \\ &= 3,241.27 \text{ กิโลแคลอรี} \\ &= 210.58 \text{ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม} \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปริญญารัฐ หนูสงค์ เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนราธิวาส จังหวัดนราธิวาส จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อจนสำเร็จ การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY