

การผลิตแห่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบด้วยวิธีการอัดแบบเอ็กทรูชัน



นางสาวสุพัฒตรา ส่งเสริม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF BRIQUETTES FROM SEWAGE SLUDGE AND RICE HUSK USING EXTRUSION
METHOD

Miss Supattra Songserm



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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับ แกลบด้วยวิธีการอัดแบบเอ็กทรูชัน |
| โดย | นางสาวสุพัฒตรา ส่งเสริม |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ |

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ชูตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุทธรังษี)

สุพัฒตรา ส่งเสริม : การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบด้วยวิธีการอัดแบบเอ็กทรูชัน (FABRICATION OF BRIQUETTES FROM SEWAGE SLUDGE AND RICE HUSK USING EXTRUSION METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. จรุศ ศรีสติธย์, 145 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบ โดยมีแ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานด้วยวิธีการอัดแบบเอ็กทรูชัน (Extrusion) โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยมีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน รวมถึงระบบที่กำลังก่อสร้างเป็นจำนวนมากทำให้เกิดของเสียจากระบบบำบัดเหล่านี้ หรือ กากตะกอนน้ำเสียในปริมาณมาก อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการปลูกข้าวเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวในปริมาณมาก เช่น แกลบ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาแกลบมาผสมกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเพื่อผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน และลดอัตราการบำบัดกากตะกอนที่ออกจากระบบบำบัด รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสานเพื่อหาสัดส่วนที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงสุด ในส่วนที่สองเป็นการหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงสูง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาให้น้อยที่สุดเพื่อเป็นการลดพลังงานและเวลาในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง จากงานวิจัยพบว่าสัดส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสานที่ทำให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุด คือ สัดส่วน 5 : 4 : 1 ตามลำดับ ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงสุดที่ 0.8337 เมกะปาสคาล โดยมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ร้อยละ 71.95 โดยมีปริมาณความชื้นและเถ้าต่ำสุดที่ร้อยละ 1.92 และร้อยละ 48.30 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวมและของแข็งระเหยง่ายสูงสุดที่ร้อยละ 98.08 และร้อยละ 50.05 ตามลำดับ จากผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเอาแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนไปใช้ในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5587247020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: SEWAGE SLUDGE / FUEL BRIQUETTES / EXTRUSION

SUPATTRA SONGSERM: FABRICATION OF BRIQUETTES FROM SEWAGE SLUDGE AND RICE HUSK USING EXTRUSION METHOD. ADVISOR: ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 145 pp.

This research is to study of briquettes from sewage sludge and rice husk using extrusion method. At present, Thailand has a lot wastewater treatment and Thailand is an agricultural country. The agricultural waste such as rice husks after harvest in large quantities. This research has taken rice husk mixed with sewage sludge to produce fuel briquettes for reducing sludge treatment and adding value to agricultural waste materials. The experiments were carried out into two parts. The first one was study the ratio of the sewage sludge, rice husk and binder from starch of cassava that gave the higher compressive strength of briquettes must be had the highest weight of sewage sludge but the weight for rice husk and binder was low. The second one was study about temperature and time of carbonization that gave the briquettes had heating value and percent yield were high, and the carbonization must be used lowest temperature and the time for saving energy. The results showed that the appropriate in ratio of sewage sludge, rice husk and binder by weight was 5 : 4 : 1. This ratio was give the highest compressive strength was 0.8337 MPa. And the appropriate of carbonization temperature was 300 degree Celsius and the time was 60 minute. That gave the briquettes has heating value 4,604.82 kcal/kg. and percent yield at 71.95 % , the moisture content and ash content were low at 1.92 % and 48.30 %. But the total solid and volatile solids were high at 98.08 % and 50.05 %. From the optimum condition for fuel briquettes produced from sewage sludge and rice husk using Response Surface Methodology (RSM). It was found that briquettes had the potential that could be developed for households and small industries.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature

Academic Year: 2015 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่กรุณาใช้เวลาในการให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ คอยชี้แนะแนวทาง และแก้ไขปัญหาจุดบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนสุดท้าย สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นประโยชน์ต่อศิษย์มาก และทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีขอกราบขอบพระคุณ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุทธวงษ์ ที่กรุณาใช้เวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา และคำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย ณ ศูนย์การเรียนรู้ภูมิภาคแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี และคุณสิริชัย รัตนวราหะ ผู้จัดการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล รวมถึงพี่ ๆ ทีมงานที่ให้ความรู้ ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ และคอยให้ความช่วยเหลือในการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

ขอขอบคุณสำนักงานการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร และโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ที่อนุเคราะห์หากตะกอนน้ำเสียชุมชนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ธนพั้ง ราโชภาณูจน์ และนางสาวศกกลธน ราโชภาณูจน์ที่ให้คำปรึกษาคำแนะนำทางด้านสถิติ และคอยให้ความช่วยเหลือตลอดมาในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณบิดา - มารดาที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และสนับสนุนด้านการศึกษาของลูกเสมอมา ขอขอบพระครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และพี่ ๆ ธุรการชั้น 17 ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญรูป | ฎ |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 สมมุติฐาน | 2 |
| 1.4 แนวคิด เหตุผลและทฤษฎี..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย | 3 |
| 1.5.1 พื้นที่ศึกษา..... | 3 |
| 1.5.2 ตัวแปร..... | 3 |
| 1.5.3 ระยะเวลาที่ศึกษา..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... | 4 |
| 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานคร..... | 4 |
| 2.2 รายละเอียดโรงควบคุมคุณภาพน้ำแต่ละแห่งในกรุงเทพมหานคร | 5 |
| 2.2.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา..... | 5 |
| 2.2.2 โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ | 5 |
| 2.2.3 โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี | 5 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม | 6 |
| 2.2.5 โรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ..... | 6 |
| 2.2.6 โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง | 6 |
| 2.2.7 โรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร | 6 |
| 2.3 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม..... | 7 |
| 2.3.1 สถานที่ตั้ง..... | 7 |
| 2.3.2 รายละเอียดกระบวนการบำบัดน้ำเสีย | 8 |
| 2.4 กากตะกอนน้ำเสีย..... | 9 |
| 2.4.3 การจัดการกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 13 |
| 2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเชื้อเพลิงและชีวมวล | 14 |
| 2.5.1 เชื้อเพลิง..... | 14 |
| 2.5.2 ชีวมวล..... | 14 |
| 2.6 แกลบ..... | 16 |
| 2.6.1 ลักษณะภายนอกและองค์ประกอบของแกลบ | 16 |
| 2.6.2 การนำแกลบไปใช้ประโยชน์ | 17 |
| 2.7 เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Fuel Briquettes)..... | 20 |
| 2.8 การอัดแท่งเชื้อเพลิง..... | 21 |
| 2.8.1 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง | 21 |
| 2.8.2 การอัดแท่งเชื้อเพลิง | 22 |
| 2.8.3 การตากแห้งแท่งเชื้อเพลิง..... | 23 |
| 2.8.5 คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง | 24 |
| 2.9 การเผาแท่งเชื้อเพลิงให้เป็นถ่าน..... | 25 |
| 2.9.1 การเผาให้เป็นถ่านหรือกระบวนการคาร์บอนิเซชัน (Carbonization)..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 2.9.2 คุณภาพของถ่าน..... | 26 |
| 2.9.3 การใช้ประโยชน์จากถ่าน (Use of charcoal)..... | 27 |
| 2.10 เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)..... | 28 |
| 2.10.2 เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)..... | 28 |
| 2.10.3 การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD)..... | 29 |
| 2.10.4 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)..... | 31 |
| 2.10.5 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย..... | 31 |
| 2.10.6 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลอง..... | 32 |
| 2.10.7 การตรวจสอบความเหมาะสมแบบจำลองการถดถอย..... | 33 |
| 2.10.8 การทดสอบและยืนยันผล..... | 34 |
| 2.11 การประเมินราคาต้นทุนในการผลิตแก่งเชื้อเพลิง..... | 35 |
| 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 35 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 42 |
| 3.1 รูปแบบการวิจัย..... | 42 |
| 3.2 แผนการทดลอง..... | 42 |
| 3.2.2 ตอนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น..... | 43 |
| 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 45 |
| 3.4.2 ตอนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น..... | 46 |
| 3.6 ประเมินราคาต้นทุน..... | 51 |
| 3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง..... | 51 |
| 3.8 ผังการทำวิจัย..... | 52 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 53 |
| 4.1 การทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแก่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman..... | 53 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลเพื่อหาปริมาณสัดส่วนของแก๊งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง..... | 57 |
| 4.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 57 |
| 4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 59 |
| 4.2.3 การทดสอบยืนยันผลการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 64 |
| 4.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติค่าความทนแรงอัดของแก๊งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 65 |
| 4.3 การทดลองหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนซ์แก๊งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman..... | 73 |
| 4.4 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนซ์แก๊งเชื้อเพลิงที่ทำให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแก๊งเชื้อเพลิง..... | 77 |
| 4.4.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนซ์แก๊งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 77 |
| 4.4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแก๊งเชื้อเพลิงและผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแก๊งเชื้อเพลิง..... | 78 |
| 4.4.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนซ์แก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 83 |
| 4.4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าพลังงานความร้อนของแก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 85 |
| 4.4.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแก๊งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน..... | 93 |
| 4.4.6 การตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.7 ประเมินต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน | 104 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 108 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 108 |
| 5.1.1 การทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแห่งเชื้อเพลิง | 108 |
| 5.1.2 การทดลองหาช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห่งเชื้อเพลิง | 108 |
| 5.1.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน | 109 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย | 109 |
| รายการอ้างอิง | 110 |
| ภาคผนวก ก ลักษณะแห่งเชื้อเพลิง | 117 |
| ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ | 130 |
| ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ | 136 |
| ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ | 141 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 145 |

สารบัญรูป

| | |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 แนวความคิดการวางท่อระบายน้ำและท่อค้ำน้ำเสีย..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 (1),(2) ระบบบำบัดชีวภาพแบบตะกอนเร่ง | 7 |
| รูปที่ 2.3 การบำบัดกากตะกอน | 11 |
| รูปที่ 2.4 ลักษณะภายนอกของแกลบ | 16 |
| รูปที่ 2.5 แท่งเชื้อเพลิงเขียวที่อัดจากแกลบ | 20 |
| รูปที่ 2.6 ถ่านอัดแท่ง | 21 |
| รูปที่ 2.7 องค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนของ CCD สำหรับการทดลองที่ 2 ปัจจุบัน | 30 |
| รูปที่ 2.8 การออกแบบ CCD สำหรับการทดลอง 3 ปัจจุบัน | 30 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง | 43 |
| รูปที่ 3.2 (1), (2) ตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิง | 47 |
| รูปที่ 3.3 ลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน | 48 |
| รูปที่ 3.4 การเรียงแท่งเชื้อเพลิงในหม้อดินเผา | 49 |
| รูปที่ 3.5 การใส่หม้อดินเผาที่บรรจุแท่งเชื้อเพลิงแล้วในเตาเผา..... | 50 |
| รูปที่ 4.1 การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง | 56 |
| รูปที่ 4.2 ผลการทำนายสัดส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและแกลบที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมี ค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ..... | 60 |
| รูปที่ 4.3 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและแกลบที่ทำให้ แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot) | 61 |
| รูปที่ 4.4 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแกลบและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมี ค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ..... | 61 |
| รูปที่ 4.5 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแกลบและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมี ค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot) | 62 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.6 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตัวประสานที่ทำให้ ให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ | 62 |
| รูปที่ 4.7 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตัวประสานที่ทำให้ ให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นคาร์ระดับ (Contour plot) | 63 |
| รูปที่ 4.8 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการ ถดถอย | 70 |
| รูปที่ 4.9 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง .. | 71 |
| รูปที่ 4.10 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา | 72 |
| รูปที่ 4.11 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง | 72 |
| รูปที่ 4.12 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง..... | 73 |
| รูปที่ 4.13 การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่าอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง .. | 76 |
| รูปที่ 4.14 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน สูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ..... | 81 |
| รูปที่ 4.15 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน สูงแบบเส้นคาร์ระดับ (Contour plot) | 81 |
| รูปที่ 4.16 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ ของแท่งเชื้อเพลิงสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ | 82 |
| รูปที่ 4.17 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ ของแท่งเชื้อเพลิงสูงแบบเส้นคาร์ระดับ (Contour plot) | 82 |
| รูปที่ 4.18 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการ ถดถอย | 90 |
| รูปที่ 4.19 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่า คาดหวัง | 90 |
| รูปที่ 4.20 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา | 91 |
| รูปที่ 4.21 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง | 92 |
| รูปที่ 4.22 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| รูปที่ 4.23 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตักกับค่าประมาณการ ถดถอย | 98 |
| รูปที่ 4.24 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตักที่เรียงลำดับคู่กับค่า คาดหวัง | 99 |
| รูปที่ 4.25 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา | 100 |
| รูปที่ 4.26 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง | 100 |
| รูปที่ 4.27 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง..... | 101 |



สารบัญตาราง

| | | |
|---------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | โรงควบคุมคุณภาพน้ำในกรุงเทพมหานคร | 5 |
| ตารางที่ 2.2 | คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร..... | 15 |
| ตารางที่ 2.3 | การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2551 - 2556 (หน่วย: พันตันเทียบ น้ำมันดิบ)..... | 18 |
| ตารางที่ 2.4 | ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2556 | 18 |
| ตารางที่ 2.5 | คุณสมบัติของฟืนอัดแท่งจากวัสดุต่าง ๆ | 19 |
| ตารางที่ 2.6 | แสดงคุณสมบัติของฟืนอัดแท่งจากวัสดุต่าง ๆ | 36 |
| ตารางที่ 2.7 | คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอน | 36 |
| ตารางที่ 3.1 | ผลการวิเคราะห์หัตถถุดิบเบื้องต้น..... | 46 |
| ตารางที่ 3.2 | สัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิง | 47 |
| ตารางที่ 3.3 | วิธีการวิเคราะห์..... | 51 |
| ตารางที่ 4.1 | สัดส่วนของกากตะกอน แกลบ และตัวประสาน | 53 |
| ตารางที่ 4.2 | แบบการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Plackett-Burman | 54 |
| ตารางที่ 4.3 | ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัด | 55 |
| ตารางที่ 4.4 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค Plackett-Burman..... | 56 |
| ตารางที่ 4.5 | ผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสาน | 57 |
| ตารางที่ 4.6 | ตัวแปรและสัดส่วน..... | 58 |
| ตารางที่ 4.7 | จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง | 58 |
| ตารางที่ 4.8 | ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัด | 59 |
| ตารางที่ 4.9 | ช่วงปัจจัยที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง..... | 63 |
| ตารางที่ 4.10 | ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแท่งเชื้อเพลิง | 64 |
| ตารางที่ 4.11 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง | 66 |
| ตารางที่ 4.12 | ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย | 66 |

| | | |
|---------------|---|----|
| ตารางที่ 4.13 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง Quadratic..... | 68 |
| ตารางที่ 4.14 | ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย..... | 68 |
| ตารางที่ 4.15 | ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic..... | 69 |
| ตารางที่ 4.16 | ช่วงระดับสูง – ต่ำของอุณหภูมิและเวลา..... | 74 |
| ตารางที่ 4.17 | แบบการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Plackett-Burman..... | 74 |
| ตารางที่ 4.18 | ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน..... | 75 |
| ตารางที่ 4.19 | ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค Plackett-Burman..... | 76 |
| ตารางที่ 4.20 | ผลการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนีซิ่งแท่งเชื้อเพลิง..... | 77 |
| ตารางที่ 4.21 | ตัวแปรและสัดส่วน..... | 77 |
| ตารางที่ 4.22 | จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบด้วยเทคนิคพินิวตอปสนอง..... | 78 |
| ตารางที่ 4.23 | ผลการทดสอบคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง..... | 79 |
| ตารางที่ 4.24 | ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์..... | 80 |
| ตารางที่ 4.25 | ช่วงปัจจัยที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง..... | 83 |
| ตารางที่ 4.26 | ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการทดลองหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนีซิ่ง..... | 83 |
| ตารางที่ 4.27 | ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจากการยืนยันผล..... | 84 |
| ตารางที่ 4.28 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง..... | 86 |
| ตารางที่ 4.29 | ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย..... | 86 |
| ตารางที่ 4.30 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic..... | 87 |
| ตารางที่ 4.31 | ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย..... | 88 |
| ตารางที่ 4.32 | ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic..... | 89 |
| ตารางที่ 4.33 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง..... | 94 |
| ตารางที่ 4.34 | ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย..... | 95 |
| ตารางที่ 4.35 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง Quadratic..... | 96 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| ตารางที่ 4.36 | ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย..... | 96 |
| ตารางที่ 4.37 | ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic..... | 97 |
| ตารางที่ 4.38 | การคำนวณค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี..... | 102 |
| ตารางที่ 4.39 | การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 102 |
| ตารางที่ 4.40 | การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย ชุมชนหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 103 |
| ตารางที่ 4.41 | ราคาต้นทุนแปรผันในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง | 104 |
| ตารางที่ 4.42 | ประเมินราคาต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง | 107 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

กากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Domestic sewage sludge) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งนับวันจะยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากร ขนาดและกิจกรรมในชุมชน อีกทั้งยังรวมถึงการขยายตัวของโครงการก่อสร้างและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกระจายอยู่ทั่วประเทศทั้งที่เดินระบบแล้วและทั้งที่กำลังก่อสร้างรวมทั้งหมด 76 ระบบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2557b) ดังนั้นในอนาคตอันใกล้นี้จะมีกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นจำนวนมาก และได้มีการประมาณการกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 60 กรัมของน้ำหนักแห้งของกากตะกอนต่อคนต่อวัน นั้นหมายถึงในระยะเวลา 1 ปี บนพื้นฐานของประชากรกรุงเทพมหานคร 10 ล้านคน จะผลิตกากตะกอนประมาณ 0.2 ล้านตัน (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2556) หากปราศจากการจัดการที่เหมาะสมกากตะกอนอาจถูกชะล้าง และไหลลงสู่แหล่งน้ำจนก่อให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ ดังนั้นการจัดการและกำจัดกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ซึ่งในปัจจุบันวิธีการกำจัดกากตะกอนที่นิยม คือ เผา การถมที่ ทิ้งในป่าไม้ ทิ้งลงในทะเล เป็นต้น แต่การจัดการกากตะกอนที่เหมาะสม ควรเป็นการจัดการตามองค์ประกอบของกากตะกอนที่มีทั้งส่วนที่เป็นประโยชน์และส่วนที่อาจก่อให้เกิดโทษ เนื่องจากในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนยังมีองค์ประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน ได้แก่ ด้านการเกษตร เช่น นำกากตะกอนไปหมักทำปุ๋ยหรือถมที่เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน อีกทั้งยังพบว่ากากตะกอนเมื่อออกจากระบบบำบัดจะยังคงมีค่าพลังงานความร้อนสูง (อานุช แก้ววงศ์, 2548) ในงานวิจัยจึงได้นำเอาคุณสมบัตินี้ไปทำการศึกษาและทดลองเพื่อจะนำเอากากตะกอนน้ำเสียชุมชนไปผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานทดแทนและลดปัญหาการกำจัดกากตะกอนที่ไม่ถูกวิธี

นอกจากนี้จากการพยากรณ์พบว่าการใช้ไม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและในอุตสาหกรรมเมื่อปี พ.ศ. 2544 เท่ากับ 18.736 ล้านตัน ซึ่งการจัดการไม้พินจำนวนดังกล่าวจะต้องปลูกไม้โตเร็วประมาณ 4-5 ล้านไร่ (สุริยา ชัยเดชชยากุล, 2544) ในการศึกษาที่จะรักษาสมดุลของไม้ในส่วนนี้โดยการปลูกป่าไม้โตเร็วเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในจำนวนดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องปลูกไม้โตเร็วที่ปลูกง่ายที่จะจัดการทดแทนให้เพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศ ดังนั้นทางออกสำคัญที่ควรปฏิบัติ คือ การนำเอาศักยภาพที่มีอยู่ในท้องถิ่น ได้แก่ การนำเอาทรัพยากรที่มีมูลค่าพลังงานมาใช้ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ชี้เลื่อย ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว

ผักตบชวา ขยะมูลฝอย เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เปลือกผลไม้ต่าง ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาแกลบมาผสมกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเพื่อผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอันจะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้อีกทางเลือกหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองของสัดส่วน อุณหภูมิ และเวลาในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน
- 2) เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงในสภาวะต่าง ๆ
- 3) เพื่อประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบ และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการ

1.3 สมมุติฐาน

- 1) สัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบตบ และตัวประสานต่อน้ำหนักโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิงมีผลทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดแตกต่างกัน
- 2) อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนีเซชันมีผลทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน

1.4 แนวคิด เหตุผลและทฤษฎี

กากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Domestic sewage sludge) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งนับวันจะยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณน้ำเสีย จำนวนประชากร ขนาดและกิจกรรมในชุมชน ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนกระจายอยู่ทั่วประเทศ ดังนั้นหากนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง ย่อมเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียอีกทางหนึ่ง เพราะกากตะกอนน้ำเสียชุมชนประกอบด้วยคาร์บอนอยู่เป็นจำนวนมาก และยังมีค่าพลังงานความร้อนในตัวมันเองอีกด้วย นอกจากนี้ในการนำของเสียจากการเกษตรโดยเฉพาะแกลบที่มีค่าพลังงานความร้อนในตัวมันเองมาผสมอาจทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความคงตัวสูง แข็งคงรูป เหมาะที่จะนำไปใช้ทดแทนถ่านที่ผลิตจากไม้ทั่วไป ซึ่งเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานอีกทางหนึ่ง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 พื้นที่ศึกษา

โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 3 เขต ได้แก่ เขตภาษีเจริญ เขตบางแค และเขตหนองแขม

1.5.2 ตัวแปร

ตัวแปรต้น : อัตราส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน และตัวประสานในแท่งเชื้อเพลิง
อุณหภูมิ และระยะเวลาในกระบวนการคาร์บอนีเซชัน

ตัวแปรตาม : แท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัด และมีค่าพลังงานความร้อนสูง

1.5.3 ระยะเวลาที่ศึกษา

ธันวาคม 2557 – ธันวาคม 2558

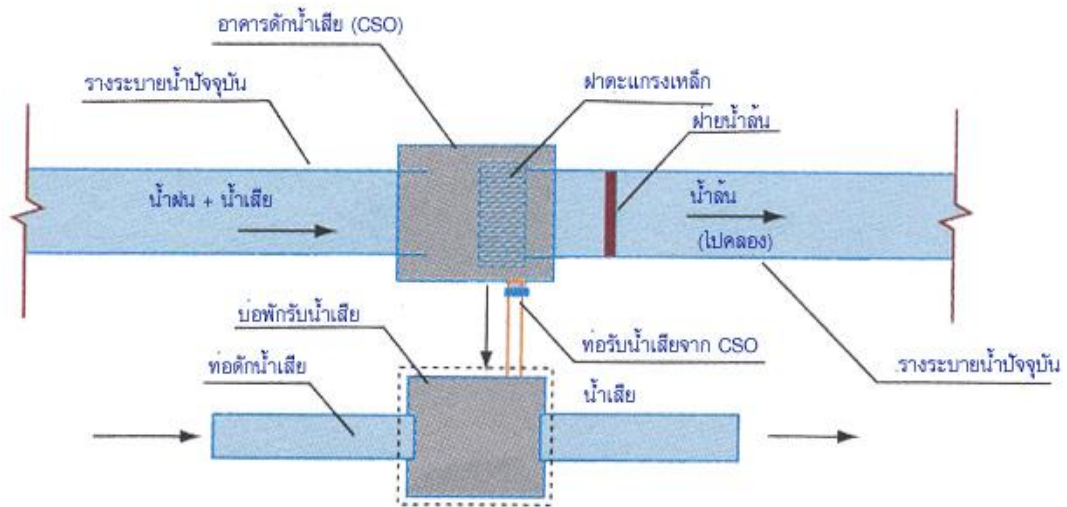
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพิ่มมากขึ้นในรูปของแท่งเชื้อเพลิง
- 2) เป็นการพัฒนาความรู้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานคร

ในอดีตระบบรวบรวมน้ำเสียในกรุงเทพมหานครได้รับการพัฒนาขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อระบายน้ำท่วม และรวบรวมน้ำเสียและน้ำฝนไปพร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในฤดูแล้งน้ำเสียทั้งหมดจะถูกรวบรวมเข้าสู่ท่อรวมและนำไปบำบัดที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำ ในฤดูฝนทั้งน้ำเสียและน้ำฝนจะไหลรวมกันในท่อรวมทำให้มีปริมาณน้ำในท่อรวมสูงขึ้น น้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ท่อรวมจะนำไปบำบัดที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำ โดยน้ำเสียที่มีปริมาณเกินกว่าขีดความสามารถในการบำบัดของโรงบำบัดน้ำเสียจะผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยการแยกกรวดทรายก่อนระบายทิ้งลงคลอง แต่ในพื้นที่ที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำเสียและน้ำฝนจะถูกระบายลงคลองหรือแม่น้ำโดยไม่ได้รับการบำบัด (องค์การความร่วมมือระหว่างประเทศแห่งประเทศญี่ปุ่น (Jica), 2554)



รูปที่ 2.1 แนวความคิดการวางท่อระบายน้ำและท่อตักน้ำเสีย

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2558)

ปัจจุบันสำนักการระบายน้ำได้เปิดเดินระบบโรงควบคุมคุณภาพน้ำในกรุงเทพมหานครจำนวนทั้งหมด 7 แห่ง มีขีดความสามารถในการรองรับน้ำเสียได้ประมาณ 992,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (สำนักการระบายน้ำกรุงเทพมหานคร, 2555) ซึ่งในแต่ละวันจะมีปริมาณน้ำเสียประมาณ 675,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โรงควบคุมคุณภาพน้ำครอบคลุมพื้นที่บริการทั้งหมด 192 ตารางกิโลเมตร รายละเอียดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำในกรุงเทพมหานคร

| โรงควบคุมคุณภาพน้ำ | พื้นที่ (ตารางกิโลเมตร) | ประชากร (คน) | ขีดความสามารถ (ลูกบาศก์เมตร/ วัน) |
|--------------------|----------------------------|-----------------|---|
| 1. สีพระยา | 2.7 | 120,000 | 30,000 |
| 2. รัตนโกสินทร์ | 4.1 | 70,000 | 40,000 |
| 3. ดินแดง | 37.0 | 1,080,000 | 350,000 |
| 4. ช่างนนทรี | 28.5 | 580,000 | 200,000 |
| 5. หนองแขม | 44.0 | 520,000 | 157,000 |
| 6. ทุ่งครุ | 42.0 | 177,000 | 65,000 |
| 7. จตุจักร | 33.4 | 432,000 | 150,000 |
| รวม | 191.7 | 2,979,000 | 992,000 |

ที่มา : สำนักการระบายน้ำ (2555)

2.2 รายละเอียดโรงควบคุมคุณภาพน้ำแต่ละแห่งในกรุงเทพมหานคร

2.2.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา

ตั้งอยู่ปากคลองผดุงกรุงเกษม ถนนสีพระยา เขตบางรัก พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 2.7 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย สัมพันธวงศ์ และบางรัก สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 30,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวของท่อรวบรวมน้ำเสีย 2.3 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Contact Stabilization Activated Sludge

2.2.2 โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์

ตั้งอยู่บริเวณตลาดบ้านพานถมเขตพระนคร พื้นที่บริการน้ำเสีย 4.1 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่เขตพระนคร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 40,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวของท่อรวบรวมน้ำเสีย 16.25 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Two-Stage Activated Sludge

2.2.3 โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่างนนทรี

ตั้งอยู่ปากคลองช่างนนทรี เขตยานนาวา พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 28.5 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่เขตยานนาวา สาทร บางรัก และบางคอแหลม สามารถบำบัดน้ำเสียได้

200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย 55 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Cyclic Activated Sludge System

2.2.4 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

ตั้งอยู่บริเวณโรงกำจัดขยะมูลฝอยหนองแขม พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 44 ตารางกิโลเมตรครอบคลุมพื้นที่เขตหนองแขม บางแค และภาษีเจริญ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 157,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย 46 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่งมีถังเติมอากาศแบบ Vertical Loop Reactor

2.2.5 โรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ

ตั้งอยู่ในซอยประชาอุทิศ 90 เขตทุ่งครุ พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 42 ตารางกิโลเมตรครอบคลุมพื้นที่เขตจอมทอง ทุ่งครุ และราษฎร์บูรณะ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 65,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย 26 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่งมีถังเติมอากาศแบบ Vertical Loop Reactor

2.2.6 โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง

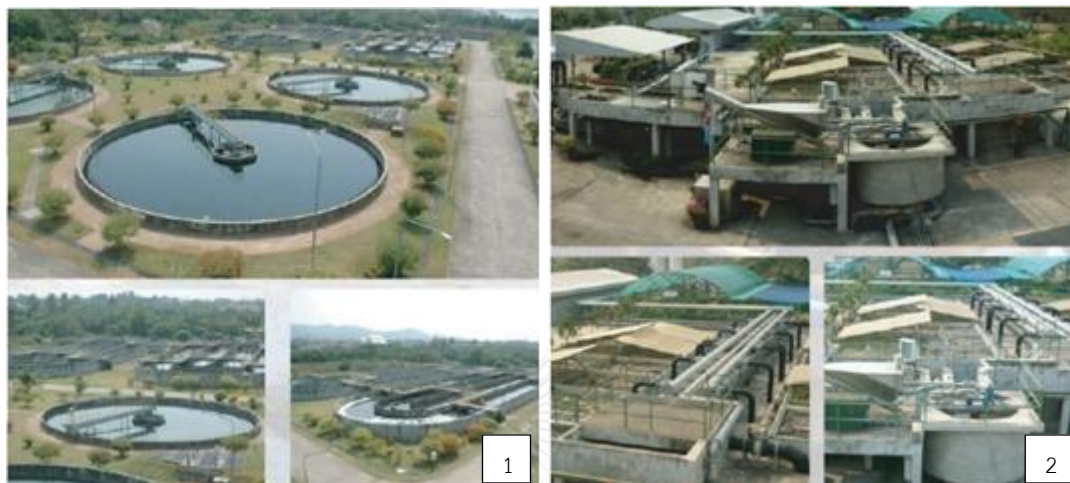
ตั้งอยู่บริเวณใกล้กับศาลาว่าการกรุงเทพมหานคร 2 เขตดินแดง พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 37 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่เขตดุสิต พญาไท ดินแดง ราชเทวี พระนคร ป้อมปราบศัตรูพ่าย และสัมพันธวงศ์ สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 350,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย 66 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge with Nutrients Removal

2.2.7 โรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักร

ตั้งอยู่บริเวณริมคลองบางซื่อในซอยอินทามระ 35 เขตจตุจักร พื้นที่บริการบำบัดน้ำเสีย 33.4 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่เขตจตุจักร พญาไท ห้วยขวาง และดินแดง สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 150,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความยาวท่อรวบรวมน้ำเสีย 37.5 กิโลเมตร กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Cyclic Activated Sludge System

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของกรุงเทพมหานครส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดชีวภาพแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) ดังรูปที่ 2.2 (1) และรูปที่ 2.2 (2) ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน และมีบางโรงบำบัดน้ำเสียเลือกใช้วิธีการบำบัดทางเคมี ซึ่งแต่ละโรงบำบัดจะเลือกระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความเหมาะสมกับปัจจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวข้างต้น และในงานวิจัยนี้ได้ใช้กากตะกอนที่เหลือทิ้งจากระบบบำบัด

น้ำเสียชุมชนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมซึ่งใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมาทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.2 (1),(2) ระบบบำบัดชีวภาพแบบตะกอนเร่ง

ที่มา : สำนักการระบายน้ำ (2555)

2.3 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม

2.3.1 สถานที่ตั้ง

ตั้งอยู่ที่บริเวณโรงงานกำจัดมูลฝอยหนองแขม ความสามารถในการรองรับน้ำเสีย 157,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พื้นที่บริการ 44 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 2.8 ของพื้นที่กรุงเทพมหานคร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ร้อยละ 6.0 ของปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกรุงเทพมหานคร โดยพื้นที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่ 3 เขต ได้แก่

- 1) เขตหนองแขม ได้แก่ บางส่วนของแขวงหนองค้างพลู และบางส่วนของแขวงหนองแขม
- 2) เขตบางแค ได้แก่ บางแคเหนือ บางส่วนของแขวงบางแค และบางส่วนของแขวงหลักสอง
- 3) เขตภาษีเจริญ ได้แก่ แขวงบางด้วน แขวงบางจาก บางส่วนของแขวงบางแวก บางส่วนของแขวงคูหาสวรรค์ บางส่วนของแขวงปากคลองเจริญภาษี บางส่วนของแขวงบางหว้า และบางส่วนของแขวงคลองขวาง

2.3.2 รายละเอียดกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดขั้นต้น

1) ตะแกรงดักขยะแบบหยาบ (Trash rack screening) ติดตั้งที่บริเวณทางเข้าของ สถานีสูบน้ำเสียเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องสูบน้ำ ระยะห่างระหว่างตะแกรงดักขยะ 50 มิลลิเมตร ความสามารถในการสูบน้ำ 1,385 ลิตรต่อวินาที เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มน้ำ (Submersible pump)

2) ตะแกรงดักขยะแบบละเอียด (Fine screening) เครื่องดักขยะแบบละเอียดที่ใช้ เป็นแบบ Rotating band screen ซึ่งจะมีการหมุนและฉีดล้างพร้อมกัน ควบคุมการทำงานจาก อุปกรณ์วัดค่าความแตกต่างของระดับน้ำที่ไหลผ่าน เครื่องดักขยะเครื่องดักขยะที่ติดตั้งจะมีจำนวน 3 เครื่อง และมีตะแกรงดักขยะแบบ Manual สำหรับกรณีฉุกเฉินที่ต้องการฝัดออกจาก Fine screening เนื่องจากการหยุดใช้งานหรือซ่อมบำรุง ระยะห่างระหว่างตะแกรง ประมาณ 5 มิลลิเมตร

3) ถังแยกกรวดทราย (Grit trap) มีหน้าที่แยกกรวดทรายที่ปนมากับน้ำเสียออกโดย วิธี Vertex method ซึ่งประกอบด้วยถังแยกกรวดทรายแบบกลม จำนวน 2 ถัง และใบกวนซึ่งมี หน้าที่ทำให้เกิดการหมุนวนตะกอนกรวดทรายและรวมตัวกันที่บริเวณก้นถัง ตะกอนทรายที่แยกได้จะ ถูกสูบออกโดยเครื่องสูบน้ำแบบใช้อากาศยก (Air lift pump) เพื่อนำไปกำจัดต่อไป

การบำบัดทางชีวภาพ

1) ถังเติมอากาศสำหรับตะกอนหมุนเวียน (Reaeration tank) ซึ่งจะเติมอากาศก่อนที่จะนำจุลินทรีย์หมวนเวียนกลับไปถังเติมอากาศ VLR ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ออกแบบไว้ในถังนี้ ประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรถังประมาณ 8,780 ลูกบาศก์เมตรต่อถัง

2) ถังเติมอากาศ (Aeration tank) ถังเติมอากาศที่ออกแบบไว้สำหรับจุลินทรีย์และน้ำเสีย (Mixed liquor) จำนวน 8 ถัง โดยเป็นถังเติมอากาศชนิดไหลแนวตั้ง (Envirex Vertical Loop Reactors-VLR) จำนวน 6 ถังปริมาตรถังจะประมาณ 25,000 ลูกบาศก์เมตร ถังเติมอากาศแบบ VLR 3 ถังแรกของแต่ละชุด ประกอบด้วย หัวจ่ายลมแบบ Fine bubble, แผ่น Horizontal baffle และ เครื่องเติมอากาศแบบ Surface disc aerator ส่วนถังเติมอากาศถังสุดท้าย (Final AR) ออกแบบเพื่อ จุดประสงค์เป็นถัง Polishing tank โดยมีการเติมอากาศเฉพาะหัวจ่ายลมเท่านั้น ระบบถังเติมอากาศ แบบ VLR ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการควบคุมการใช้งาน การไหลของน้ำเสียเป็นแบบ Plug flow จุดประสงค์เพื่อกำจัดสารประกอบ BOD ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โดยกำหนดให้มีการเกิด กระบวนการ Anoxic และ Oxidic (กระบวนการใช้ออกซิเจนอิสระในการบำบัดน้ำเสีย) ซึ่งจะเชื่อมโยง

กับกระบวนการ Nitrification และ Denitrification สำหรับระบบหมุนเวียนตะกอนสามารถส่งตรงไปยังถัง VLR ทั้ง 3 ถัง ได้โดยตรงไม่ต้องผ่านถัง Reaeration

3) ถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย (Final clarifier) น้ำเสียที่ผ่านจากถังเติมอากาศจะผ่านเข้าสู่ถังขั้นสุดท้าย (Final clarifier) เพื่อแยกตะกอนน้ำเสียออกจากน้ำเสียที่บำบัดแล้ว น้ำส่วนใสด้านบนจะไหลออกไปยังรางรับน้ำเพื่อไหลไปจุดปล่อยน้ำทิ้งต่อไป ส่วนตะกอนที่ตกลงมาบริเวณก้นถังจะรวบรวมไปยังถังเก็บตะกอน (Sludge holding tank) ถังตกตะกอนที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม-ภาษีเจริญเป็นถังวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 เมตร ลึกประมาณ 4.6 เมตร จำนวน 3 ถัง ในระยะที่ 1 และอีก 1 ถัง ในระยะที่ 2 ระยะเวลาที่เก็บสำหรับปริมาณน้ำ 1 DWF ประมาณ 3 ชั่วโมง

4) ระบบจ่ายสารเคมี (Chemical feed system) ประกอบด้วยการเติมสารเพอริกคลอไรต์ เพื่อกำจัดสารประกอบฟอสฟอรัส ในน้ำเสียและการเติมสารประกอบโซเดียมไฮโปคลอไรต์ เพื่อแก้ไขปัญหาตะกอนลอยตัว (Sludge bulking)

5) การปล่อยน้ำทิ้งสุดท้าย (Effluent discharge) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและไหลล้นจากถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย (Final clarifier) จะถูกเติมอากาศด้วยหัวจ่ายลมแบบ Fine bubble เพื่อเพิ่มออกซิเจนที่ละลายน้ำในน้ำทิ้ง (Post aeration) จนได้ค่าตามมาตรฐาน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำทิ้งที่บำบัดแล้วก่อผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่อไป

อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะก่อให้เกิดกากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) ในปริมาณที่แตกต่างกันตามปริมาณน้ำเสียและรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสีย นั้น ๆ ซึ่งตะกอนน้ำเสียเหล่านี้จะต้องมีการกำจัดโดยรูปแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสม

2.4 กากตะกอนน้ำเสีย

กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) เป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งกระบวนการทางเคมีและชีววิทยา ซึ่งอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายประเภท กลไกการบำบัดเป็นการเปลี่ยนรูปสิ่งสกปรกในน้ำเสียและแยกสิ่งสกปรกเหล่านี้ออกมาเป็นกากตะกอนน้ำเสีย ซึ่งกากตะกอนที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ กากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมการเกษตร โรงฆ่าสัตว์ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน และกากตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ ได้แก่ กากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทชุบโลหะ อุตสาหกรรมเคมี และอิเล็กทรอนิกส์ (เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิน์สุคนธ์, 2538)

2.4.1 กากตะกอนน้ำเสียชุมชน

แหล่งกำเนิดของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็นผลมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ของชุมชน ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนไม่ว่าจะด้วยวิธีการใดย่อมมีกากตะกอนเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งกากตะกอนจะมีองค์ประกอบแตกต่างกัน ได้แก่ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ เกลือแร่ต่าง ๆ ตลอดจนจุลินทรีย์หลายชนิด โดยทั่วไปปริมาณของแข็งในน้ำเสียจะอยู่ในช่วง 500 - 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 25 มีอยู่ในแหล่งน้ำประปาเดิม อีกร้อยละ 75 มาจากกิจกรรมของชุมชน ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) จะมีปริมาณหนึ่งในสามของของแข็งทั้งหมด (Total solids) และประมาณหนึ่งในสามของของแข็งแขวนลอยนี้มีขนาดอนุภาคและความถ่วงจำเพาะที่จะทำให้ตัวมันแยกออกจากของเหลวเมื่อตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ของแข็งที่ตกตะกอนลงมาได้เองเรียกว่า Settleable solids และส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนได้เองเรียกว่า Nonsettleable solids สำหรับของแข็งที่สามารถผ่านกระดาษกรองได้จะประกอบด้วยของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Dissolved solids) และคอลลอยด์ (สมใจ กาญจนวงศ์, 2543)

2.4.2 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการทางชีวภาพจะมีกากตะกอนจุลินทรีย์เป็นผลผลิตตามมาด้วยเสมอซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดกากตะกอนเหล่านั้นเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการเน่าเหม็นของกากตะกอน การเพิ่มภูวมลพิษ และเป็นการทำลายเชื้อโรคดังรูปที่ 2.3 นอกจากนี้การลดปริมาตรกากตะกอนโดยการกำจัดน้ำช่วยให้เกิดความสะดวกในการเก็บขนไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ทั้งนี้ในการบำบัดกากตะกอนประกอบด้วยกระบวนการหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

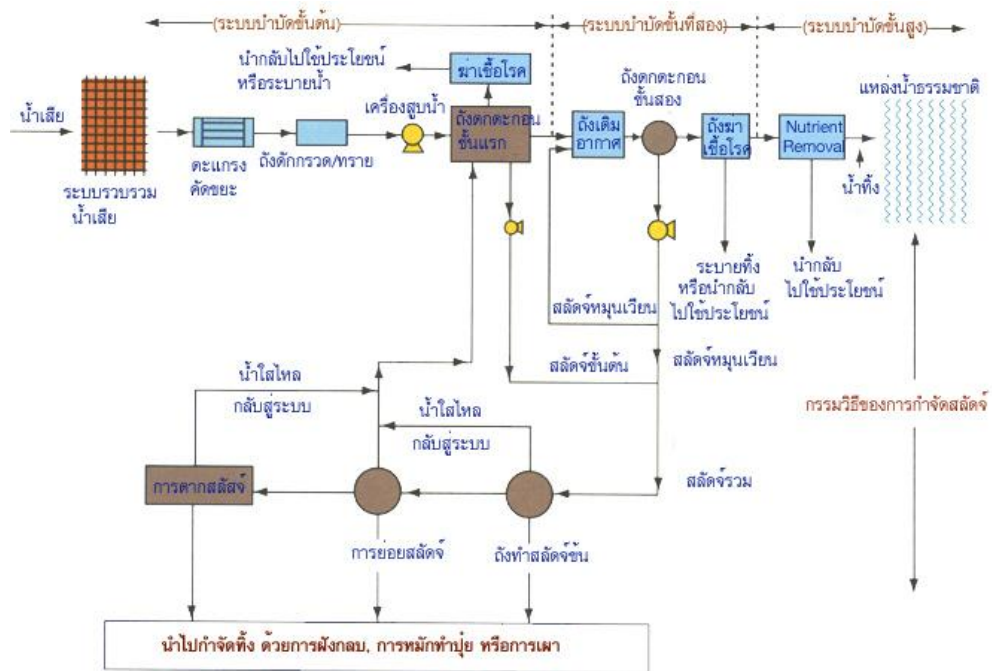
1) การทำชั้น (Thickener) โดยใช้ถังทำชั้นซึ่งมีทั้งกลไกการตกตะกอน (Sedimentation) และใช้กลไกการลอยตัว (Flotation) ทำหน้าที่ลดปริมาตรกากตะกอนก่อนส่งไปบำบัดด้วยวิธีอื่นต่อไป

2) การทำให้กากตะกอนคงตัว (Stabilization) โดยการย่อยกากตะกอนด้วยกระบวนการใช้อากาศ หรือใช้กระบวนการไร้อากาศเพื่อทำหน้าที่ในการลดสารอินทรีย์ในกากตะกอน ทำให้กากตะกอนคงตัวสามารถทิ้งได้โดยไม่เน่าเหม็น

3) การปรับสภาพกากตะกอน (Conditioning) เพื่อให้กากตะกอนมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ทำปุ๋ย ปรับสภาพดินเพื่อการเกษตร เป็นต้น

4) การรีดน้ำ (Dewatering) เพื่อลดปริมาณน้ำในกากตะกอนที่จะนำไปทำการฝังกลบ การเผา หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการขนส่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรีดน้ำ

ได้แก่ เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter) เครื่องอัดกรอง (Filter press) หรือเครื่องกรองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รวมถึงการตากกากตะกอนบนลาน (Sludge drying bed)



รูปที่ 2.3 การบำบัดกากตะกอน

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2557a)

ยกตัวอย่างการบำบัดกากตะกอนน้ำเสียชุมชนในกรุงเทพมหานครจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ดังนี้

โรงบำบัดตะกอนหนองแขม

ระบบกำจัดตะกอน เป็นส่วนหนึ่งของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม ปริมาณตะกอนและลักษณะของกากตะกอนที่นำมาบำบัด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1) ตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสียหนองแขม ภาษีเจริญประกอบด้วย

- ตะกอนส่วนเกินจากถังเก็บตะกอน (Sludge holding tank)
- ตะกอนลอยในถังตกตะกอน (Scum)
- ตะกอนจากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการเติม $FeCl_3$
- ตะกอนจากการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation unit) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1

2) ตะกอนที่มาจากภายนอกโรงบำบัด โดยมาจากโรงบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ ของกรุงเทพมหานคร รายละเอียดของการบำบัดตะกอนที่ออกแบบไว้ ประกอบด้วย

- Sludge holding tank ขนาด 180 ลูกบาศก์เมตร ตะกอนน้ำเสียร้อยละ 1 DS และตะกอนเคมีจากกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัส จะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 180 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง โดยมีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 1.90 ชั่วโมง ภายในถังจะถูกกวนโดย Fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจน จนทำให้เกิดการปลดปล่อยของฟอสฟอรัส

- Gravity belt thickener จำนวน 2 เครื่อง ตะกอนน้ำเสียร้อยละ 1 DS จะถูกทำให้มีความเข้มข้นที่ร้อยละ 4 DS โดยการใช้ Gravity belt thickener ตะกอนน้ำเสียร้อยละ 1 DS จะถูกผสมกับโพลีเมอร์ในท่อ Static mixing ก่อนเข้าสู่การทำให้ตะกอนข้น ปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 5.5 กิโลกรัมโพลีเมอร์ต่อตัน ตะกอนแห่ง Sludge holding tank ขนาด 60 ลูกบาศก์เมตร ตะกอนน้ำเสียร้อยละ 4 DS จะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 60 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง โดยมีระยะเวลาเก็บกักประมาณ 2.0 ชั่วโมง ภายในถังจะถูกกวนโดย Fine bubble diffusers เพื่อป้องกันการเกิดสภาพไร้ออกซิเจนทำให้เกิดการปลดปล่อยของฟอสฟอรัส

- Sludge mixing tank ตะกอนน้ำเสียจาก 2 แหล่งกำเนิด คือ ตะกอนน้ำเสียร้อยละ 4 DS จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม และตะกอนน้ำเสียร้อยละ 20 DS จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำอื่นของกรุงเทพมหานคร ถูกนำมาผสมกันในถังขนาด 21 ลูกบาศก์เมตรจำนวน 2 ถัง โดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 21 นาทีต่อครั้ง ตะกอนที่ผสมแล้วจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10 DS ในกรณีที่ตะกอนน้ำเสียจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำอื่นมีความเข้มข้นมากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วภายในโรงงานจะถูกนำมาผสมในถังเพื่อลดความเข้มข้น จากปริมาตรของถังผสมสามารถที่จะผสมตะกอนได้วันละ 65 ครั้ง

- Slurry holding tank ขนาด 80 ลูกบาศก์เมตร ตะกอนที่ถูกผสมแล้วจะมีความเข้มข้นร้อยละ 10 DS จะถูกเก็บไว้ในถังขนาด 80 ลูกบาศก์เมตรจำนวน 1 ถัง ก่อนถูกส่งเข้าสู่ถัง Digester ภายในถังเก็บตะกอนนี้จะมีการกวนด้วย Submersible Mixing เพื่อป้องกันการตกตะกอน

- Heat exchanger ก่อนที่ตะกอนร้อยละ 10 DS จะถูกส่งเข้าถัง Digester ตะกอนจะต้องถูกทำให้ร้อนขึ้นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสโดยการผ่านตะกอนเข้าสู่ระบบ Heat exchanger แหล่งพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถได้จากน้ำมันเชื้อเพลิง หรือก๊าซที่เกิดจากการหมักในถัง Digester anaerobic digester ถังหมักตะกอนแบบไร้ออกซิเจนมีจำนวน 2 ถัง แต่ละถังมีปริมาตรความจุประมาณ 12,250 ลูกบาศก์เมตร ในการเดินระบบในถังหมักตะกอนทั้งสองถังสามารถเดินได้ทั้งแบบอนุกรมหรือคู่ขนาน ในกรณีที่เดินระบบแบบอนุกรมจะใช้ระยะเวลาในการหมักประมาณ 19 วัน ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในถังหมักเพื่อกวนตะกอน และบางส่วนนำไปใช้เป็นพลังงานในการอุ่นตะกอน ก๊าซส่วนเกินจะถูกเผาทิ้งไป ส่วนตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถังเก็บตะกอนต่อไป

- Digested sludge holding tank ขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร ตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ในถัง Digested sludge holding tank ขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ถัง ก่อนถูกส่งไปรีดน้ำที่เครื่อง Belt filter press

- Belt filter press จะทำหน้าที่รีดน้ำออกจากตะกอน โดยตะกอนที่หมักแล้วจะถูกผสมกับโพลีเมอร์ก่อนเข้ารีดที่เครื่อง Belt filter press ตะกอนที่ผ่านการรีดจะมีความเข้มข้นร้อยละ 20 DS

3) การกำจัดกลิ่น

ระบบกำจัดกลิ่น (Odor Control System) เนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามาบำบัดในกระบวนการ มีค่าความสกปรก มีกลิ่นเหม็นรบกวนซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อยู่อาศัยข้างเคียง จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบให้มีระบบควบคุมกลิ่นที่เกิด ณ จุดต่าง ๆ ดังนั้น สถานีสูบน้ำเสียหลักมีระบบกำจัดกลิ่นแบบเปียก (Wet Scrubber) บ่อเติมอากาศมีระบบ Dry Activated Carbon Scrubber ถังตกตะกอนมีระบบ Dry Activated Carbon Scrubber

2.4.3 การจัดการกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

กากตะกอนน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งกากตะกอนอินทรีย์เหล่านี้เป็นของเสียที่ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ และส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายต่อไปได้อีก ดังนั้นกากตะกอนที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการจัดการด้วยวิธีต่าง ๆ ที่เหมาะสม การบำบัดกากตะกอนจึงเป็นสิ่งสำคัญส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ลงให้อยู่ในรูปที่คงตัวไม่เน่าเหม็น ท้ายสุดของกระบวนการบำบัดน้ำเสียและกากตะกอนก็จะได้ตะกอนซึ่งมีลักษณะคงตัวและลดส่วนที่เป็นน้ำแล้ว เพื่อจะได้สะดวกต่อการนำไปทิ้งหรือใช้ประโยชน์ต่อไป การจัดการกากตะกอนในปัจจุบันมักนำไปเผาทิ้ง ฝังกลบหรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร เช่น การทำปุ๋ย (วีระ ชานวิทิตกุล, 2546) ดังนี้

1) การฝังกลบ (Landfill) เป็นการนำกากตะกอนมาฝังในสถานที่ที่จัดเตรียมไว้และกลบด้วยชั้นดินทับอีกชั้นหนึ่ง

2) การหมักทำปุ๋ย (Composting) เป็นการนำกากตะกอนมาหมักต่อเพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย ซึ่งเป็นการนำกากตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืช เนื่องจากในตะกอนประกอบด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแร่ธาตุต่างๆ

3) การเผา (Incineration) เป็นการนำกากตะกอนที่ใกล้แห้ง (ตั้งแต่ร้อยละ 40 ของของแข็งขึ้นไป) มาเผา เนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยหรือฝังกลบได้

งานวิจัยในต่างประเทศยังมีวิธีการกำจัดกากตะกอนด้วยวิธีอื่น ๆ ที่น่าสนใจ เช่น การกำจัดกากตะกอนน้ำเสียชุมชนด้วยวิธีอบแห้ง และการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียชุมชนด้วยวิธีเทกอง เป็นต้น (นิธิพงศ์ อนุรักษพงษ์ศร, 2546) อีกทั้งจากงานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่ากากตะกอนน้ำเสียชุมชนเมื่อออกจากระบบบำบัดน้ำเสียแล้วยังมีค่าความร้อนสูงอยู่ จึงเริ่มมีการนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงร่วมกับวัสดุต่าง ๆ เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย เป็นต้น

2.5 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเชื้อเพลิงและชีวมวล

2.5.1 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง หมายถึง สารที่มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน และเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะให้ความร้อนออกมา เชื้อเพลิงแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- 1) เชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ ถ่านหิน ไม้ผืน ชานอ้อย แกลบ ชี้เลื่อย เป็นต้น
- 2) เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ น้ำมันเบนซิน ดีเซล น้ำมันเตา เป็นต้น
- 3) เชื้อเพลิงก๊าซ ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ LPG เป็นต้น

องค์ประกอบสำคัญของเชื้อเพลิงทุกชนิด คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และความชื้น คุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงขึ้นกับสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ ซึ่งเชื้อเพลิงที่ดีควรมีลักษณะดังนี้ (ณัฐพร ดำรงโรจน์วัฒนา, 2546) สามารถเผาไหม้และควบคุมการเผาไหม้ได้ มีค่าความร้อนสูง ราคาไม่แพง เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้สารที่เป็นมลพิษในระดับต่ำ ง่ายต่อการลำเลียงขนส่ง เก็บรักษาง่าย และมีความปลอดภัยทั้งเวลาใช้ และเก็บรักษา

2.5.2 ชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง ผลผลิตจากการสังเคราะห์แสงทั้งหมด รวมทั้งพืชและสัตว์ ตลอดจนของเสียจากมนุษย์และสัตว์ด้วย ชีวมวลเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถสร้างทดแทนได้ มีการสะสมพลังงานไว้ในรูปของเซลลูโลสและสารประกอบอื่น ๆ ชีวมวลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นเครื่องนึ่งห่ม และเชื้อเพลิงทั้งในรูปแบบของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

ชีวมวลใช้เป็นแหล่งพลังงานใน 2 ลักษณะ คือ แบบปกติทั่วไป (Traditional) และแบบสมัยใหม่ (Modern) ในประเทศกำลังพัฒนา เช่น ประเทศไทยจะพบการใช้ชีวมวลแบบปกติทั่วไป (ทองทิพย์ พลุเกษม, 2542) เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก การใช้ชีวมวลสมัยใหม่เป็นการแปรรูปชีวมวลแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ก๊าซ และไฟฟ้า โดยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิต Ethanol, Methanol, Biodiesel และ Biogas เป็นต้น

เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานจากชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเผาเป็นพลังงานความร้อน (Direct combustion) การเปลี่ยนรูปเป็นของเหลวหรือก๊าซโดยวิธีเคมีความร้อน (Thermochemical) และชีวเคมี (Biochemical) เพื่อนำมาสู่การพัฒนาคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ประเทศไทยส่วนใหญ่ทำการเกษตรกรรมเป็นหลัก และยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปผลผลิตจากการเกษตรอีกเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณสูงที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ทดแทนฟืนและถ่านได้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

| วัสดุเหลือใช้ | สารระเหย (%โดยน้ำหนัก) | ถ่านคงตัว (%โดยน้ำหนัก) | เถ้า (%โดยน้ำหนัก) | กำมะถัน (%โดยน้ำหนัก) | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) |
|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|
| ขี้เลื่อย | 75.4 | 22.4 | 2.0 | 0.20 | 4,500 |
| กากอ้อย | 73.9 | 17.6 | 8.5 | 0.3 | 4,400 |
| แกลบ | 62.7 | 17.4 | 20.0 | 0.14 | 3,600 |
| ฟางข้าว | 74.4 | 18.3 | 7.3 | - | 4,000 |
| ซังข้าวโพด | 76.1 | 21.8 | 2.1 | - | 4,400 |

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2541)

แหล่งพลังงานชีวมวล

แหล่งพลังงานชีวมวลที่สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง (นิศากร ดอนกระสินธุ์, 2545)

ดังนี้

1) เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยว (Crop residues) ซึ่งมีอยู่ทั่วไปทั้งในไร่นา สวนป่า โรงงาน เช่น โรงเลื่อย โรงสี เป็นต้น

2) วัชพืช (Weed) คือ พืชที่เราไม่ต้องการ พบได้ทั่วไปในพื้นที่เพาะปลูก และพื้นที่ที่ไม่ได้ทำการเพาะปลูก จัดเป็นแหล่งชีวมวลที่ใหญ่ที่สุดแหล่งหนึ่งของประเทศไทย

3) สิ่งเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste) ได้แก่ กากน้ำตาล กากสำเหล้า แกลบ ขี้เลื่อย เป็นต้น

4) ขยะมูลฝอย (Municipal waste) ซึ่งนับวันจะมีจำนวนมากขึ้นและมีปัญหาในการจัดการ หากนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานน่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในปัจจุบันประเทศไทยได้นำมาใช้เป็นพลังงานของโรงไฟฟ้า

5) ของเสียจากสัตว์เลี้ยง เช่น มูลสัตว์ (Dung cake) นำมาใช้ประโยชน์ในรูปของ เชื้อเพลิงแห้ง และก๊าซชีวภาพ

วัสดุชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาอัดแห้ง (Briquetting) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงได้ และสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม โดยเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีสารกำมะถันต่ำและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ (นิธิพงศ์ อนุรักษ์พงศธร, 2546) ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกนำเอาแกลบและกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาเป็นวัตถุดิบในการอัดแห้งเชื้อเพลิง

2.6 แกลบ

2.6.1 ลักษณะภายนอกและองค์ประกอบของแกลบ

แกลบถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือก ซึ่งทำให้เกิดเศษของเปลือกข้าวออกมา มีลักษณะสีเหลืองทอง สีเหลืองอ่อน สีน้ำตาลแดงขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ข้าว ดังรูปที่ 2.4 แกลบประกอบด้วยสารอินทรีย์ และซิลิกา ปริมาณสารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ประมาณร้อยละ 51 ออกซิเจนร้อยละ 42 ส่วนที่เหลือจะเป็นไฮโดรเจน และไนโตรเจน (สรินทร์ ลีมนานาท, 2540) ส่วนซิลิกาจะพบมากบริเวณผิววนอกของแกลบจึงทำให้แกลบมีความแข็งสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุขัดผิวได้ โดยปกติแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกจะมีประมาณร้อยละ 22 ถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักจากเมล็ดข้าวเปลือกจึงทำให้การสีข้าวเปลือกแต่ละครั้งจะเกิดแกลบจำนวนมาก



รูปที่ 2.4 ลักษณะภายนอกของแกลบ

ที่มา : อัญชุลี หอแก้ว (2553)

อีกทั้งกลบยังถือเป็นผลิตผลพลอยได้จากข้าวทั้งข้าวนาปีและข้าวนาปรัง ซึ่งมีพื้นที่การเพาะปลูกทุกภาคของประเทศไทย จากแนวโน้มสถิติการปลูกข้าวเมื่อปี พ.ศ. 2552 - 2553 พบว่า ปริมาณผลผลิตข้าวทั้งประเทศมีค่าเท่ากับ 14.65 ล้านตัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือสูงถึงร้อยละ 38.48 รองลงมาคือภาคเหนือร้อยละ 29.12 ภาคกลางร้อยละ 24.98 และภาคใต้น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 7.42 (วาริ ช้วนรักธรรม, 2556)

2.6.2 การนำกลบไปใช้ประโยชน์

- 1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในภาคครัวเรือน เช่น เชื้อเพลิงในเตาประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงอัดแท่งโดยกลบ 1 กิโลกรัม สามารถให้พลังงานจากการเผาไหม้ได้สูงถึง 3,800.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg.) ซึ่งใกล้เคียงกับไม้ และถ่านไม้ที่ 4,000.00 - 5,000.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2549) จึงสามารถนำกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนไม้ได้เป็นอย่างดี
- 2) ใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องจักรไอน้ำของโรงสีข้าว เชื้อเพลิงโรงงานเครื่องปั้นดินเผา โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น
- 3) ใช้เป็นวัสดุขัดผิวทั้งในภาคครัวเรือน และอุตสาหกรรม
- 4) ใช้ในการเผาถ่านเพื่อลด และควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการเผาถ่าน ป้องกันการลุกไหม้เป็นเปลวไฟ
- 5) ใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก อิฐมอญ รวมถึงผสมดินเหนียวสำหรับงานก่อ
- 6) ใช้ในการปรับปรุงดิน เช่น การปรับปรุงดินเค็ม การเพิ่มความร่วนซุยของดิน การเพิ่มอินทรีย์วัตถุ และแร่ธาตุอาหารในดิน เป็นต้น
- 7) การใช้ประโยชน์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ใช้รองพื้นสำหรับฟาร์มไก่ หรือสุกร
- 8) ใช้ทำฉนวนเคลือบกอน้ำแข็งป้องกันน้ำแข็งละลาย

จากสถิติพบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภาคที่มีการเพาะปลูกข้าวสูงที่สุดจึงทำให้มีกลบในปริมาณมากที่สุด ดังนั้นการใช้กลบเป็นเชื้อเพลิงจึงน่าจะมีศักยภาพสูงที่สุดในภาคนี้ (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2540) โดยทั่วไปปริมาณกลบที่ได้จากการสีข้าวจะอยู่ระหว่างร้อยละ 22.5 - 25.2 ของปริมาณข้าวเปลือกโดยน้ำหนัก ดังนั้นถ้าหากใช้อัตราการผลิตกลบร้อยละ 23.85 จะคำนวณได้ว่าในปี พ.ศ. 2552 - 2553 กลบทั้ง

ประเทศจะมีปริมาณมากถึง 3.49 ล้านตัน ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งแทนฟืนหรือถ่านไม้ได้อย่างเพียงพอ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2551 - 2556 (หน่วย: พันตันเทียบน้ำมันดิบ)

| ชนิด | 2551 | 2552 | 2553 | 2554 | 2555 | 2556 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ฟืน | 3,760 | 3,552 | 3,382 | 3,337 | 3,320 | 3,238 |
| ถ่าน | 2,605 | 2,768 | 2,817 | 2,952 | 3,005 | 2,986 |
| แกลบ | 1,074 | 1,284 | 1,098 | 1,143 | 1,384 | 1,274 |
| กากอ้อย | 2,953 | 2,876 | 2,555 | 2,736 | 2,918 | 2,859 |
| วัสดุเหลือใช้ | 192 | 852 | 1,481 | 1,897 | 1,948 | 2,461 |

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2556)

เนื่องจากแกลบเป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าว ดังนั้นปริมาณของแกลบจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณข้าวที่ผลิตได้ในปี พ.ศ. 2552 - 2553 จากการสำรวจค่าสถิติที่ผ่านมาพบว่าปริมาณแกลบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แกลบจึงเป็นวัสดุที่หาง่าย และมีปริมาณมาก อีกทั้งในปัจจุบันได้ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ดังนั้นแกลบจึงเป็นวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจจะนำมาใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแกลบมีค่าความร้อนเฉลี่ยสูงถึง 3,880.00 kcal/kg. (ปัจจุรัตน์ โสจรรย์ และคณะ, 2554) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2556

| ชนิด | ผลผลิต (ton) | ชีวมวล | ปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้ (ton) | ค่าความร้อน (Kcal/Kg.) | ศักยภาพพลังงาน (Kton) |
|------|--------------|----------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| อ้อย | 67,416,542 | ชานอ้อย | 4,290,849.29 | 3,440.20 | 1,428.54 |
| | | ยอดและใบ | 14,436,527.44 | 4,154.52 | 5,532.52 |
| ข้าว | 34,206,162 | แกลบ | 3,710,698.90 | 3,880.15 | 1,185.87 |
| | | ฟางข้าว | 27,656,547.88 | 2,446.37 | 6,216.73 |

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2556)

แต่เนื่องจากแกลบมีความหนาแน่นต่ำ การใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงอยู่ในขอบเขตจำกัดเนื่องจากค่าขนส่งสูง ทางหนึ่งที่จะทำให้แกลบสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นคือ การนำแกลบมาอัดเป็นแท่งฟืน หรือแท่งเชื้อเพลิง

ในอดีตได้มีการเอาแกลบที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการสีข้าวมาผลิตเป็นแท่งฟืนแกลบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 1.3 กิโลกรัม ซึ่งใช้เวลาผลิตแท่งละ 30 - 50 วินาที และใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 0.12 กิโลวัตต์ต่อแท่ง แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณลักษณะสม่ำเสมอ มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเรียงเป็นกองสูงได้ (ทองทิพย์ พลุเกษม, 2542) นอกจากแกลบแล้วยังมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ มาอัดเป็นเชื้อเพลิงแท่งอีก เช่น แท่งฟืนขี้เลื่อย เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของฟืนอัดแท่งจากวัสดุต่าง ๆ

| คุณสมบัติ | แท่งฟืนจาก แกลบ | แท่งฟืนจากขี้ เลื่อย | แท่งฟืนจากไม้ แสม |
|------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------|
| ความชื้น (%) | 5.9 | 5.7 | 8.0 |
| ถ่านคงตัว (%) | 20.4 | 24.9 | 22.8 |
| สารระเหย (%) | 62.1 | 72.5 | 73.3 |
| เถ้า (%) | 17.5 | 2.6 | 3.9 |
| ค่าความร้อน (kcal/kg.) | 3,900.00 | 4,820.00 | 4,390.00 |
| อุณหภูมิสูงสุด (C°) | 900 | 900 | 950 |
| ระยะเวลาการลุกไหม้ (ชั่วโมง) | 3.0 | 4.0 | 1.7 |

ที่มา : สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2546)

การนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ในรูปพลังงานทดแทน โดยนำมาทำเป็นแท่งเชื้อเพลิง ทำให้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรนั้นมีลักษณะการใช้งานและคุณภาพที่ดีขึ้น สะดวกในการขนย้ายและการเก็บรักษา เหมาะที่จะใช้ในครัวเรือนเพื่อการหุงต้ม หรือเพื่ออุตสาหกรรมในครัวเรือน บางอย่างที่ต้องใช้ถ่านไม้ หรือ ฟืนเป็นเชื้อเพลิง ได้มีการศึกษาพบว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็งแล้วมีข้อได้เปรียบกว่าเชื้อเพลิงไม้ 5 ประการ (กรมป่าไม้ ส่วนข้อมูลกลางสำนักสารนิเทศ, 2540) ดังนี้

- 1) เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณความร้อนของวัสดุต่อหน่วยปริมาตร
- 2) แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สะดวกต่อการเก็บ การนำมาใช้งาน และการขนส่ง
- 3) แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีขนาดและคุณภาพเหมือนกัน

- 4) เป็นวิธีการช่วยแก้ปัญหาในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้ง
- 5) เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยลดการตัดต้นไม้ทำลายป่าโดยใช้เชื้อเพลิงทดแทนฟืนและถ่านไม้

2.7 เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Fuel Briquettes)

เชื้อเพลิงอัดแท่ง คือ การนำชีวมวลมาผลิตเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) เชื้อเพลิงเขียว เป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาอัดขึ้นรูปให้มีความหนาแน่นมากขึ้นดังรูปที่ 2.5 และมีลักษณะเป็นแท่งเหมาะแก่การใช้งาน สามารถจุดติดไฟและลุกไหม้ได้เป็นเวลานานขึ้น เช่น เชื้อเพลิงเขียวจากขี้เลื่อย เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แท่งเชื้อเพลิงเขียวที่อัดจากแกลบ

ที่มา : ภัทรานิตย์ แซ่สม (2545)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

- 2) ถ่านอัดแท่ง เนื่องจากสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงเขียวที่ผลิตได้นั้นไม่เหมาะสมในการใช้ในครัวเรือนที่ชุมชนหนาแน่นและภาคอุตสาหกรรมเพราะมีควันมากในขณะเผาไหม้ อีกทั้งยังมีข้อดีน้อยกว่าฟืนและถ่านไม้ ทั้งในด้านของความร้อนที่ต่ำกว่า ปริมาณเถ้าที่มากกว่า และระยะเวลาลุกไหม้ที่สั้นกว่า จึงมีการผลิตถ่านอัดแท่งดังรูปที่ 2.6 โดยการเผาเศษวัสดุให้เป็นถ่านดำก่อนแล้วจึงนำเศษถ่านดำนั้นมาอัดเป็นแท่งหรือนำเชื้อเพลิงเขียวที่อัดเป็นแท่งแล้วมาเผาให้เป็นแท่งถ่าน เช่น ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ถ่านอัดแท่ง

ที่มา : ญัฐวัฒน์ คลังทรัพย์ และคณะ (2546)

2.8 การอัดแท่งเชื้อเพลิง

2.8.1 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง

เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบ่งตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ (อาภาวดี เบ็ญจมาธรรกุล, 2546) ดังนี้

2.8.1.1 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston press) สามารถอัดได้ 40 - 1,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่มีปัญหาในเรื่องการขัดสีของกระบอกสูบและการแตกของลูกสูบ

2.8.1.2 เครื่องอัดแบบเกลียว (Screw press) แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1) แบบเกลียวกรวย (Conical screw press) สามารถอัดได้ 500 - 1,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นร้อยละ 8 - 10

2) แบบเกลียวคู่ (Twin screw press) สามารถอัดได้ 2,800 - 3,600 กิโลกรัมต่อชั่วโมงความชื้นร้อยละ 25

3) แบบเกลียวพร้อมขดลวดความร้อน (Screw press with heated die) อุณหภูมิขดลวด 200 - 350 องศาเซลเซียส สามารถอัดได้ 50 - 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นร้อยละ 8 - 12

2.8.1.3 เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) การอัดแบบนี้ต้องการวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าใช้เครื่องอัดอื่น และได้ความหนาแน่นน้อย จึงเหมาะกับการอัดที่ใช้ตัวประสานเครื่องอัดเม็ด หรืออัดเป็นแท่งเล็ก ๆ (Palletizing Press) ประกอบด้วยพิมพ์ (Matrix) และลูกกลิ้ง (Roller) ซึ่งแรง

เสียดสีของพิมพ์และลูกกลิ้งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและอัดวัสดุผ่านพิมพ์ ปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอัดขนาด 5 - 15 เซนติเมตร ยาวกว่า 30 มิลลิเมตร

2.8.2 การอัดแท่งเชื้อเพลิง

การอัดแท่งเชื้อเพลิงที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีทำได้ 3 วิธี ดังนี้

การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้ความร้อน (อัดร้อน)

การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบใช้ความร้อน จะใช้แรงอัดสูงและมีการให้ความร้อนแก่กระบอกอัด ทำให้สารประกอบพวกเซลลูโลส ลิกนิน และคาร์โบไฮเดรตในวัสดุที่นำมาอัดหลอมละลายออกมาเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้วัสดุเกาะตัวกันได้ดีเป็นแท่ง ไม่ร่วน โดยวัสดุที่สามารถอัดด้วยวิธีนี้ได้แก่ แกลบ ขี้เลื่อย และเศษไม้ (ณัฐพร ดำรงโรจน์วัฒนา, 2546) โดยต้องนำวัสดุเหล่านี้ไปให้ความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 และต้องบดให้มีขนาดเล็กก่อน จึงนำมาเข้าเครื่องเพื่ออัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง

การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน (อัดเย็น)

การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน จะใช้แรงในการอัดที่อุณหภูมิต่ำ โดยวัสดุที่นำมาอัดแท่งต้องมีเส้นใยและความเหนียวที่ทำให้เกิดการยึดติดกันเป็นแท่งได้ สำหรับพืชที่มียางเหนียว (Sticky materials) เช่น เพคติน เจลาติน ลิกนิน และเรซิน จะใช้การตำหรือกระทุ้งพืชที่สับแล้วจนเกิดเป็นยางเหนียว ๆ ทำให้เกาะกันเป็นแท่งได้ สำหรับพืชที่ไม่มีเส้นใยหรือยางเหนียวพอจะต้องเติมตัวเชื่อมประสานเข้าไปเพื่อให้จับตัวกันเป็นแท่งได้ การอัดเย็นนี้ต้องบดวัสดุที่จะนำมาอัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อน แล้วจึงนำมาอัดเป็นแท่งและต้องนำไปตากแดด หรือทำการอบเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อนจะสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบใช้ตัวประสาน และไม่ใช้ตัวประสาน ดังนี้

1) การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน (มีตัวประสาน)

ตัวประสานจะช่วยให้วัสดุยึดเกาะกันด้วยแรงอัดปานกลาง และรวมกันเป็นแท่งได้ดีขึ้น ซึ่งตัวประสานมีคุณสมบัติดังนี้

- มีความสามารถในการประสานดี มีราคาถูก
- สามารถเผาไหม้ได้หรือลุกติดไฟได้ดี และไม่เกิดควัน
- เมื่อถูกอากาศภายนอก จะต้องไม่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงอัดแตกร่วน หรืออ่อนตัวเกินไป

ตัวประสานที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งมัน กากน้ำตาล ผักตบชวาหมัก วัสดุเหล่านี้สามารถนำมาเป็นตัวประสานได้เนื่องจากมีลักษณะเหนียวเกาะตัวกันได้ดี เมื่อนำไปผสมกับวัสดุที่ไม่เกาะตัวกันจะสามารถทำให้วัสดุเหล่านั้นเกาะตัวกันได้ดี

2) การอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบไม่ใช้ความร้อน (ไม่มีตัวประสาน)

วิธีการอัดนี้จะใช้อุณหภูมิและแรงอัดต่ำ สามารถทำได้กับวัสดุชีวมวลที่เน่าเปื่อย หรือผ่านการหมักแล้วเท่านั้น เนื่องจากการหมักชีวมวลทำให้เส้นใยหรือเนื้อเยื่ออ่อนตัวและสร้างสารที่เป็นยางเหนียวทำให้พลังงานที่ใช้ในการอัดลดลง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าการอัดด้วยวิธีอื่น ๆ การอัดวิธีนี้ถ้าวัตถุดิบที่ใช้เป็นพืชที่ไม่ผ่านการหมักหรือไม่มีสารที่เป็นยางเหนียวจะไม่สามารถทำการอัดแท่งนั้นได้ผล และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการหมักอยู่ที่ร้อยละ 50 - 60 อย่างไรก็ตามการหมักวัสดุชีวมวลจะทำให้ลดความสามารถในการติดไฟของวัสดุลงเชื้อเพลิงที่ได้จึงมีค่าความร้อนต่ำ

เทคนิคการอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)

การอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) หรือ การอัดผ่านเกลียว หรือ การอัดพอง โดยใช้อุปกรณ์เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสม (Mixing) การนวด (Kneading) การเนียน และการขึ้นรูป

1) หลักการของเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน วัตถุดิบและส่วนผสมต่าง ๆ จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แล้วลำเลียงผ่านสกรูลำเลียง (Screw conveyor) โดยสกรูจะทำหน้าที่ลำเลียงส่วนผสมตามแนวยาวของสกรูโดยอยู่ในช่องว่างระหว่างเกลียวสกรู ระหว่างการลำเลียงจะเกิดการผสม (Mixing) และการนวด (Kneading) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้ส่วนผสมเกิดความร้อน ขณะที่ส่วนผสมเคลื่อนที่จะมีแรงอัดเพิ่มขึ้น ผ่านหน้าพิมพ์ (Die) ได้ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดต (Extrudate)

2) ข้อดีของเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) เช่น ใช้แรงงานในการผลิตน้อยได้กำลังการผลิตสูง เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง รวมถึงได้ผลผลิตสูงแต่มีปริมาณของเสีย (Waste) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้อย (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2555)

2.8.3 การตากแห้งแช่แข็งเชื้อเพลิง

ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะใช้วัสดุที่มีความชื้นสูง (สูงกว่า 100 เปอร์เซ็นต์) เช่น กากตะกอนน้ำเสียชุมชน ดังนั้นก่อนนำไปใช้ต้องทำให้แห้ง วิธีการที่สะดวกและประหยัด สำหรับใช้ในงานในครัวเรือนทั่วไป คือ การตากแดด หรือตากลมในที่ร่ม ซึ่งอาจตากบนพื้นซีเมนต์ หรือบนกระเบื้องลอนเล็กเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ หรือตามความเหมาะสม และความชื้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้อัดแท่งเชื้อเพลิง นอกจากการตากแดดหรือตากลมในที่ร่มแล้ว ตามโรงงานอุตสาหกรรมที่มีงบประมาณเพิ่มขึ้นอาจจะใช้วิธีทำให้แห้ง (อาภาวดี เบ็ญจมาธารกุล, 2546) ดังนี้

- 1) อบในตู้อบแสงอาทิตย์
- 2) อบด้วยความร้อนจากเตาเผาขยะ

3) ไปด้วยความร้อนที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

4) ไปด้วยความร้อนจากเครื่องทำความร้อน

ซึ่งวิธีต่าง ๆ ข้างต้นจะทำให้แห้งเชื้อเพลิงแห้งได้เร็ว และแห้งอย่างทั่วถึง เมื่อนำไปใช้งาน จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า แต่ก็ต้องใช้ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

2.8.4 การเก็บรักษาแห้งเชื้อเพลิง (วานิช โสภาสพ, 2549)

2.8.4.1 การตัดให้เป็นแห้ง

การตัดให้เป็นแห้งเพื่อให้ดูสวยงามและสะดวกในการหีบห่อ การตัดควรทำหลังตากแห้งเรียบร้อยแล้ว โดยใช้มีดคม ๆ หรือใบมีดคัตเตอร์ตัดเป็นท่อน ๆ ตามต้องการ หรือหากต้องการการตัดเป็นจำนวนมาก ๆ อาจใช้เครื่องตัดได้

2.8.4.2 การบรรจุหีบห่อ

การบรรจุหีบห่อ ถ้าเก็บไว้ในที่มีความชื้นสูงจะทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีราขึ้นจึงต้องทำการเก็บแห้งเชื้อเพลิงไว้ในที่แห้ง โดยการใส่ในถุงพลาสติกแล้วปิดปากถุงให้สนิท ซึ่งจะใช้ถุงเล็กหรือถุงใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการเก็บไว้ใช้ และตามความสะดวก ข้อสำคัญ คือ ต้องเก็บแห้งเชื้อเพลิงไว้ในที่แห้ง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา

2.8.5 คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิง

การประเมินคุณภาพและคุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้องค์ประกอบสำคัญของแห้งเชื้อเพลิงเป็นหลักในการประเมิน (ประทีป ปิ่นท้วม, 2538) ดังนี้

1) ปริมาณความชื้น (Moisture content) คือ ปริมาณความชื้นต่อปริมาณของเนื้อเชื้อเพลิงอัดแห้งอบแห้ง ความชื้นมีผลทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแห้งลดลงและทำให้เชื้อเพลิงอัดแห้งแตกร่วนได้ง่าย

2) ปริมาณเถ้า (Ash content) คือ ส่วนของสารอินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาปภายในเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น

3) ของแข็งที่ระเหยได้ (Volatile matter) ปริมาณสารระเหย คือ ส่วนของเนื้อเชื้อเพลิงอัดแห้งแห้งที่ระเหยได้ ซึ่งเป็นสารองค์ประกอบที่มีคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน

4) คาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) คือ มวลคาร์บอนที่เหลือในเชื้อเพลิงอัดแห้งหลังจากที่เอาสารระเหยออกหมดแล้วที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

5) กำมะถันรวม (Total sulfur)

6) ค่าความร้อน (Calorific value or heating value)

เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงจะต้องมีปริมาณคาร์บอนเสถียรเป็นองค์ประกอบอยู่สูง มีปริมาณสารระเหยได้และปริมาณเถ้าอยู่ต่ำ เชื้อเพลิงที่มีค่าความชื้นสูงจะมีผลทำให้ค่าความร้อนต่ำ เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี (ประทีป ปิ่นท้วม, 2538)

2.8.6 ข้อดีและข้อเสียของแท่งเชื้อเพลิง (ส่วนคั่นคว่ำและพัฒนาพลังงาน, 2544)

ข้อดีของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

- 1) มีขนาดและรูปร่างแบบเดียวกันสามารถใช้ป้อนเป็นเชื้อเพลิงในทางอุตสาหกรรมได้อย่างต่อเนื่อง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 - 60 มิลลิเมตร และยาว 50 - 150 มิลลิเมตร
- 2) มีคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือน
- 3) ปราศจากมลภาวะเนื่องจากไม่มีปริมาณกำมะถัน ฟอสฟอรัส และซีลีเนียมปล่อยออกมาจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมมลภาวะที่มีราคาสูง
- 4) มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์
- 5) สะดวกต่อการเก็บและนำมาใช้งาน

ข้อเสียของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

- 1) คุณสมบัติการเผาไหม้ยังไม่เป็นที่น่าต้องการ เช่น การลุกไหม้ไม่ดี จุดติดยากและมีควันมาก
- 2) เชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อถูกน้ำหรืออากาศที่มีความชื้นสูงมักจะแตกกร่อน

2.9 การเผาแท่งเชื้อเพลิงให้เป็นถ่าน

2.9.1 การเผาให้เป็นถ่านหรือกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนให้กับแท่งเชื้อเพลิง โดยให้ความร้อนแก่แท่งเชื้อเพลิงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส โดยปราศจากอากาศ และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยไม่ให้อากาศเข้าไป ซึ่งการคาร์บอนไนซ์มี 4 ขั้นตอน (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) ดังนี้

- 1) การไล่ความชื้น เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิบรรยากาศจนถึง 180 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ชีวมวลจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free water) และน้ำที่อยู่

ในผนังเซลล์ (Bound water) คิว้นที่ออกมาจะมีสีขาวปนน้ำเงินอ่อนซึ่งจะมีแต่ไอน้ำ ไม่มีกลิ่นฉุน ไม่แสบตาและจุมก

2) การไล่สารระเห็ด เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิประมาณ 180 - 270 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) จะสลายตัวออกมาจนไปหมดที่อุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส เต่าเผาถ่านที่ดีจะรักษาอุณหภูมิระดับนี้ไว้นานและใกล้เคียงกันทั่วทุกจุดของเต่า คิว้นที่ออกมาในช่วงนี้จะเริ่มมีสีจาง ๆ เจือปนอยู่ด้วย และมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) กรดน้ำส้ม (Acetic acid) และเมธานอล (Methanol) เจือปนออกมากับคิว้นด้วย แต่มีปริมาณต่ำมากนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้

3) การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน อุณหภูมิจะอยู่ประมาณ 270 - 400 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ชีวมวลสลายตัวด้วยตัวเองจากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) อันเกิดจากความร้อนที่สะสมไว้ เซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 275 องศาเซลเซียส คิว้นที่ออกมาจะมีสีขาวปนเหลือง มีกลิ่นฉุนจัด สามารถติดไฟได้ การดักเก็บน้ำส้มคว้นไม้ที่มีคุณภาพ จะทำได้ในช่วงนี้ ลิกนิน (Lignin) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 310 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส หลังจากกระบวนการนี้ชีวมวลจะกลายเป็นถ่านทั้งหมดแล้ว

4) การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ แม้ว่าชีวมวลจะกลายเป็นถ่านแล้วที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส แต่ยังคงมีน้ำมันดินในปริมาณที่สูง เมื่อนำไปใช้ปิ้งย่าง น้ำมันดินที่เผาไหม้ในเต่าถ่านจะเกิดเป็นสารประกอบเบนโซไพเร็น (Benzopyrene) และไดเบนซานทราเซน (Dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงยังเป็ถ่านที่มีคุณภาพต่ำควรอบถ่านต่อไปที่อุณหภูมิในช่วง 500 - 600 องศาเซลเซียสต่อไปอีกระยะหนึ่งเพื่อไล่น้ำมันดินให้หมดไป

2.9.2 คุณภาพของถ่าน

คุณภาพของถ่านจะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ

1) ชนิดของชีวมวลที่ทำการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งชีวมวลเนื้อแข็งจะกลายเป็นถ่านเนื้อแข็ง เช่น ถ่านจากกะลามะพร้าว ชิวมวลเนื้ออ่อนจะกลายเป็นถ่านเนื้ออ่อน เช่น ถ่านจากขานอ้อย

2) ระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (อัตราเพิ่มอุณหภูมิ) การคาร์บอนไนซ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือใช้ระยะเวลาสั้น หรือมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จะได้เนื้อถ่านที่มีความแกร่งน้อย และการคาร์บอนไนซ์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และใช้ระยะเวลามาก หรือมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ จะได้ถ่านที่มีความแกร่งมาก ความแกร่ง หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช้ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ ซึ่งความแกร่งของถ่าน

วัดได้จากการทดสอบความแกร่ง (Hardness Tester) โดยมีระดับความแกร่งเป็นสเกลความแข็งของโมห์ (Moh 's scale of hardness)

3) การควบคุมอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อคุณภาพของถ่าน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในชีวมวล หรือเซลลูโลสและลิกนินจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเหลืออยู่ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อถ่านมาก หรือน้ำหนักของถ่านมาก มีปริมาณน้ำมันดินและก๊าซที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ต่ำ ขณะที่การคาร์บอนไนซ์อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินจะสลายไปเกือบหมด ทำให้ถ่านที่ได้จะมีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อถ่านน้อย หรือน้ำหนักของถ่านน้อย มีปริมาณน้ำมันดินและก๊าซที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์สูง (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

ถ่านที่มีค่าความร้อนสูงถือว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดี แต่สำหรับการใช้ถ่านเพื่อการหุงต้มในครัวเรือนนั้น ถ่านที่ถือว่ามีคุณภาพดีที่สุดในปัจจุบันต้องเป็นถ่านที่มีค่าความร้อนสูงสุด แต่จะต้องมีคุณสมบัติที่ดีของถ่านทางด้านอื่น ๆ ด้วย (ธัญชัย ระวังวงศ์ และธีรพงศ์ จันทะเดช, 2538) ดังนี้

1) การแตกปะทุขณะติดไฟ ถ่านที่แตกปะทุขณะติดไฟจะไม่ใช่ที่ต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นถ่านที่มีคุณภาพดีจะต้องไม่มีการแตกปะทุเลย หรือมีการแตกปะทุบ้างเล็กน้อยในช่วงแรกที่ติดไฟ

2) น้ำหนักถ่าน ถ่านที่มีน้ำหนักจะลุกไหม้ให้ความร้อนแรงได้นาน

3) ควัน ถ่านที่มีคุณภาพไม่ควรมีควันและกลิ่นฉุนในขณะลุกไหม้

4) ความแข็งและการป่นของถ่าน ถ่านที่มีความแข็งสูงจะช่วยลดการแตกหักหรือป่นเป็นผง ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน การขนส่ง และการเก็บรักษา

2.9.3 การใช้ประโยชน์จากถ่าน (Use of charcoal)

ถ่านมีการใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ถ่านไม้สนสีดำใช้สำหรับฟอกผ้า แอคติเวทคาร์บอน (Activated carbon) และถ่านจากกะลามะพร้าวใช้สำหรับดับกลิ่น เป็นต้น

นอกจากนี้ถ่านยังมีประโยชน์ทางเกษตร เช่นปรับปรุงสภาพดิน ดูดซับสารเคมีทางการเกษตร ปุ๋ยส่วนเกินและสามารถใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยสัตว์ เช่น ถ่านไม้สนสีดำเมื่อถูกบดเป็นผงแล้วนำไปผสมกับอาหารใช้เลี้ยงสัตว์เพื่อรักษาโรคเกี่ยวกับอวัยวะในการย่อยอาหาร ช่วยในการหมักหญ้าเพื่อใช้เป็นอาหาร ประโยชน์ในการก่อสร้าง เช่น ควบคุมความชื้นภายในอาคาร และประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น การขจัดกลิ่นของขยะ ยาดับกลิ่นภายในตู้เย็น เป็นต้น (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2.10 เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

เทคนิคพื้นผิวตอบสนองหรือ RSM เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบสมการและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเทคนิคพื้นผิวตอบสนองมาใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบและตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.10.1 เทคนิค Plackett and Burman Design

เทคนิค Plackett and Burman Design เป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ใช้เพื่อคัดเลือปัจจัยต่าง ๆ (Screening Factors) โดยใช้โปรแกรม Design Expert ในการหาค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยพิจารณาจากค่า Standardized Effect หากมีค่าลบ แสดงว่าค่าที่ต่ำกว่าค่า Low level ที่กำหนดจะมีผลต่อค่าการตอบสนอง (Response) และหากค่า Standardized Effect มีค่าบวก นั้นหมายถึงค่าที่สูงกว่าค่า High level ที่กำหนดจะมีผลต่อค่าการตอบสนอง

2.10.2 เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง หรือ RSM เป็นการนำความรู้ในด้านต่าง ๆ มาใช้ร่วมกัน ได้แก่ การวางแผนการทดลอง (Experimental design) การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) และการสร้างแผนภาพแบบเส้นระดับ (Contour plot) ในการตรวจสอบหาความสัมพันธ์ในด้านต่าง ๆ ที่สนใจ โดยเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับค่าการตอบสนอง เพื่อแสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลการตอบสนองเมื่อระดับปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังสามารถใช้หาสูตรหรือสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัย หรือสามารถใช้เลือกจุดที่เหมาะสมได้จากผลการตอบสนองหลาย ๆ ปัจจัย เมื่อพิจารณาปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมกัน (ศกลธน ราโชภาณูจน์, 2556)

อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยวิธีการตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้นจำเป็นต้องมีฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่าง ๆ เป็นลำดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่าง ๆ เหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้น ๆ เช่น ลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่งมีแบบดังสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ y คือ ตัวแปรตามหรือผลตอบสนองของการศึกษา

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ คือ ค่าพารามิเตอร์

X_1, X_2, \dots, X_k คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษา

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการศึกษาผลตอบสนอง

สำหรับลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้สมการพหุนาม (polynomial) ที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second order) ซึ่งมีแบบดังสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i^K \sum_{j_{i < j}}^k \beta_{ji} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.2)$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตามหรือผลตอบสนองของการศึกษา

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{i < j}$ คือ ค่าพารามิเตอร์

$X_1, X_2, \dots, X_{i < j}$ คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษา

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการศึกษาผลตอบสนอง

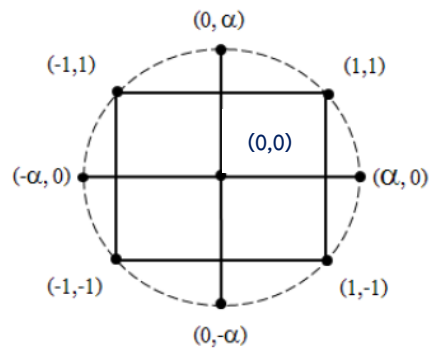
2.10.3 การออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

การออกแบบส่วนผสมกลางเป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ดังนี้

1) ตำแหน่งการทดลองของ 2^k แฟกทอเรียล เมื่อ k คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย เช่น ถ้า k ในที่นี้ คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย 2 ตัว ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ $(-1, 1)$ $(+1, -1)$ $(+1, +1)$ $(-1, +1)$

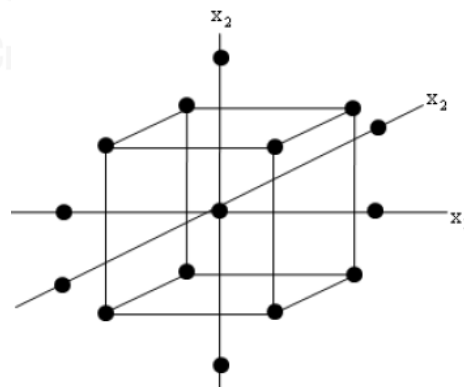
2) ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่เป็นแนว $+\alpha$ หรือ $-\alpha$ ในแนวแกนที่เรียกว่า star point $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$

3) ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่งที่เรียกว่า central point (ตำแหน่ง $0, 0$) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนของ CCD สำหรับการทดลองที่ 2 ปัจจัย
ที่มา : เสาวนีย์ นิลลักษณ์ (2551)

เพราะฉะนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ($k = 2$) จะมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น $2^k + (2k + 1) = 2^2 + 5 = 9$ การทดลอง โดยที่ $2k$ จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ $(-1, 1)$ $(+1, -1)$ $(+1, +1)$ $(-1, +1)$ และ $(2^k + 1)$ จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$ และ $(0, 0)$ ดังนั้น กรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 9 การทดลอง หรือกรณีสำหรับจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ($k = 3$) จะทำให้การออกแบบ $2^k + (2k + 1)$ มีทั้งหมด 15 การทดลอง ทำให้การทดลองนี้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การออกแบบ CCD สำหรับการทดลอง 3 ปัจจัย
ที่มา : เสาวนีย์ นิลลักษณ์ (2551)

2.10.4 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองถดถอยเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใด ๆ ในแต่ละช่วงได้โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Lest Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (2β) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียกค่า β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (วิรัชช พานิชวงศ์, 2545) โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่า ดังนี้

- 1) สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดโดยการคงค่าผลตอบสนอง
- 2) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่าง ๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
- 3) นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง

2.10.5 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนองจะทำการวิเคราะห์ 3 องค์ประกอบ ดังนี้

- 1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาจากค่า P-value

พิจารณาจากค่า P-value

ถ้า $P\text{-value} \geq 0.05$: จะยอมรับ H_0 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลการตอบสนอง

ถ้า $P\text{-value} \leq 0.05$: จะปฏิเสธ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับผลการตอบสนอง แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบสนอง

- 2) ทดสอบ *Lack of fit* เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โคนสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

พิจารณาจากค่า P-value

ถ้า $P\text{-value} \geq 0.05$: จะยอมรับ H_0 หมายความว่าแบบจำลองการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

ถ้า $P\text{-value} \leq 0.05$: จะปฏิเสธ H_0 หมายความว่าแบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

3) วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง โดยจะพิจารณาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ค่า Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองรอบเส้นถดถอย

- ค่า R-Squared (R^2) หรือสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนอง หรืออีกนัยหนึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลเพียงใด กล่าวคือ ถ้า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลมาก

- ค่า Adjusted R-Squared (Adj- R^2) หรือสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่าเนื่องจากข้อเสียของ R^2 คือ เมื่อจำนวนปัจจัยในแบบจำลองการถดถอยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นตามด้วย แต่การเพิ่มของจำนวนปัจจัยในแบบจำลองการถดถอยนั้นไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้จะมีความเหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นักสถิติจึงปรับค่า R^2 สำหรับหลาย ๆ ปัจจัย ด้วยการนำ Degree of freedom มาร่วมพิจารณาและเรียกค่า R^2 ที่ปรับใหม่นี้ว่าค่า Adj- R^2

- ค่า Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้ มีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ โดยที่แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

- ค่า Predicted R-Squared (Pred- R^2) หรือสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จากการทำนาย คือค่าที่แสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ที่ปัจจัยการศึกษามีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

2.10.6 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลอง

เป็นการตรวจสอบว่าปัจจัยที่ศึกษาใดบ้างที่อยู่ในรูปแบบจำลองถดถอยที่เลือกไว้ และมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง โดยสมมติฐานการทดสอบ คือ

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

พิจารณาจากค่า P-value

ถ้า P-value ≥ 0.05 : จะยอมรับ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง

ถ้า P-value ≤ 0.05 : จะปฏิเสธ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง

กรณีที่ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลการตอบสนองให้ตัดปัจจัยที่ศึกษานั้นออกจากแบบจำลองถดถอย แล้วทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองการถดถอยใหม่ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาค่า P-value ร่วมกับค่า VIF (Variance Inflation Factor) ด้วย

กล่าวคือ ถ้า P-value $\geq \alpha$ ขณะที่ค่า VIF ≤ 5 ไม่จำเป็นต้องตัดปัจจัยที่ศึกษานั้น ๆ ออกจากแบบจำลองการถดถอย แต่ถ้า VIF ≥ 5 แสดงว่าปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นจนไม่นำมาพิจารณา

2.10.7 การตรวจสอบความเหมาะสมแบบจำลองการถดถอย

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยว่ามีความเหมาะสมหรือไม่สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่อไปนี้

1) การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยโดยอาศัยค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกต Y_i และค่าประมาณ \hat{Y}_i บนเส้นถดถอย (Fitted or Predicted value) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ดังสมการที่ 2.3

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

เมื่อ

| | | |
|-------------|-----|-----------------------------------|
| e_i | คือ | ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการสังเกต |
| Y_i | คือ | ค่าสังเกต |
| \hat{Y}_i | คือ | ค่าประมาณ Y_i บนเส้นถดถอย |

2) การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา เป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพล (Influential observation) ที่มีผลกระทบต่อค่าประมาณสมการถดถอยโดยค่าสังเกตที่เป็นค่าสุดขีด (Extreme value) สำหรับปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ X) เรียกว่าจุด high leverage เมื่อค่า h_{ii} หรือค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i ดังสมการที่ 2.4

$$h_{ii} = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ h_{ii} คือ ค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i (คำนวณข้อมูลจาก n)
 x_i คือ ปัจจัยที่ศึกษาตัวที่ i

3) การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริงว่าเบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าไรเพื่อหาส่วนตกค้างที่มีค่ามากกว่าค่าอื่น (Outlier) จะพิจารณาค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองได้จากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ i และค่าความคลาดเคลื่อนปรับแล้วที่ i

4) การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล ค่าที่มีอิทธิพลเป็นค่าที่มีผลทำให้เส้นการถดถอยเบี่ยงเบนไปจากกรณีปกติหรือกรณีที่ไม่มีค่าอิทธิพล ค่าที่มีอิทธิพลที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่คำนวณได้เปลี่ยนไป ดังนั้นหากทราบว่าค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษาหรือค่าจากผลตอบสนอง ควรพิจารณาต่อไปว่าค่าผิดปกตินั้นเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่

2.10.8 การทดสอบและยืนยันผล

เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมโดยนำสมการถดถอยมาหาค่าหรือสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบสนองภายใต้เงื่อนไขหรือขอบเขตที่กำหนดไว้ จะทำให้ได้แผนในการกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลอง (Run) จากนั้นนำแผนที่ได้มาทำการทดลองผลิตแห่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะได้อาตอบสนองจากการทดลองหรือค่าตัวแปรอิสระ (Response variable) และทำการพิสูจน์สมการถดถอยโดยใช้จุดที่อยู่บริเวณช่วงที่เหมาะสมของค่าตอบสนองเพื่อนำไปทดลองอีกครั้ง แล้วทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อหาค่าความแตกต่างของค่าตอบสนองที่ได้จากการทดสอบจริง และค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลอง เพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการใหม่

2.11 การประเมินราคาต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

วิธีคำนวณราคาต้นทุนในการผลิต ประกอบด้วย

1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วยค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น แกลบบด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าขนส่งวัตถุดิบ โดยไม่คิดค่าลงทุน อุปกรณ์ในการผลิต และค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้จะประเมินเป็นราคาต้นทุนต่อกิโลกรัมของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน และหน่วยวิจัยและพัฒนาโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา, 2540) พบว่าในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาควรใช้แกลบเป็นส่วนผสมด้วยเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหรือช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่แท่งเชื้อเพลิง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าความร้อนได้ อย่างไรก็ตามอัตราส่วนผสมของแกลบไม่ควรเกิน 50 % นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมแกลบในอัตราส่วน 25 % มีความเหมาะสมมากที่สุด

(พลกฤษณ์ จิตต์โต, 2542) ได้วิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนสี่พระยาพบว่าที่ความชื้น 3.8 % กากตะกอนมีค่าความร้อน 11,352 kJ/kg (2,713 kcal/kg.) ความหนาแน่น 0.526 kg/m³ มีเถ้า 48.9 % คาร์บอน 27.78 % ไฮโดรเจน 3.85 % ไนโตรเจน 4.73 % ออกซิเจน 14.16 % ซัลเฟอร์ 1.48 %

(ทองทิพย์ พูลเกษม, 2542) ได้นำเอาแกลบซึ่งเป็นผลิตผลพลอยที่ได้จากการสีข้าวซึ่งมีความร้อนสูงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีนำมาผลิตเป็นแท่งผืนแกลบซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 1.3 กิโลกรัม ซึ่งใช้เวลาในการผลิตแท่งละ 30 - 50 วินาที และใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 0.12 กิโลวัตต์ต่อแท่ง แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณลักษณะสม่ำเสมอ มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเรียงเป็นกองสูงได้ นอกจากแกลบแล้วยังมีการนำวัสดุเหลือใช้อื่น ๆ มาอัดเป็นเชื้อเพลิงแท่งอีก เช่น แท่งฟืนขี้เลื่อย แท่งฟืนไม้แสม เป็นต้น ดังแสดงคุณสมบัติของฟืนอัดแท่งในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของฟืนอัดแท่งจากวัสดุต่าง ๆ

| คุณสมบัติ | แท่งฟืน | | แท่งฟืน |
|------------------------|----------|--------------|-----------|
| | จากแกลบ | จากขี้เลื่อย | จากไม้แสม |
| ค่าความร้อน (kcal/kg.) | 4,300.00 | 4,820.00 | 4,390.00 |

ที่มา : สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2546)

(ณัฐพร ดำรงโรจน์วัฒนา, 2546) ได้ทำการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ต้นธูปฤาษี และใบกระถินณรงค์ โดยทำการแบ่งกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็น 3 แบบ คือ กากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ กากตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศ และกากตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักแบบใช้อากาศ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจากโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาพบว่า กากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและกากตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักแบบไร้อากาศและใช้อากาศมีค่าความร้อน 2,326 kcal/kg, 1,427 kcal/kg, และ 2,234 kcal/kg. ตามลำดับ และมีองค์ประกอบต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.7 และกากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมีค่า C/N ratio เท่ากับ 1.50

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอน

| คุณสมบัติ | กากตะกอนไม่ปรับปรุงคุณภาพ | | กากตะกอนหมักแบบไม่ใช้อากาศ | | กากตะกอนหมักแบบใช้อากาศ | |
|-------------------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | Wet | Dry | Wet | Dry | Wet | Dry |
| ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) | 9.15 | - | 38.29 | - | 7.0 | - |
| ปริมาณเถ้า (ร้อยละ) | 42.02 | 46.27 | 31.26 | 50.66 | 46.2 | 49.68 |
| ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ) | 42.97 | 47.30 | 26.57 | 43.06 | 41.3 | 44.41 |
| ปริมาณคาร์บอน | 5.84 | 6.43 | 3.88 | - | 5.5 | - |

| | | | | | | |
|---------------------------|----------|---|----------|------|----------|------|
| คงตัว (ร้อยละ) | | | | | | |
| ปริมาณกำมะถันรวม (ร้อยละ) | 1.38 | - | 0.94 | 6.29 | 0.97 | 5.91 |
| ค่า ความร้อน (kcal/kg.) | 2,326.00 | | 1,427.00 | | 2,234.00 | |

ที่มา : กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรเคมี (2546)

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่ากากตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักทั้งสองแบบมีค่าความร้อนลดลง แต่มีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยและปริมาณกำมะถันรวมมีค่าลดลง เนื่องจากสารอินทรีย์และกำมะถันในกากตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยปริมาณกำมะถันในกากตะกอนที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักทั้ง 2 แบบ มีค่าลดลงประมาณร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

(นารา พิทักษ์อรณพ, 2542) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและวัสดุเหลือใช้จากโรงงานต่าง ๆ เช่น แกลบ ชี้เลื่อย กากอ้อย เปลือกถั่ว ชูมะพร้าว ใบไม้แห้ง เป็นต้น โดยนำวัสดุดังกล่าวมาผึ่งแดดให้แห้งประมาณ 1 สัปดาห์ มีความชื้นประมาณร้อยละ 10 บดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วอัดแท่งด้วยเครื่องอัดระบบใช้ความร้อนประมาณ 1 แท่งต่อนาที หรือประมาณ 500 ท่อนต่อวัน (วันละ 8 ชั่วโมง) เชื้อเพลิงที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร มีความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ย 1.3 กิโลกรัมต่อแท่ง พบว่าสามารถใช้แทนฟืนได้ดี นอกจากนี้ยังใช้ทนนานกว่าฟืนเพราะมีความหนาแน่นสูงกว่าฟืนจากไม้ และเมื่อนำไปเผาเป็นถ่านแบบวิธีที่ชาวบ้านผลิตถ่านไม้จะได้ถ่านซึ่งให้ความร้อนสูงกว่าถ่านไม้ที่ใช้ทั่ว ๆ ไป

(กาญจนา บุญยเกียรติ และเพียรพรรค ทศกร, 2544) ได้ศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ 3 ชนิด คือ แกลบ ชี้เลื่อย และชานอ้อย มาทำเป็นเชื้อเพลิงโดยการบดแล้วอัดเป็นก้อนเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และใช้ตัวเชื่อมประสาน ได้แก่ ชี้ฝ้างและแป้งเปียก พบว่าชี้เลื่อยและชานอ้อยสามารถนำมาอัดให้ติดกันเป็นก้อนได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเชื่อมประสาน ส่วนแกลบต้องใช้ตัวเชื่อมประสานหรือผสมกับชี้เลื่อยหรือชานอ้อยจึงจะติดกันเป็นแท่งได้ หลังจากเก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกอย่างน้อย 2 เดือนแล้วนำมา

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงและคุณสมบัติต่าง ๆ พบว่าแท่งเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบและชานอ้อยมีการแตก่วนน้อยที่สุดที่ร้อยละ 1.5 และซีลี้อยมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดที่ร้อยละ 6.2 สำหรับคุณสมบัติในการเผาไหม้นั้นแท่งเชื้อเพลิงเกือบทุกชนิดทำให้น้ำเดือดได้เร็วกว่าถ่านไม้แต่มีควันมากเมื่อเริ่มลุกไหม้

(กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544) ได้ทำการศึกษาการนำถ่านแกลบอัดแท่งมาปรับปรุงคุณภาพและการผลิต โดยนำเศษถ่านแกลบอัดแท่งของโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตถ่านแกลบอัดแท่งที่ไม่สามารถอัดขึ้นรูปใหม่ให้เป็นแท่งได้ พบว่าเศษถ่านแกลบนี้ได้ผ่านการอบไล่ความชื้น และสารระเหยต่าง ๆ ไปหมดแล้ว องค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน และถ้ำตั้งนั้น ในการนำเศษถ่านแกลบอัดแท่งมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกจะต้องใช้ตัวประสานต่าง ๆ เช่น กากน้ำตาล เนื้อมันสำปะหลัง ผักตบชวาหมัก และน้ำเพื่อช่วยในการยึดเกาะรูปให้คงรูปเป็นแท่งได้ จากการทดลองส่วนผสมต่าง ๆ พบว่า ตัวประสานที่จะนำมาช่วยในการอัดขึ้นรูปเป็นแท่งได้ดีนั้นมีอัตราการผลิตเฉลี่ยประมาณ 50 กิโลกรัมต่อวัน (น้ำหนักแห้ง) ทั้งนี้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวประสานและอัตราส่วนผสม คือ เมื่อผสมเศษถ่านแกลบอัดแท่ง : กากน้ำตาล ในอัตราส่วนผสม 3 : 1 โดยน้ำหนักที่ความชื้นร้อยละ 25 สามารถอัดเป็นแท่งได้และมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,498.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม เมื่อใช้อัตราส่วนผสมเศษถ่านแกลบอัดแท่ง : กะลามะพร้าว : กากน้ำตาล : น้ำ เท่ากับ 3 : 2 : 1 : 1.02 โดยน้ำหนักที่ความชื้นขณะอัดแท่งเท่ากับร้อยละ 19 มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 5,682.80 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม มีเถ้าร้อยละ 14.67 สารระเหยร้อยละ 29.92 และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 55.40 และเมื่อใช้อัตราส่วนผสม เศษถ่านแกลบอัดแท่ง : ผักตบชวาหมัก : น้ำ เท่ากับ 1 : 1 : 0.73 มีค่าความร้อน 4,295.60 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยความชื้นในการอัดแท่งและปริมาณเถ้าสูงสุดร้อยละ 70 และร้อยละ 33.71 ตามลำดับ

(สุรียา ชัยเทพชยากุล, 2544) พบว่ากากตะกอนที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียมีการเกาะตัวเป็นแผ่นหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร สามารถปั้นเป็นรูปทรงได้ นั้นแสดงว่าสามารถนำกากตะกอนไปอัดเป็นแท่งได้และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานได้ด้วย เมื่อดากแห้งแล้วนำไปผ่านร่องตะแกรงร้อนพบว่าส่วนใหญ่ร้อยละ 80 มีขนาด 100 mesh และเมื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงพบว่าให้ค่าความร้อนประมาณ 2,817.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถนำกากตะกอนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง และได้ทำการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาผสมกับเศษชิ้นไม้สับจากการสับไม้ก่อนเข้า

ขบวนการผลิตเยื่อกระดาษจำนวน 11 อัตราส่วนผสม ได้แก่ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90 และ 0 : 100 โดยน้ำหนักแล้วอัดเป็นแท่งเผาให้เป็นถ่านเชื้อเพลิง แล้วทำการศึกษาคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิง และศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตและการลงทุนพบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนและชิ้นไม้สับตั้งแต่ 100 : 0 ถึง 40 : 60 โดยน้ำหนักสามารถอัดเป็นรูปแท่งได้ โดยส่วนผสมที่มีเศษชิ้นไม้สับเพิ่มขึ้นจะอัดเป็นรูปได้ยากขึ้น ใช้เวลาในการอัดมากขึ้น เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อน ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว กำมะถันรวม และค่าความร้อน แล้วพบว่า อัตราส่วนผสม 70 : 30 มีคุณสมบัติดีที่สุด โดยมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฟืนแกลบ เมื่อศึกษาด้านการลงทุนพบว่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนอยู่ที่ร้อยละ 30.73 ณ ราคาขาย 9 บาท/กิโลกรัม และหากนำไปผลิตเป็นถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจะให้ค่าตอบแทนสูงกว่าการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา

(อำนาจ สรชาติ, 2546) ได้รายงานผลการผลิตถ่านจากชี้เลื่อยอัดและรายงานผลจากการทดลองทำการผลิตพบว่า คุณภาพในการติดไฟของถ่านจากชี้เลื่อยอัดนั้นจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าและติดไฟนานกว่าถ่านไม้โดยทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากชี้เลื่อยอัดมีความหนาแน่นสูงกว่าไม้ ส่วนกรรมวิธีในการทำถ่านจากชี้เลื่อยอัดนั้นทำโดยอัดชี้เลื่อยให้เป็นแท่งก่อนโดยใช้เครื่องจักรชนิดเกลียวหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าจากนั้นนำไปเผาเป็นถ่าน ซึ่งปรากฏว่าสามารถคงรูปร่างเดิมอยู่ได้ไม่แตกร่วนเหมือนกับถ่านไม้ และจะสูญเสียน้ำหนักไปประมาณครึ่งหนึ่งของแท่งเชื้อเพลิงก่อนเผา เมื่อนำถ่านจากแท่งชี้เลื่อยอัดไปทดลองใช้ในการหุงต้มปรากฏว่าให้ความร้อนสูงกว่าถ่านไม้

(ภัทรานิตย์ แข็งสม, 2546) จากการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับใบกระถินณรงค์และธูปฤาษีทั้งหมด 11 อัตราส่วนพบว่า อัตราส่วนกากตะกอน : ใบกระถินณรงค์ และอัตราส่วนกากตะกอน : ธูปฤาษีที่อัตราส่วน 1 : 1, 1 : 2 และ 1 : 3 สามารถอัดเป็นแท่งได้ จึงได้เลือกนำทั้ง 3 อัตราส่วนนี้ทำการทดลองต่อ และจากการทดลองยังพบว่ากากตะกอนที่นำมาอัดแท่งนั้นควรมีความชื้นที่ร้อยละ 60 มีความเหมาะสมในการอัดแท่งมากที่สุด

(อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ, 2551) ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากชี้แกลบผสมขังข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กทูลูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน ที่สัดส่วน 30 : 70, 40 : 60 และ 50 : 50 ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนการผสมแป้งมันต่อน้ำหนักวัตถุดิบเท่ากับ 1 : 10 พบว่าค่าความหนาแน่นและค่าความทนแรงอัดจะแปรผันตามสัดส่วนการผสมขังข้าวโพดและผงกะลามะพร้าว มีค่าเฉลี่ยพลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 6,000.00 - 9,000.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

(เกรียงไกร วงศาโรจน์, 2554) ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลของต้นสบู่ดำ โดยใช้ลำต้นและกิ่งของสบู่ดำผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง และขี้ข้าวโพดในอัตราส่วน 70 : 10, 65 : 20, 55 : 30, 45 : 40, 70 : 10, 60 : 20, 50 : 30 และ 40 : 40 ตามลำดับ โดยใช้ตัวประสาน 2 ชนิด คือ แป้งเปียกและกากน้ำตาลที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อตัวประสาน 80 : 15 และ 85 : 20 พบว่าค่าพลังงานความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสบู่ดำ และที่อัตราส่วนผสมเดียวกันแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานจะให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน โดยอัตราส่วนที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด คือ แก๊สเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบมีแป้งเปียกเป็นตัวประสานที่อัตราส่วน 65 : 20 : 15 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 3,468.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

(ศกลธน ราโชกาญจน์, 2556) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพ่นผิวตอบสนอง (RSM) พบว่าเมื่อใช้ต้นข้าวโพดต่อขี้ข้าวโพดต่อตัวประสานที่อัตราส่วน 7.5 : 1.5 : 2 จะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุดที่ 0.3556 MPa และทำการคาร์บอนซ์แก๊สเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาทีจะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่ให้ค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ 4,650.25 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และร้อยละ 39.74 ตามลำดับ อีกทั้งการใช้วิธีการพ่นผิวตอบสนอง (RSM) ในการคัดเลือกปัจจัยจะทำให้ได้ช่วงค่าสูง - ต่ำที่ละเอียดกว่า และสามารถทำนายค่าการทดลองที่จะเกิดขึ้นได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจากการทดลองที่ได้ว่ามีความต่างกันทางนัยสำคัญหรือไม่

(Slupek, 2000) ได้วิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนในประเทศโปแลนด์ พบว่ากากตะกอนหมักอัดแห้งที่ความชื้นที่ร้อยละ 15 จะให้ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ประมาณ 10 MJ/Kg (2,390.00 kcal/kg.) และมีค่าความร้อนสูง (HHV) ประมาณ 12 MJ/Kg (2,868.00 kcal/kg.) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Brown Coal อีกทั้งเมื่อทำการเผาก็ไม่ก่อให้เกิดก๊าซ SO₂ ออกสู่บรรยากาศ

(Muller and Dietrich, 2000) ได้ศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดแห้งจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนผสมกับเศษใบไม้แห้งหรือส่วนของเศษใบไม้ที่เหลือจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้กากตะกอน 0.3 - 0.6 ส่วน ต่อเศษใบไม้ 1 ส่วน และกากตะกอน 0.6 - 1.0 ส่วนต่อส่วนของเศษใบไม้ที่เหลือจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย 1 ส่วน พบว่าเศษใบไม้และส่วนของเศษใบไม้ที่เหลือจากการสกัดด้วยตัวทำละลายจะช่วยลดความชื้นในกากตะกอนได้ดี เชื้อเพลิงอัดแห้งที่ได้มีค่าความร้อนประมาณ 4,300.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยมีการเผาไหม้คล้ายกับถ่านหินลิกไนต์ ถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีปริมาณ

มากแต่ประกอบด้วยเกลือของสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และสารประกอบที่มีโพแทสเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้

(Schulz and Helmut W, 1998) ได้ศึกษาการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จากน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียโดยนำกากตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นกากตะกอนที่รีดน้ำออกแล้ว (Sludge dewatering) แล้วทำการหมัก (Composting) เหมือนกรรมวิธีการทำปุ๋ยหมัก หลังจากนั้นนำมาอัดแท่ง (Briquetting) ได้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และนำไปเผา (Combustion) ในเตาเผาขนาดทดลอง ซึ่งคล้ายกับ Fixed-grate Boiler ในห้องทดลอง จะมีเครื่องมือวัดความร้อนของกระบวนการเผาไหม้และก๊าซต่าง ๆ เช่น NO_x SO_2 CO_x และโลหะหนักในเถ้า (Ash) และขี้เถ้าลอย (Fly ash) จากการทดลองพบว่ากากตะกอนหมักอัดแท่งเมื่อมีความชื้น 15% จะให้ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ประมาณ 1,000.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีค่าความร้อนสูง (HHV) ประมาณ 1,250.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เนื่องจากสภาวะการเผาไหม้ของกากตะกอนหมักอัดแท่ง และค่าความร้อนที่ได้ใกล้เคียงกับ Brown Coal แต่มีข้อได้เปรียบ คือ เกิดมลพิษทางอากาศที่น้อยกว่า นั่นคือไม่ก่อให้เกิด SO_2 จากการเผาไหม้ออกสู่อากาศ

(Oladeji J.T. , 2010) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงระหว่างแท่งเชื้อเพลิงที่อัดจากซังข้าวโพดและแท่งเชื้อเพลิงที่อัดจากแกลบ พบว่าแท่งเชื้อเพลิงที่อัดจากแกลบมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 3,200.05 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีค่าความทนแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 1.107 MPa

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือใช้ทางอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ขี้เถ้า ชานอ้อย เป็นต้น สามารถนำมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ ซึ่งอาจจะใช้หรือไม่ใช้ตัวประสาน เช่น ขี้ผึ้ง แป้งเปียก ผักตบชวา เป็นต้น เมื่อนำวัสดุเหลือทิ้ง เช่น แกลบ มาอัดแท่งเชื้อเพลิงร่วมกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจะพบว่ากากตะกอนน้ำเสียชุมชนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ได้ดีหากมีความชื้นที่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลอง และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบ โดยจะมีการทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM รวม 4 ด้าน คือ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และค่าความร้อน และทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าความทนแรงอัด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ทำการทดลองที่ศูนย์การเรียนรู้ภูมิภาคแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

3.2 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน และทำการศึกษาร่วมกับเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนของสถิติ เพื่อทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน โดยแบ่งเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น ทำการวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบสด แกลบคุด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง แล้วทำการทดสอบการขึ้นรูป

ตอนที่ 2 การศึกษาด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัด

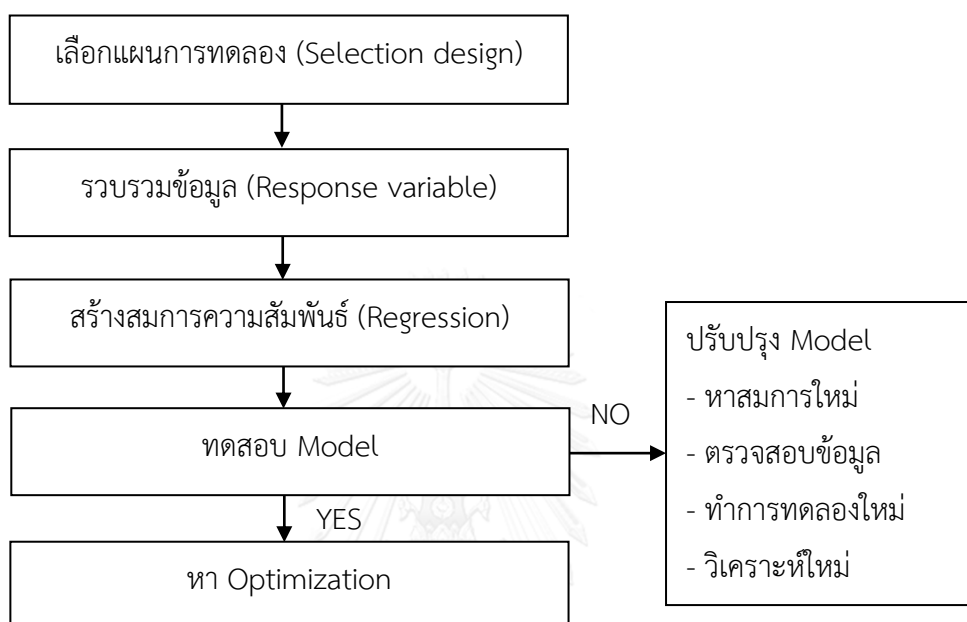
ตอนที่ 3 การศึกษาด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

หลังจากศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ตอนแล้วจึงทำการประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

3.2.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ดังภาพที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เลือกแผนการทดลองให้เหมาะสมกับงาน (Selection design)
- 2) เริ่มทดลองตามแบบการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง และรวบรวมข้อมูล (Response Variable)
- 3) สร้างสมการต้นแบบ (Model) ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression)
- 4) สร้างแบบจำลองแผนภาพ 3 มิติ (RSM Plot) และเส้นค่าระดับ (Contour plot)

- 5) ตรวจสอบช่วงที่เหมาะสม (Optimization) จากแผนภาพ 3 มิติ และเส้นค่าระดับ
- 6) ทดสอบสมการต้นแบบ (Recheck)
- 7) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากสมการต้นแบบ
- 8) สรุปปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

ที่มา : กัลยาณี เต็งพงศธร (2546)

3.2.2 ตอนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น

- 1) วิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบสด แกลบบด และแป้งมันสำปะหลังเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน
- 2) ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมของแห้งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)
- 3) ทำการเลือกอัตราส่วนมาทดสอบการขึ้นรูป
- 4) ทดสอบการขึ้นรูปแห้งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) ตามสัดส่วนที่ได้จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

3.2.3 ตอนที่ 2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัด ดังนี้

- 1) ศึกษาสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) สูงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)
- 2) ขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)
- 3) วิเคราะห์คุณสมบัติแท่งเชื้อเพลิงโดยทำการทดสอบหาค่าความทนแรงอัด (Compressive strength)
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Recheck) โดยทำการทดลองซ้ำเพื่อหาช่วงสัดส่วนที่เหมาะสม และเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างค่าความทนแรงอัดจากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย และสรุปปัจจัยที่เหมาะสม

3.2.4 ตอนที่ 3 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความร้อนและค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

- 1) นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการหาสัดส่วนที่เหมาะสมในข้อ 3.2.3 มาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) คือ อุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน (Heating value) และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) สูง
- 2) ทำการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงตามอุณหภูมิ และเวลาที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)
- 3) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าพลังงานความร้อน (Heating value) ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile solids)
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Recheck) และสรุปปัจจัยที่เหมาะสม

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) สารเคมีในห้องปฏิบัติการ
- 3) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 4) กระเบื้องลอนเล็กสำหรับตากแท่งเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 5) ภาชนะผสมวัสดุดิบ

- 6) ตะแกรงร่อน
- 7) เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
- 8) เครื่อง Bomb Calorimeter
- 9) เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง
- 10) เตาเผา
- 11) โถดูดความชื้น
- 12) ตู้อบ
- 13) กากตะกอนน้ำเสียชุมชน
- 14) แกลบบด
- 15) แป้งมันสำปะหลัง

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ดังนี้

- 1) ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ได้แก่ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสาน
- 2) เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม การศึกษานี้เลือกแผนการทดลองแบบ Factorial design ด้วยวิธีการประสมแบบส่วนกลาง (CCD) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้จำนวนแบบการทดลอง (Run) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)
- 3) ทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง และรวบรวมข้อมูล
- 4) สร้างสมการตัวแบบและวิเคราะห์ความถดถอย
- 5) สร้างแบบจำลอง 3 มิติ และเส้นระดับ
- 6) ตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสมจากแผนภาพ 3 มิติ และเส้นระดับ
- 7) พิสูจน์สมการต้นแบบโดยการใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ (Response Variable) เพื่อนำไปทดลองอีกครั้ง
- 8) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการต้นแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองใหม่อีกครั้ง เพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการใหม่
- 9) สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

3.4.2 ตอนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น

1) วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าเบื้องต้นของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด แกลบสด และแป้งมันสำปะหลัง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบเบื้องต้น

| วัตถุดิบ | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) | ค่าความชื้น (%) | ปริมาณเถ้า (%) |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| กากตะกอนน้ำเสีย ชุมชน | 2,914.64 | 5.00 | 47.57 |
| แกลบบด | 3,808.80 | 5.76 | 10.78 |
| แกลบสด | 3,794.74 | 7.84 | 14.85 |
| แป้งมันสำปะหลัง | 4,100.13 | 9.61 | 0 |

2) ทดสอบการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง โดยเลือกสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แป้งมันสำปะหลัง และแกลบ จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยทดลองใช้ทั้งแกลบบดและแกลบสด มาทดสอบการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ทำการเลือกอัตราส่วนตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ต้องการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนให้มากที่สุด และทำการทดสอบการขึ้นรูปโดยมีสัดส่วนปัจจัย ดังนี้

- สัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 ถึง 10 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

- สัดส่วนของแกลบโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 ถึง 10 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

- สัดส่วนของตัวประสานโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 0 ถึง 1 ส่วน โดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

3) ทำการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมมา 3 สัดส่วน โดยทำการเลือกจากอัตราส่วนกากตะกอนเป็นหลักดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิง

| วัตถุดิบ | กากตะกอนน้ำเสีย ชุมชน | แกลบบด | แป้งมันสำปะหลัง |
|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------|
| ปริมาณโดยน้ำหนัก (kg.) | 7.5 | 2.5 | 0.5 |
| | 5.0 | 5.0 | 0.5 |
| | 2.5 | 7.5 | 0.5 |

4) หลังจากทดลองขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันดังรูปที่ 3.2 (1) ที่อัตราส่วนกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบบดต่อแป้งมันสำปะหลัง ที่ 5 : 5 : 0.5 และรูปที่ 3.2 (2) อัตราส่วนกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบบดต่อแป้งมันสำปะหลัง ที่ 5 : 5 : 0.5 และตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในภาคผนวก ก. จะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แกลบบดเป็นวัตถุดิบในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความพรุน และผิวขรุขระเมื่อเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แกลบบดเป็นวัตถุดิบที่อัตราส่วนเดียวกัน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แกลบบดเป็นวัตถุดิบในการอัดแท่งเชื้อเพลิง แล้วพิจารณาปรับเพิ่ม – ลดสัดส่วนของปัจจัยตามความเหมาะสมต่อไป



รูปที่ 3.2 (1), (2) ตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิง

3.4.3 ตอนที่ 2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่มีผลต่อความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

1) ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสานด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงจะได้จำนวนแบบการทดลองทั้งหมด 20 ชุด โดยกำหนดสัดส่วนปัจจัย ดังนี้

- สัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 ถึง 10 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

- สัดส่วนของแกลบบดโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 0 ถึง 4 ส่วน โดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

- สัดส่วนของตัวประสานโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 0 ถึง 1 ส่วน โดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

2) การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน มีวิธีการ ดังนี้

- ทำการบดแกลบ และกากตะกอนให้มีขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นร่อนผ่านตะแกรง

- นำกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังมาผสมกันตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จำนวนทั้งหมด 20 อัตราส่วน

3) ทำการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน โดยกำหนดให้แท่งเชื้อเพลิงมีความยาวประมาณ 12 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน

- นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ตากแดดประมาณ 1 - 2 วัน เพื่อลดความชื้น และป้องกันการขึ้นรา

- วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้โดยการทดสอบหาค่าความทนแรงอัด

4) การทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง (Recheck) นำผลการทดสอบที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของแบบจำลอง มาทดลองและวัดผลตอบสนอง เพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการ เปรียบเทียบค่าที่สังเกตได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการต้นแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการใหม่

5) สรุปปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองสำหรับการทดสอบขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

3.4.4 ตอนที่ 3 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ที่มีผลต่อค่าความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

1) นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 3.4.3 มาศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง จะได้จำนวนแบบการทดลองทั้งหมด 13 ชุด โดยกำหนดช่วงของปัจจัยจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง คือ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง คือ 30 ถึง 90 นาที

2) ทำการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง (Carbonization) ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

- นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการขึ้นรูปและไล่ความชื้นแล้วมาเรียงในหม้อดินเผา โดยเรียงให้มีช่องว่างระหว่างแท่งเชื้อเพลิงดังรูปที่ 3.4 เพื่อให้ความร้อนกระจายได้ดี ทำการปิดฝาหม้อดินเผา และนำใส่เตาเผาแบบจำกัดอากาศภายในเตาเผาดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การเรียงแท่งเชื้อเพลิงในหม้อดินเผา



รูปที่ 3.5 การใส่หม้อดินเผาที่บรรจุแท่งเชื้อเพลิงแล้วในเตาเผา

- เพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาจนถึงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- เพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผา และระยะเวลาที่ใช้ตามสัดส่วนที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)
- เมื่อทำการคาร์บอนไนซ์เรียบร้อยแล้วปล่อยแท่งเชื้อเพลิงไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3) วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์โดยศึกษาคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าพลังงานความร้อน (Heating value) ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile solids)

4) ทำการทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง (Recheck) แล้วนำผลการทดสอบที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของแบบจำลองมาทดลองและวัดผลตอบสนองมาตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการ ทำการเปรียบเทียบค่าที่สังเกตได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการต้นแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการใหม่

5) สรุปปัจจัยที่เหมาะสม (อุณหภูมิและเวลา) ในการทดลองสำหรับการทดสอบการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

3.5 วิธีการวิเคราะห์เพื่อหาค่าต่าง ๆ ของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 3.3 และภาคผนวก ข.

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์

| การทดลอง | วิธีการวิเคราะห์ |
|-----------------------|---|
| ค่าความทนแรงอัด | (Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM), 2007a) |
| ค่าความร้อน | (Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM), 2007b) |
| ปริมาณความชื้น | (Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM), 2007c) |
| ปริมาณเถ้า | (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2557) |
| ปริมาณของแข็งระเหยได้ | (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2557) |
| ร้อยละของผลิตภัณฑ์ | (ณรงค์ นิมพาลี, 2557) |

3.6 ประเมินราคาต้นทุน

การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง แบ่งเป็นต้นทุนคงที่ และต้นทุนแปรผัน ดังนี้

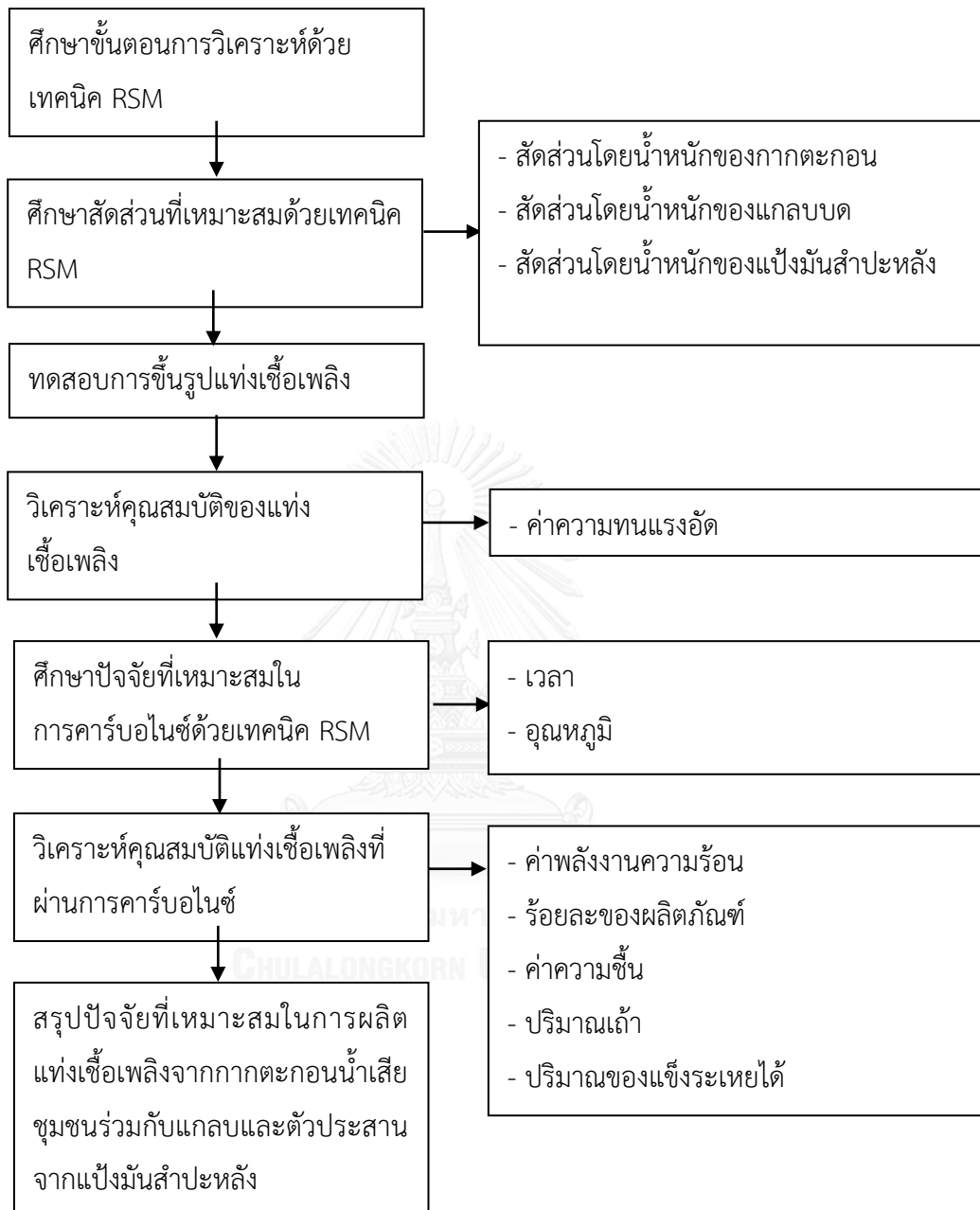
1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีค่าคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต ในการวิจัยนี้ ได้แก่ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบอบ และแบริ่งมันสำปะหลัง

2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนแปรผันตามหน่วยที่ใช้ ในการวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าขนส่งวัตถุดิบ โดยไม่คิดค่าลงทุน ค่าอุปกรณ์การผลิต และค่าแรงงาน

3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบโดยใช้แบริ่งมันเป็นตัวประสาน เพื่อให้ได้แท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัด และค่าพลังงานความร้อนสูง

3.8 ผังการทำวิจัย



บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา และทดลองทั้งหมด 3 ตอนเพื่อหาสัดส่วน อุณหภูมิ และเวลาที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด และค่าพลังงานความร้อนสูง โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ในการศึกษาทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

ตอนที่ 1 ทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง

ตอนที่ 3 ศึกษาช่วงเวลา และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงให้ค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง

หลังจากทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแล้วจึงทำการประเมินต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน และผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman

หลังจากศึกษาทบทวนเอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ แล้วทำการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Sludge) แกลบ (Rice husk) และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง (Binder) แล้ว จึงทำการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman โดยทำการกำหนดอัตราส่วนดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนของกากตะกอน แกลบ และตัวประสาน

| ตัวแปร | ระดับ | | หน่วย |
|-----------|-------|-----|-------------------|
| | สูง | ต่ำ | |
| กากตะกอน | 5 | 10 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| แกลบ | 0 | 4 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| ตัวประสาน | 0 | 1 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |

โดยสัดส่วนของปัจจัยที่กำหนดข้างต้นนี้มาจากการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง แล้วนำมาทำการทดลองเบื้องต้น และทำการทดสอบการขึ้นรูป อีกทั้งจากสมมุติฐานของงานวิจัยนี้

ต้องการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็นปัจจัยในการอัดแท่งเชื้อเพลิงให้มากที่สุดเพื่อเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และต้องการใช้วัตถุดิบอื่น ๆ ได้แก่ แกลบบดและตัวประสานในอัตราส่วนที่น้อยที่สุด

เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมแล้วจึงใช้เทคนิค Plackett-Burman ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทคนิคพหุคูณตอบสนอง (RSM) ในการเลือกปัจจัยสูง - ต่ำของแต่ละวัตถุดิบที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงให้ผลการตอบสนอง (ค่าความทนแรงอัด) สูงที่สุด จะได้รับการทดลองทั้งหมด 12 แบบการทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แบบการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Plackett-Burman

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | |
|----------|----------------------------|------|-----------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน |
| 1 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 5.00 | 0.00 | 1.00 |
| 4 | 5.00 | 4.00 | 0.00 |
| 5 | 5.00 | 4.00 | 1.00 |
| 6 | 5.00 | 4.00 | 1.00 |
| 7 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | 10.00 | 0.00 | 1.00 |
| 9 | 10.00 | 0.00 | 1.00 |
| 10 | 10.00 | 4.00 | 0.00 |
| 11 | 10.00 | 4.00 | 0.00 |
| 12 | 10.00 | 4.00 | 1.00 |

เมื่อได้รูปแบบการทดลองทั้งหมดแล้วจึงทำการผสมสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และตัวประสานตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง เพื่อหาสัดส่วนที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงสุด ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัด

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ค่าความทนแรงอัด (MPa) |
|----------|----------------------------|------|-----------|-------------------------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 1 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | 2.3520 |
| 2 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | 2.5840 |
| 3 | 5.00 | 0.00 | 1.00 | 1.3438 |
| 4 | 5.00 | 4.00 | 0.00 | 3.0009 |
| 5 | 5.00 | 4.00 | 1.00 | 5.6620 |
| 6 | 5.00 | 4.00 | 1.00 | 5.5370 |
| 7 | 10.00 | 0.00 | 0.00 | 0.3602 |
| 8 | 10.00 | 0.00 | 1.00 | 0.4010 |
| 9 | 10.00 | 0.00 | 1.00 | 0.3930 |
| 10 | 10.00 | 4.00 | 0.00 | 3.9540 |
| 11 | 10.00 | 4.00 | 0.00 | 4.0940 |
| 12 | 10.00 | 4.00 | 1.00 | 2.1280 |

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการทดลองทั้ง 12 รูปแบบการทดลองให้ค่าความทนแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.35 MPa (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่ง, 2547) หากแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดต่ำจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีการแตกร่วนง่าย ยากต่อการขนส่งและการนำไปใช้ แต่ถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงเกินไปจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงจุดติดไฟยากจึงทำการหาสัดส่วนที่เหมาะสมโดยพิจารณาข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค Plackett-Burman ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.4 ดังนี้

โดย

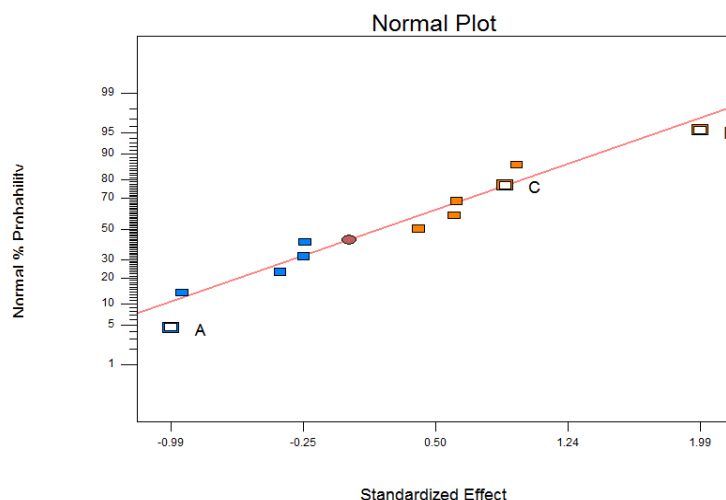
- แทนค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- แทนค่าปัจจัยที่เป็นบวก (Positive Effects)
- แทนค่าปัจจัยที่เป็นลบ (Negative Effects)

Design-Expert® Software
Compressive Strength

Shapiro-Wilk test
W-value = 0.939
p-value = 0.597

A: Sludge
B: Rice husk
C: Binder
D: D
E: E
F: F
G: G
H: H
J: J
K: K
L: L

■ Positive Effects
■ Negative Effects



รูปที่ 4.1 การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.1 ทำการเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ โดยที่

A คือ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน

B คือ แกลบ

C คือ ตัวประสาน

จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผลเพื่อให้ทราบว่าสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสานที่ทำการทดลองนั้นมีค่าเหมาะสมหรือไม่ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค Plackett-Burman

| Term | Standardized Effects |
|-------------|----------------------|
| A-Sludge | -0.99 |
| B-Rice husk | 1.99 |
| C-Binder | 0.89 |

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า A หรือ กากตะกอนมีค่า Standardized Effects เป็นลบ หมายถึง สัดส่วนที่ทำการทดลองนั้นยังไม่มีค่าที่เหมาะสม คือ ควรลดสัดส่วนจากที่กำหนดไว้ ส่วนค่า B หรือ แกลบ และค่า C หรือ ตัวประสานนั้นมีค่า Standardized Effects เป็นบวก หมายถึงสัดส่วนที่ทำการทดลองนั้นยังไม่มีค่าที่เหมาะสม คือ ควรเพิ่มสัดส่วนจากที่กำหนดไว้ จากการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman ทำให้ทราบว่าสัดส่วนที่กำหนดนั้นควรมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตะกอนเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสาน

| ตัวแปร | สัดส่วน | | หน่วย |
|-----------|---------|--------|---------------------|
| | ก่อน | หลัง | |
| กากตะกอน | 5 - 10 | 4 - 10 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| แกลบ | 0 - 4 | 0 - 5 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| ตัวประสาน | 0 - 1 | 0 - 1 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |

จากตารางที่ 4.5 ทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวแปรเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลอง และวัตถุประสงค์ คือ ต้องการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนให้มีสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ใช้แกลบไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และใช้ตัวประสานให้น้อยที่สุด เพื่อนำไปออกแบบการทดลองทดลองต่อไป

4.2 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลเพื่อหาปริมาณสัดส่วนของแท่งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง

4.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง คือ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง นำทั้ง 3 ปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพินผิวตอบสนอง (RSM) โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composit Design; CCD) และเลือกแบบจำลอง Quadratic จะได้การทดลองทั้งหมด 20 แบบ โดยกำหนดให้สัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนอยู่ในช่วง 4 - 10 ส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้ ต้องการนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงให้ได้มากที่สุดเพื่อลดการกำจัดกากตะกอนที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย สัดส่วนของแกลบอยู่ในช่วง 0 - 5 ส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากต้องการใช้วัสดุชีวมวลให้มีปริมาณร้อยละโดยสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 50 และตัวประสานอยู่ในช่วง 0 - 1 เนื่องจากต้องการใช้ตัวประสานให้มีปริมาณน้อยที่สุด ดังตารางที่ 4.6 อีกทั้งกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเมื่ออยู่ในสภาวะความชื้นที่เหมาะสมสามารถเป็นตัวประสานได้ด้วยตัวเอง (สุริยา ชัยเดชชยากุล, 2544) จึงเลือกใช้ตัวประสานในปริมาณน้อยเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถเกาะกันเป็นแท่งได้ดีมากขึ้น

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรและสัดส่วน

| ตัวแปร | สัดส่วน | | หน่วย |
|-----------|---------|-----|---------------------|
| | สูง | ต่ำ | |
| กากตะกอน | 4 | 10 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| แกลบ | 0 | 5 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |
| ตัวประสาน | 0 | 1 | ส่วน (โดยน้ำหนัก) |

จากตารางที่ 4.6 นำสัดส่วนสูง - ต่ำ ของตัวแปรมาทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค
 พื้นผิวตอบสนองจะได้รับการทดลองทั้งหมด 20 แบบ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | |
|----------|---------------------------|------|-----------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน |
| 1 | 2.00 | 2.50 | 0.50 |
| 2 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | 4.00 | 0.00 | 1.00 |
| 4 | 4.00 | 2.50 | 0.00 |
| 5 | 4.00 | 5.00 | 0.50 |
| 6 | 4.00 | 5.00 | 0.50 |
| 7 | 7.00 | 0.00 | 0.50 |
| 8 | 7.00 | 2.50 | 0.00 |
| 9 | 7.00 | 2.50 | 0.50 |
| 10 | 7.00 | 2.50 | 0.50 |
| 11 | 7.00 | 2.50 | 1.00 |
| 12 | 7.00 | 2.50 | 1.50 |
| 13 | 7.00 | 5.00 | 0.50 |
| 14 | 7.00 | 7.00 | 0.50 |
| 15 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| 16 | 10.00 | 0.00 | 1.00 |
| 17 | 10.00 | 5.00 | 0.00 |
| 18 | 10.00 | 5.00 | 0.50 |
| 19 | 10.00 | 5.00 | 1.00 |
| 20 | 12.00 | 2.50 | 0.50 |

จากตารางที่ 4.7 ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองจะได้รูปแบบการทดลองทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง เพื่อทำการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงตามสัดส่วนดังตารางที่ 4.8

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

การทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแท่งเชื้อเพลิงนี้จะใช้ค่าความทนแรงอัดเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา โดยกำหนดค่าความทนแรงอัดไว้ที่ 0.35 MPa สัดส่วนที่มีความเหมาะสมจะต้องมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 4.8 จะพบว่าค่าความทนแรงอัดที่ได้จะมีทั้งค่าทดลอง และค่าทำนาย โดยค่าทดลองคือ ค่าที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าความทนแรงอัดด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D1621 ส่วนค่าทำนาย คือ ค่าที่ได้จากการทดลองใส่สัดส่วนที่คำนวณได้จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แล้วทำการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าทำนาย

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์หาค่าความทนแรงอัด

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ค่าความทนแรงอัด (MPa) | |
|----------|---------------------------|------|-----------|-----------------------|----------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | ค่าทดลอง | ค่าทำนาย |
| 1 | 2.00 | 2.50 | 0.50 | 0.8180 | 0.8442 |
| 2 | 4.00 | 0.00 | 0.00 | 0.3477 | 0.4446 |
| 3 | 4.00 | 0.00 | 1.00 | 0.2677 | 0.2592 |
| 4 | 4.00 | 2.50 | 0.00 | 0.7840 | 0.5150 |
| 5 | 4.00 | 5.00 | 0.50 | 0.7808 | 0.7795 |
| 6 | 4.00 | 5.00 | 0.50 | 0.7673 | 0.7278 |
| 7 | 7.00 | 0.00 | 0.50 | 0.2522 | 0.3532 |
| 8 | 7.00 | 2.50 | 0.00 | 0.6083 | 0.6162 |
| 9 | 7.00 | 2.50 | 0.50 | 0.5788 | 0.6578 |
| 10 | 7.00 | 2.50 | 0.50 | 0.5724 | 0.5870 |
| 11 | 7.00 | 2.50 | 1.00 | 0.7156 | 0.6992 |
| 12 | 7.00 | 2.50 | 1.50 | 0.6938 | 0.6710 |
| 13 | 7.00 | 5.00 | 0.50 | 0.7026 | 0.6112 |
| 14 | 7.00 | 7.00 | 0.50 | 0.6347 | 0.5963 |
| 15 | 10.00 | 0.00 | 0.00 | 0.3687 | 0.3692 |
| 16 | 10.00 | 0.00 | 1.00 | 0.3941 | 0.4003 |
| 17 | 10.00 | 5.00 | 0.00 | 0.6962 | 0.5953 |
| 18 | 10.00 | 5.00 | 0.50 | 0.6300 | 0.5932 |
| 19 | 10.00 | 5.00 | 1.00 | 0.8182 | 0.7743 |
| 20 | 12.00 | 2.50 | 0.50 | 0.8220 | 0.7582 |

จากตารางที่ 4.8 พบว่าการทดลองทั้ง 20 ชุดมีค่าความทนแรงอัดสูงเกินค่ามาตรฐานเกือบทั้งหมด ยกเว้นการทดลองชุดที่ 2 ชุดที่ 3 ชุดที่ 7 ชุดที่ 15 และชุดที่ 16 เนื่องจากทั้ง 5 ชุดการทดลองนี้มีเพียงกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงนั้นเป็นไปได้ยาก แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีลักษณะแท่งไม่สมบูรณ์ พื้นผิวไม่เรียบและมีความเปราะจึงทำให้เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัดแล้วได้ค่าที่น้อยกว่าค่ามาตรฐาน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้ง 20 ชุดให้ค่าความทนแรงอัดสูงเกินค่ามาตรฐานเกือบทุกชุด การทดลอง จึงต้องนำค่าความทนแรงอัดที่ได้นี้มาพิจารณาร่วมกับกราฟทำนายดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.7 เพื่อประกอบการตัดสินใจในการหาสัดส่วนแท่งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุดแล้วนำไปทำการทดลองยืนยันผลต่อไป

Design-Expert® Software

Compressive Strength

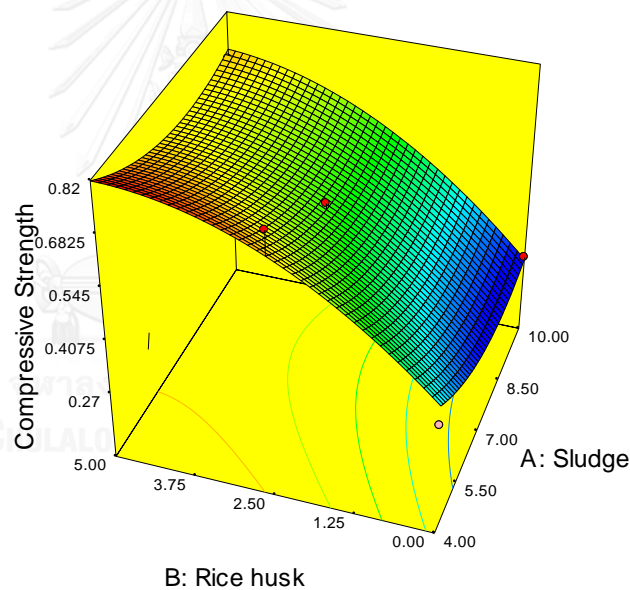


X1 = A: Sludge

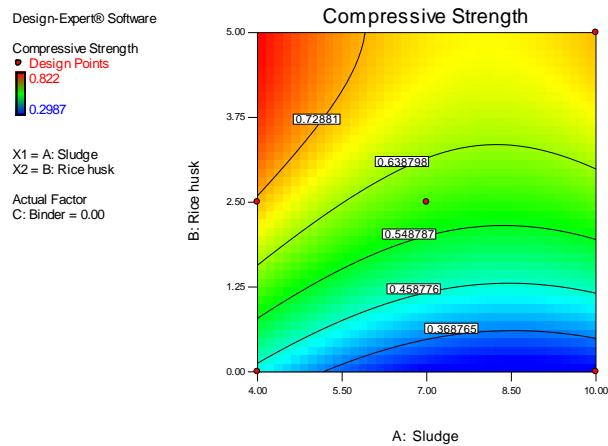
X2 = B: Rice husk

Actual Factor

C: Binder = 0.00

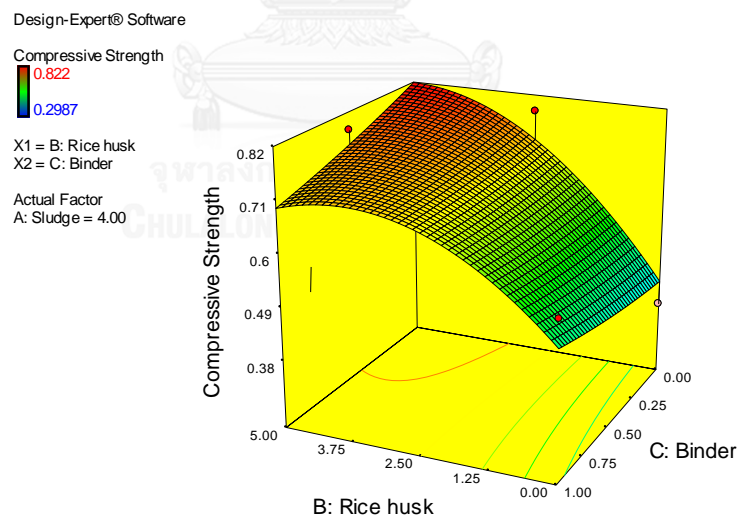


รูปที่ 4.2 ผลการทำนายสัดส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและแกลบที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

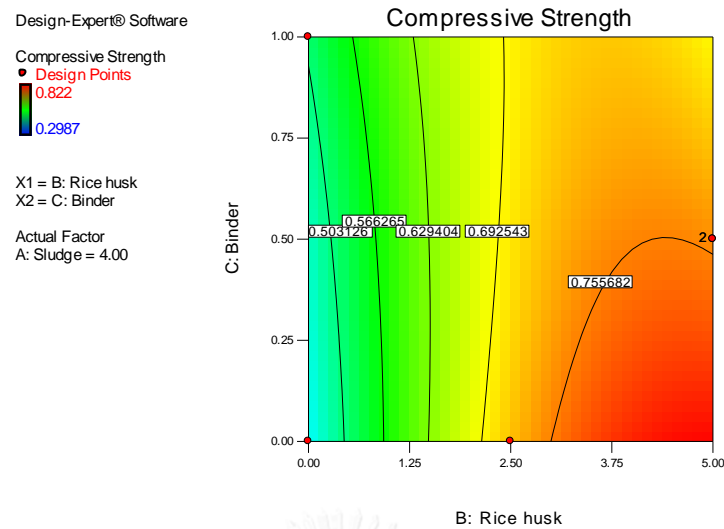


รูปที่ 4.3 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและแกลบที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและแกลบที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีค่าอยู่ในช่วง 4.00 – 5.00 ส่วน และแกลบมีค่าอยู่ในช่วง 3.75 – 5.00 ส่วน เป็นช่วงสัดส่วนของปัจจัยที่ทำให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุดที่ 0.7288 MPa

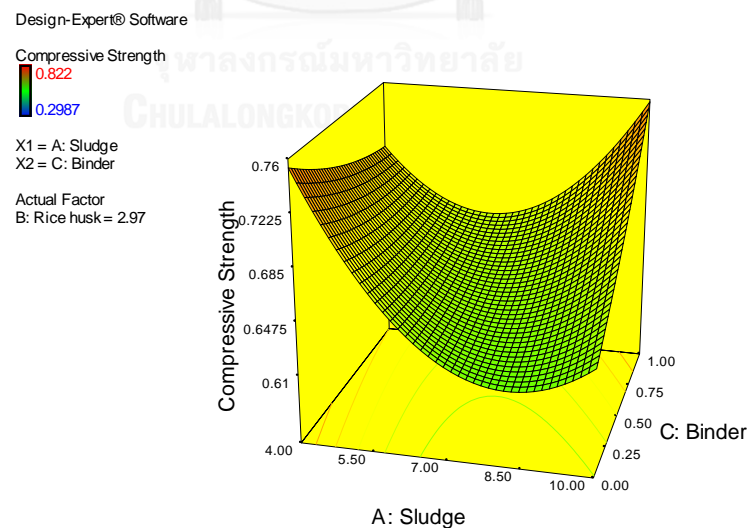


รูปที่ 4.4 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแกลบและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

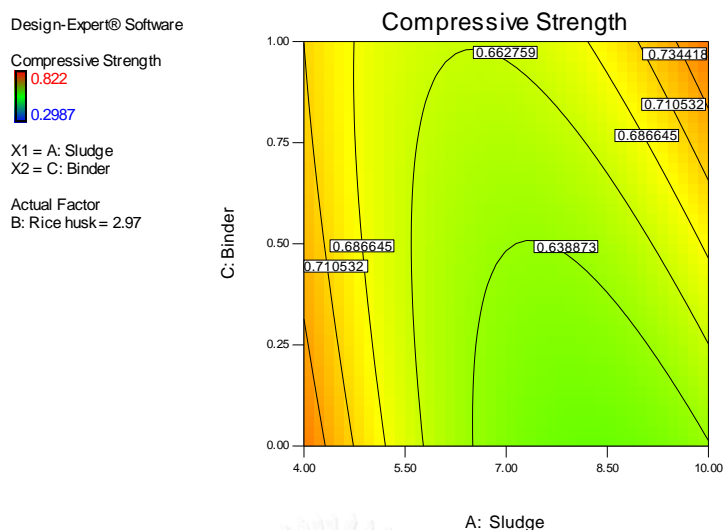


รูปที่ 4.5 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแกลบและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแกลบและตัวประสานที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกลบมีค่าอยู่ในช่วง 3.75 - 5.00 ส่วน และตัวประสานมีค่าอยู่ในช่วง 0.00 - 0.50 ส่วน เป็นช่วงสัดส่วนของปัจจัยที่ทำให้ค่าความทนแรงอัดสูงที่สุดที่ 0.7556 MPa



รูปที่ 4.6 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.7 ผลการทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 พิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชนและตัวประสานที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง พบว่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีค่าอยู่ในช่วง 4.00 - 5.00 ส่วน และตัวประสานมีค่าอยู่ในช่วง 0.00 - 1.00 ส่วน เป็นช่วงสัดส่วนของปัจจัยที่ทำให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุดที่ 0.7105 MPa

เพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัดร่วมกับกราฟทำนายพบว่าช่วงสัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทำให้ค่าความทนแรงอัดสูงของตะกอนน้ำเสียชุมชนมีค่าอยู่ในช่วง 4.00 - 5.00 ส่วน แกลบมีค่าอยู่ในช่วง 3.75 - 5.00 ส่วน และตัวประสานมีค่าอยู่ในช่วง 0.00 - 1.00 ส่วน ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ช่วงปัจจัยที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง

| ความสัมพันธ์ ของแต่ละปัจจัย | ช่วงสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสม | | |
|--------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน |
| กากตะกอน กับแกลบ | 4.00 - 5.00 | 3.75 - 5.00 | |
| กากตะกอน กับตัวประสาน | 4.00 - 5.00 | | 0.00 - 1.00 |
| แกลบกับ ตัวประสาน | | 3.75 - 5.00 | 0.00 - 0.50 |
| สรุปสัดส่วน | 4.00 - 5.00 | 3.75 - 5.00 | 0.00 - 1.00 |

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูงประกอบกับกราฟทำนาย ทำให้ได้ช่วงปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองชุดที่ 4 ชุดที่ 5 และชุดที่ 6 จากตารางที่ 4.8 จึงนำการทดลองทั้ง 3 ชุดไปทดสอบเพื่อยืนยันผลต่อไป

4.2.3 การทดสอบยืนยันผลการทดลองเพื่อหาปริมาณสัดส่วนแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

การทดสอบยืนยันผล คือ การนำผลการทดลองที่ได้มาทำการทดลองซ้ำโดยใช้สัดส่วนที่วิเคราะห์ผลได้จากตารางที่ 4.9 มาทำการทดลองให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยสัดส่วนที่เหมาะสมนั้นต้องใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนให้มากที่สุด และมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแห้งเชื้อเพลิง

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ค่าความทนแรงอัด (MPa) | | P-Value |
|----------|----------------------------|------|-----------|-----------------------|----------|---------|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | ค่าทดลอง | ค่าทำนาย | |
| 1 | 4 | 5 | 1 | 0.8873 | 0.7599 | 0.3775 |
| 2 | 5 | 3 | 0 | 0.5785 | 0.7711 | 0.5548 |
| 3 | 5 | 3 | 0.5 | 1.1272 | 0.8056 | 0.1946 |
| 4 | 5 | 3 | 1 | 0.6776 | 0.7983 | 0.5528 |
| 5 | 5 | 4 | 1 | 0.8337 | 0.9278 | 0.3676 |

จากการกำหนดช่วงสัดส่วนเพื่อทดสอบยืนยันผลพบว่าทั้ง 5 ชุดการทดลองมีค่าความทนแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด คือ 0.35 MPa ดังภาคผนวก ค. และเมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าทุกชุดการทดลอง มีค่า P-Value ≥ 0.05 หมายถึง ทุกชุดการทดลองนั้นมีค่าจากการทดลองและค่าทำนายไม่แตกต่างกัน จึงพิจารณาจากค่าความต่างระหว่างค่าทดลองและค่าทำนายพบว่าการทดลองชุดที่ 5 ของตารางที่ 4.10 ให้ค่าทดลองและค่าทำนายใกล้เคียงกันที่สุด ดังนั้นผลการทดสอบยืนยันผลพบว่าปริมาณสัดส่วนแห้งเชื้อเพลิงที่เหมาะสม คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน 5 ส่วน สัดส่วนโดยน้ำหนักของแกลบ 4 ส่วน และสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวประสาน 1 ส่วน ให้ค่าความทนแรงอัดสูงที่ 0.8337 MPa

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาณสัดส่วนกากตะกอน : แกลบ : ตัวประสาน ที่ 5 : 4 : 1 เพื่อนำไปทำการคาร์บอนต่อไป เนื่องจากเป็นปริมาณสัดส่วนที่ให้ค่าความทนแรงอัดเกินเกณฑ์ที่กำหนด คือ

0.35 MPa และไม่ให้ค่าความทนแรงอัดที่สูงเกินไป เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัดเหมาะสมช่วยทำให้เกิดการลุกไหม้ดี ให้ความร้อนนาน ส่วนเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัดน้อยเกินไปแม้ทำให้เกิดการลุกไหม้ง่ายแต่ก็ทำให้หมดเร็วเช่นกัน และถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงเกินไปจะทำให้เกิดการลุกไหม้ยาก (จิระ รัตนะ และศิริพร จิวพันธ์, 2546)

4.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

4.2.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.0018 เมื่อค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($P\text{-Value} \geq 0.05$) หมายถึงแบบจำลองการถดถอยนั้นมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง หรือปัจจัยที่ศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดนั้น ดังนั้นสมการถดถอยที่ประมาณการณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.11

2) การทดสอบแบบจำลองการถดถอยของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีความเหมาะสมหรือไม่ โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.7541 ซึ่งมีความมากกว่า 0.05 ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมกับข้อมูล ดังตารางที่ 4.11 ดังนี้

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง

| Source | df | SS | MS | F-Value | P-Value |
|-------------|----|-------|------------|---------|---------|
| Model | 9 | 0.39 | 0.044 | 7.72 | 0.0018 |
| Lack of fit | 8 | 0.040 | 4.968E-003 | 0.60 | 0.7541 |
| Pure error | 2 | 0.017 | 8.347E-003 | | |
| Residual | 10 | 0.056 | 5.644E-003 | | |
| Total | 19 | 0.45 | | | |

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับข้อมูล

พิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอยซึ่งมีเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้

3.1) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า standard Deviation (Std. Dev.) และค่า Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

3.2) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และค่า Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแบบจำลองการถดถอยพบว่าแบบจำลอง Quadratic เป็นแบบจำลองที่ให้ค่า R^2 และค่า Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่น และให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ดังตารางที่ 4.12 แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุด

ตารางที่ 4.12 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

| Source | Std. Dev. | PRESS | R^2 | Adj- R^2 |
|-----------|-----------|-------|--------|------------|
| Linear | 0.12 | 0.41 | 0.4504 | 0.3474 |
| 2FI | 0.13 | 0.68 | 0.5082 | 0.2812 |
| Quadratic | 0.075 | 0.26 | 0.8743 | 0.7611 |
| Cubic | 0.091 | 0.82 | 0.8628 | 0.6466 |

4.2.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสม หรือแบบจำลอง Quadratic แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อศึกษาปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

$$H_0 : \beta_j = 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลอง หรือปัจจัยที่มีค่า P-Value ≥ 0.05 ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสาน) ไว้ เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพบว่า แกลบ (B) และกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (A^2) มีความสัมพันธ์กับค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.13

ดังนั้นสมการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติโดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาจากตารางที่ 4.14 มาสร้างสมการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ดังนี้

$$\text{ค่าความทนแรงอัด} = 0.61 - 0.020A + 0.15B + 0.028C + 0.012AB + 0.041AC - 0.0048BC + 0.069A^2 - 0.092B^2 + 7.056E-003C^2$$

สมการค่าความทนแรงอัดนี้สามารถนำไปใช้คาดการณ์สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และตัวประสาน) เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความทนแรงอัดสูง

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง Quadratic

| Analysis of variance table [Partial of square] | | | | | |
|--|------------|----|------------|---------|---------|
| Source | SS | Df | MS | F-Value | P-Value |
| Model | 5.739E-003 | 9 | 5.739E-003 | 7.72 | 0.0018 |
| A | 0.26 | 1 | 0.26 | 1.02 | 0.3370 |
| B | 7.398E-003 | 1 | 7.398E-003 | 46.55 | 0.0001 |
| C | 1.342E-003 | 1 | 1.342E-003 | 1.31 | 0.2789 |
| AB | 5.739E-003 | 1 | 5.739E-003 | 0.24 | 0.6363 |
| AC | 0.010 | 1 | 0.010 | 1.78 | 0.2123 |
| BC | 0.011 | 1 | 0.011 | 1.99 | 0.1884 |
| A ² | 0.056 | 1 | 0.056 | 9.93 | 0.0103 |
| B ² | 0.076 | 1 | 0.076 | 13.55 | 0.4200 |
| C ² | 5.468E-004 | 1 | 5.468E-004 | 0.097 | 0.7620 |
| Residual | 0.056 | 10 | 0.056 | | |
| Corrected Total | 0.45 | 19 | | | |

*หมายเหตุ A คือ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน B คือ แกลบ C คือตัวประสาน

ตารางที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

| Factor | Coefficient Estimate | Df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High |
|----------------|----------------------|----|----------------|------------|-------------|
| Intercept | 0.61 | 1 | 0.038 | 0.53 | 0.70 |
| A-Sludge | -0.020 | 1 | 0.019 | -0.063 | 0.024 |
| B-Rice husk | 0.15 | 1 | 0.023 | 0.10 | 0.20 |
| C-Binder | 0.028 | 1 | 0.025 | -0.027 | 0.083 |
| AB | 0.012 | 1 | 0.026 | -0.045 | 0.070 |
| AC | 0.041 | 1 | 0.031 | -0.028 | 0.11 |
| BC | -0.048 | 1 | 0.034 | -0.12 | 0.028 |
| A ² | 0.069 | 1 | 0.022 | 0.020 | 0.12 |
| B ² | -0.092 | 1 | 0.025 | -0.15 | -0.036 |
| C ² | 7.056E-003 | 1 | 0.023 | -0.043 | 0.058 |

ผลจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.15 พบว่า

- 1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 0.075 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณค่า หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความทนแรงอัดมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงอัด (Mean) มีค่าเท่ากับ 0.63
- 2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 0.26 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย เนื่องจากมีค่า Press ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น
- 3) ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8743 แสดงถึงปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลการตอบสนองได้ 87.63%
- 4) ค่า Adj- R^2 มีค่าเท่ากับ 0.7611 แสดงถึงการนำสมการนี้ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกลดลง 76.11%
- 5) ค่า Pred- R^2 มีค่าเท่ากับ 0.4250 แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความแปรผันทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย
- 6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 10.223 แสดงถึงแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้นเป็นที่ยอมรับเมื่อมีค่ามากกว่า 4

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic

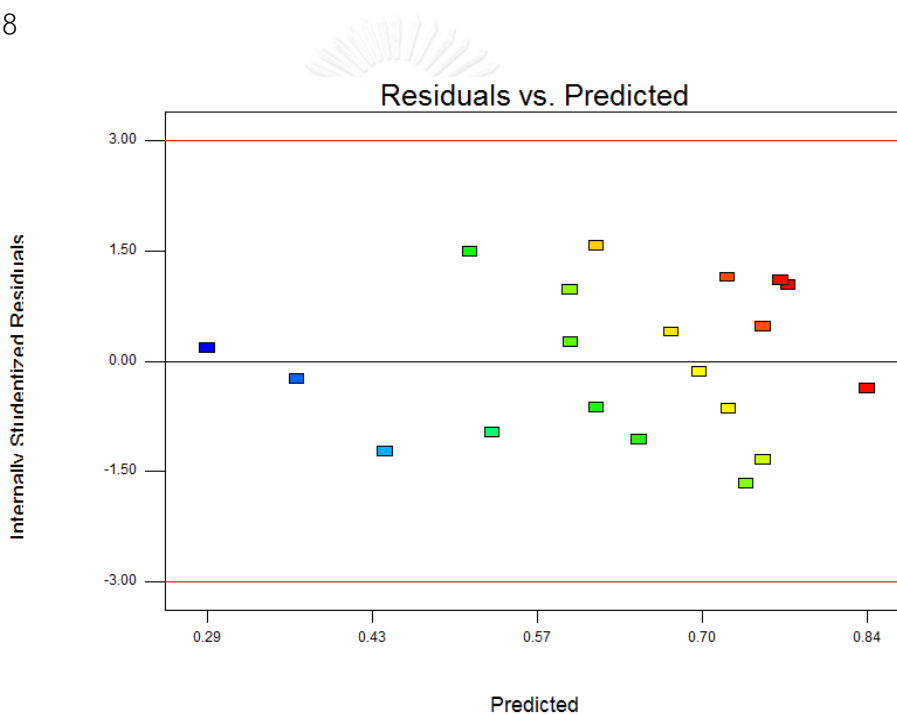
| | |
|----------------|--------|
| Std. Dev. | 0.075 |
| Mean | 0.63 |
| C.V. % | 11.90 |
| PRESS | 0.26 |
| R^2 | 0.8743 |
| Adj- R^2 | 0.7611 |
| Pred- R^2 | 0.4250 |
| Adeq Precision | 10.223 |

4.2.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

การตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจากข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ การตรวจสอบการตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย ดังแสดงในภาคผนวก ง.

1) การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบการตกค้างทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งการพล็อตส่วนตกค้างนี้เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน และความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการพล็อตแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย (Predict) ถ้าส่วนตกค้างอยู่ในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด $+3$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (ศกลธน ราโชภาณูจน์, 2556) ดังรูปที่ 4.8



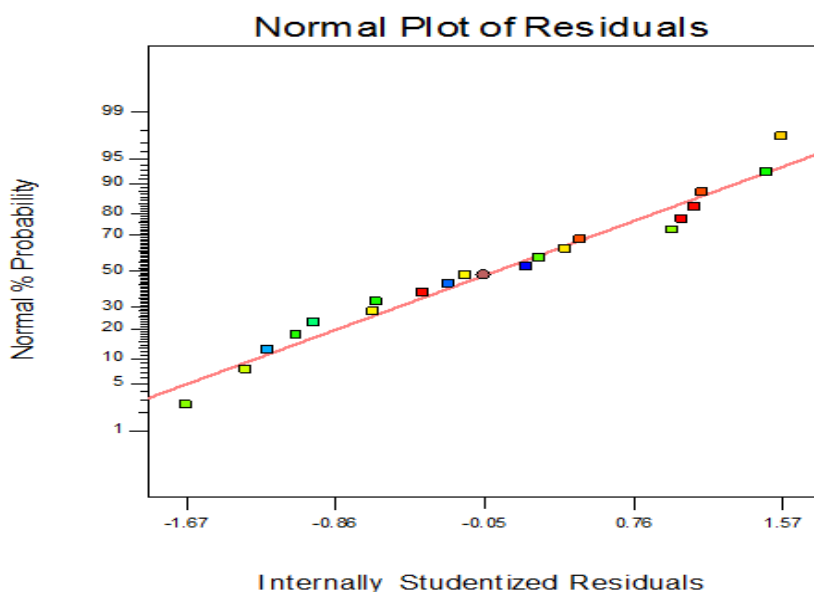
รูปที่ 4.8 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย

*หมายเหตุ สัญลักษณ์

- สีน้ำเงิน
- เขียว
- เหลือง
- แดง

แต่ละจุดในรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.12 แทนชุดการทดลอง (Run)

การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected Values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยโดยพิจารณาจากการพล็อต แผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าแผนภาพการกระจายเข้าใกล้สมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงถึงรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

2) การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณการแบบจำลองการถดถอยโดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii})

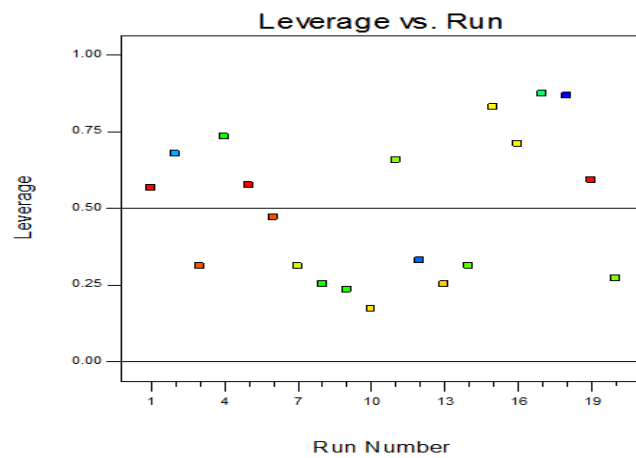
โดย
$$h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$$
 เมื่อ $p = k + 1$

เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

n คือ จำนวนการทดลอง

จากแบบจำลองการถดถอย พบว่ามีจำนวนพารามิเตอร์ (p) ทั้งหมด 10 ตัว จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง (k) 9 ตัว และจำนวนการทดลอง (n) ทั้งหมด 20 การทดลอง จะได้ค่า $h_{ii} \geq 1.000$ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษาเนื่องจากแผนภาพที่พล็อตได้มีค่าการกระจายไม่เกิน 1.000 ดังรูปที่ 4.10

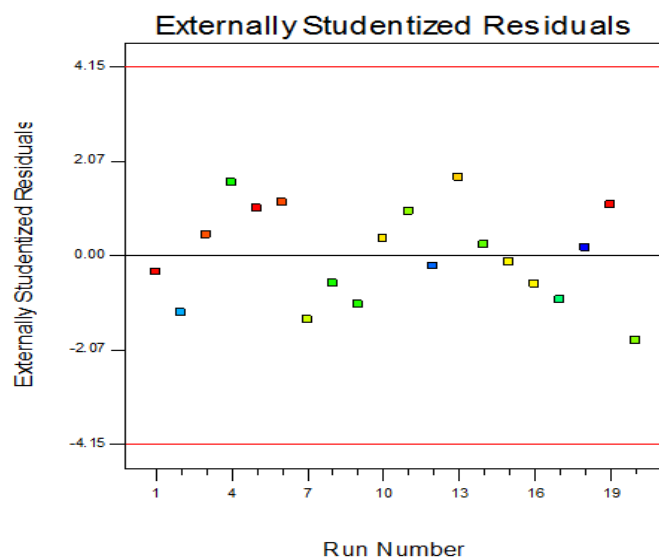


รูปที่ 4.10 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา

3) การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนองเป็นการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากค่าจริงว่าเบี่ยงเบนจากค่าทำนายไปเท่าใด โดยพิจารณาจากค่า Outlier (d_i) หรือ Externally Studentized Residuals และค่า Studentized Residual (r_i) หากพบว่าค่าที่ได้มากกว่าช่วงกำหนดควบคุมจะถือว่าค่าที่ได้นั้นมีความผิดปกติเนื่องจากผลการตอบสนอง ควรนำมาตรวจสอบต่อไปว่าค่าที่ผิดปกติเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาค่าต่อไป

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษานี้พบว่าค่าควบคุมอยู่ที่ +4.15 ดังรูปที่ 4.11 จะพบว่าทุกค่าการตอบสนองไม่เกินค่าควบคุม หมายถึง ในแต่ละลำดับการทดลองนี้ไม่พบความผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

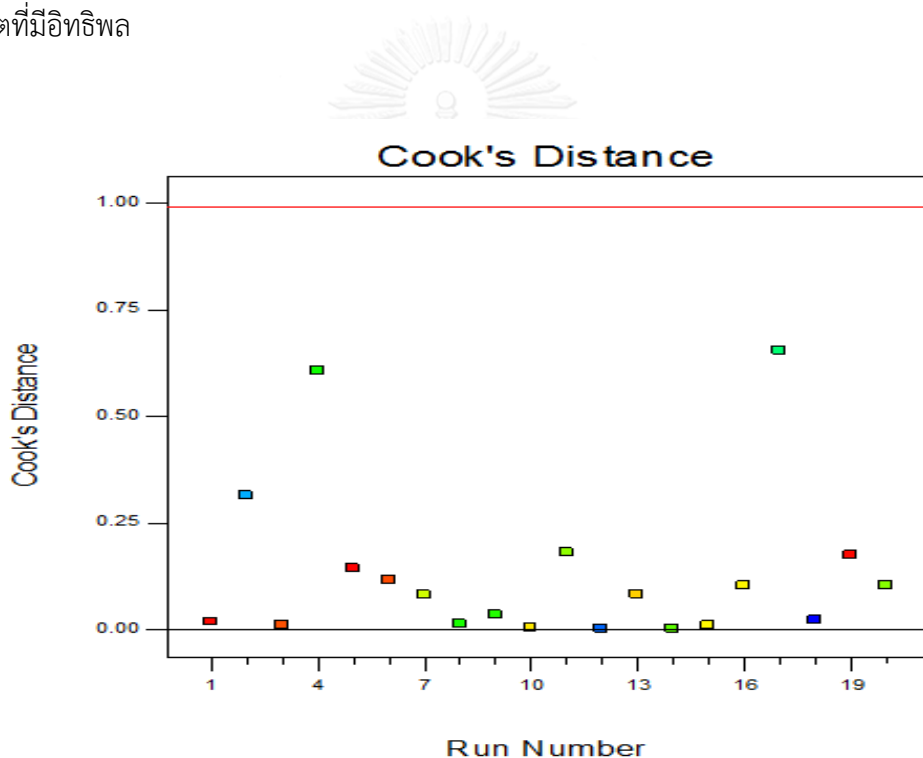


รูปที่ 4.11 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4) การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจาก Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้ในการวัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่าง และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัว ยกเว้นค่าสังเกตที่ i โดย $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล

จากแบบจำลองการถดถอยนี้กำหนดค่า Cook's Distance (D_i) ไม่เกิน 1 ดังรูปที่ 4.12 จะพบว่าไม่มีค่าใดมีค่า $D_i > 1$ จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่พบค่าที่มีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล



รูปที่ 4.12 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.3 การทดลองหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman

จากหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ได้มีการศึกษา ทดลอง และวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Sludge) แกลบ (Rice husk) และตัวประสาน (Binder) ที่ทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง ในหัวข้อที่ 4.3 นี้จะทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิ

และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่ทำให้ค่าความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง ด้วยเทคนิค Plackett-Burman โดยทำการกำหนดอัตราส่วนดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ช่วงระดับสูง – ต่ำของอุณหภูมิและเวลา

| ตัวแปร | ระดับ | | หน่วย |
|----------|-------|-----|--------------|
| | สูง | ต่ำ | |
| อุณหภูมิ | 700 | 500 | องศาเซลเซียส |
| เวลา | 180 | 60 | นาที |

โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และจากการศึกษาการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ณัฐพร ดำรงโรจน์วัฒนา, 2546) พบว่าการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 500 - 600 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 60 - 120 นาที ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 4,812 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม อีกทั้ง แ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอไนซ์ยังให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าแ่งเชื้อเพลิงที่ยังไม่ผ่านการคาร์บอไนซ์ เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมแล้วจึงใช้เทคนิค Plackett-Burman เพื่อออกแบบการทดลองจะได้การทดลองทั้งหมด 12 แบบการทดลอง ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 แบบการทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเทคนิค Plackett-Burman

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) |
|----------|----------------------------|----------------|
| 1 | 500 | 60 |
| 2 | 500 | 60 |
| 3 | 500 | 60 |
| 4 | 500 | 180 |
| 5 | 500 | 180 |
| 6 | 500 | 180 |
| 7 | 700 | 60 |
| 8 | 700 | 60 |
| 9 | 700 | 60 |
| 10 | 700 | 180 |
| 11 | 700 | 180 |
| 12 | 700 | 180 |

เมื่อได้รูปแบบการทดลองทั้ง 12 รูปแบบแล้วจึงทำการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เพื่อหาช่วงของอุณหภูมิและเวลาที่จะทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุด ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน

| การทดลอง | ระดับ | | ค่าความร้อน (kcal/kg.) |
|----------|----------------------------|----------------|---------------------------|
| | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | |
| 1 | 500 | 60 | 4,361.94 |
| 2 | 500 | 60 | 4,391.42 |
| 3 | 500 | 60 | 4,326.70 |
| 4 | 500 | 180 | 4,187.98 |
| 5 | 500 | 180 | 4,112.01 |
| 6 | 500 | 180 | 4,150.04 |
| 7 | 700 | 60 | 3,871.62 |
| 8 | 700 | 60 | 3,874.53 |
| 9 | 700 | 60 | 3,873.17 |
| 10 | 700 | 180 | 3,649.08 |
| 11 | 700 | 180 | 3,655.43 |
| 12 | 700 | 180 | 3,602.22 |

จากตารางที่ 4.18 พบว่าการทดลองทั้ง 12 รูปแบบการทดลองให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแห้ง, 2547) แต่หากพิจารณาจากทั้ง 12 ชุดการทดลองจะพบว่าในชุดการทดลองที่ 2 ทำการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 4,391.42 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองที่ให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำสุด คือ ชุดการทดลองที่ 12 ทำการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 นาที ให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำสุดที่ 3,602.22 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม จึงทำการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมโดยพิจารณาข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค Plackett-Burman ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.19 ดังนี้

โดย

- แทนค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- แทนค่าปัจจัยที่เป็นบวก (Positive Effects)
- แทนค่าปัจจัยที่เป็นลบ (Negative Effects)

Design-Expert® Software
Heating Value

Shapiro-Wilk test

W-value = 0.869

p-value = 0.119

A: Temperature

B: Time

C: C

D: D

E: E

F: F

G: G

H: H

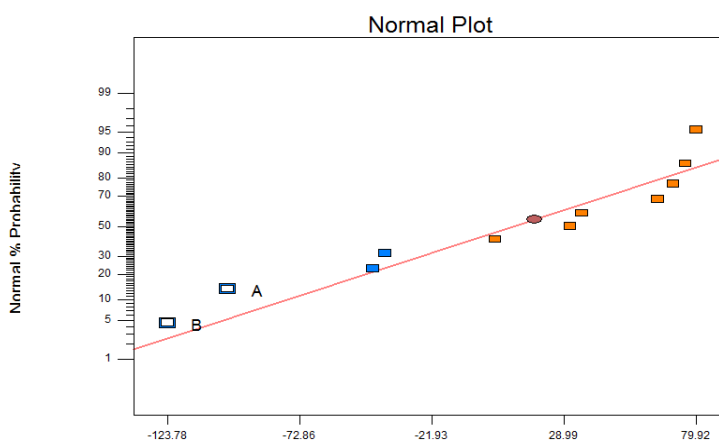
J: J

K: K

L: L

■ Positive Effects

■ Negative Effects



รูปที่ 4.13 การเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่าอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.13 ทำการเลือกตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากกราฟเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดย

A คือ อุณหภูมิ

B คือ เวลา

จากนั้นนำไปวิเคราะห์ผลเพื่อทำให้ทราบว่าช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงนั้นมีค่าเหมาะสมหรือไม่ ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิค Plackett-Burman

| Term | Standardized Effects |
|---------------|----------------------|
| A-Temperature | -171.77 |
| B-Time | -194.87 |

จากตารางที่ 4.19 พบว่าค่า A หรืออุณหภูมิ และ B หรือเวลามีค่า Standardized Effects เป็นลบ หมายถึง สัดส่วนที่ทำการทดลองนั้นยังไม่มีค่าเหมาะสม หรือควรลดสัดส่วนจากค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจากการทดลองหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนซ์แห้งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิค Plackett-Burman ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดนั้นควรมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองดังตารางที่ 4.20 ดังนี้

ตารางที่ 4.20 ผลการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิง

| ตัวแปร | สัดส่วน | | หน่วย |
|----------|-----------|-----------|--------------|
| | ก่อน | หลัง | |
| อุณหภูมิ | 500 – 700 | 300 – 500 | องศาเซลเซียส |
| เวลา | 60 – 180 | 30 – 90 | นาที |

จากตารางที่ 4.20 พบว่าทำการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงจาก 500 ถึง 700 องศาเซลเซียสเป็น 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเวลาในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงจาก 60 ถึง 180 นาทีเป็น 30 ถึง 90 นาที เพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ และเป็นการลดต้นทุนการใช้พลังงานเมื่อใช้เวลาในการผลิตแห้งเชื้อเพลิงลดลงตามวัตถุประสงค์ เมื่อได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปออกแบบการทดลองทดลองต่อไป

4.4 การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงที่ทำให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง

4.4.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงที่พบจากการศึกษา คือ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิง ในการทดลองนี้จึงนำทั้ง 2 ปัจจัยมาออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางและเลือกแบบจำลอง Quadratic ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง ดังตารางที่ 4.21 โดยกำหนดอุณหภูมิในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค Plackett-Burman จะอยู่ในช่วง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเวลาจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 90 นาที อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ทำการศึกษาวิธีการผลิตถ่านอัดแท่งจากแกลบ (อาณูภาพ พรสฤติย์, 2553) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากแกลบแล้วทำให้ได้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 250 ถึง 470 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 - 180 นาที

ตารางที่ 4.21 ตัวแปรและสัดส่วน

| ตัวแปร | สัดส่วน | | หน่วย |
|----------|---------|-----|--------------|
| | สูง | ต่ำ | |
| อุณหภูมิ | 500 | 300 | องศาเซลเซียส |
| เวลา | 90 | 30 | นาที |

จากตารางที่ 4.21 เมื่อนำสัดส่วนของอุณหภูมิและเวลาไปทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาช่วงสัดส่วนที่จะทำให้การคาร์บอนให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูง จะได้รับการทดลองทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) |
|----------|----------------------------|----------------|
| 1 | 300 | 30 |
| 2 | 300 | 60 |
| 3 | 300 | 90 |
| 4 | 400 | 18 |
| 5 | 400 | 30 |
| 6 | 400 | 60 |
| 7 | 400 | 60 |
| 8 | 400 | 90 |
| 9 | 400 | 102 |
| 10 | 500 | 30 |
| 11 | 500 | 60 |
| 12 | 500 | 90 |
| 13 | 541 | 60 |

4.4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงและผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจะนำปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอน ได้แก่ อุณหภูมิและเวลามาทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง จะได้รับการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง แล้วนำผลการทดลองทั้งหมดนั้นมาทำการทดสอบคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าพลังงานความร้อน ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหย ดังตารางที่ 4.23 โดยในการวิเคราะห์นี้จะใช้ผลการตอบสนองของค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์ในการเลือกอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

ในการคาร์บอนซ์ ซึ่งเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จะสามารถคำนวณค่าทำนายเพื่อพยากรณ์ผลการตอบสนองในแต่ละการทดลองได้ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | ปริมาณความชื้น (%) | ปริมาณของแข็งรวม (%) | ปริมาณเถ้า (%) | ปริมาณของแข็งระเหย (%) |
|----------|-------------------------|-------------|--------------------|----------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 300 | 30 | 1.96 | 98.04 | 45.63 | 52.41 |
| 2 | 300 | 60 | 1.92 | 98.08 | 48.03 | 50.05 |
| 3 | 300 | 90 | 0 | 100 | 53.84 | 46.16 |
| 4 | 400 | 18 | 0.99 | 99.01 | 54.46 | 44.45 |
| 5 | 400 | 30 | 0.98 | 99.02 | 57.69 | 41.33 |
| 6 | 400 | 60 | 0.00 | 100 | 54.28 | 45.72 |
| 7 | 400 | 60 | 0.00 | 100 | 56.00 | 44.00 |
| 8 | 400 | 90 | 0.98 | 99.02 | 59.61 | 39.41 |
| 9 | 400 | 102 | 0.97 | 99.03 | 56.19 | 42.84 |
| 10 | 500 | 30 | 0.00 | 100 | 59.40 | 40.60 |
| 11 | 500 | 60 | 0.00 | 100 | 63.13 | 36.87 |
| 12 | 500 | 90 | 0.97 | 99.03 | 63.46 | 35.57 |
| 13 | 541 | 60 | 0.00 | 100 | 66.67 | 33.33 |

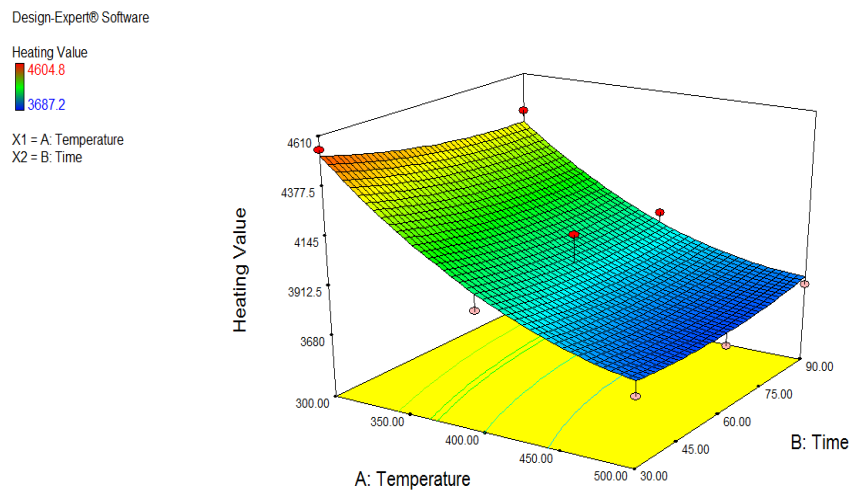
จากตารางที่ 4.23 พบว่าในการทดลองที่ 2 แท่งเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้าต่ำจะมีปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยสูง โดยการทดลองที่ 2 มีปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำสุดที่ร้อยละ 1.92 และร้อยละ 48.03 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยสูงสุดที่ร้อยละ 98.08 และร้อยละ 50.05 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแท่งเชื้อเพลิงจากชานอ้อยเพื่อทดแทนฟืนและถ่านไม้ (ประลอง ดำรงค์ไทย, 2549) พบว่าเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งที่ผ่านการคาร์บอนซ์ที่มีปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้าต่ำจะมีปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูง

ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์

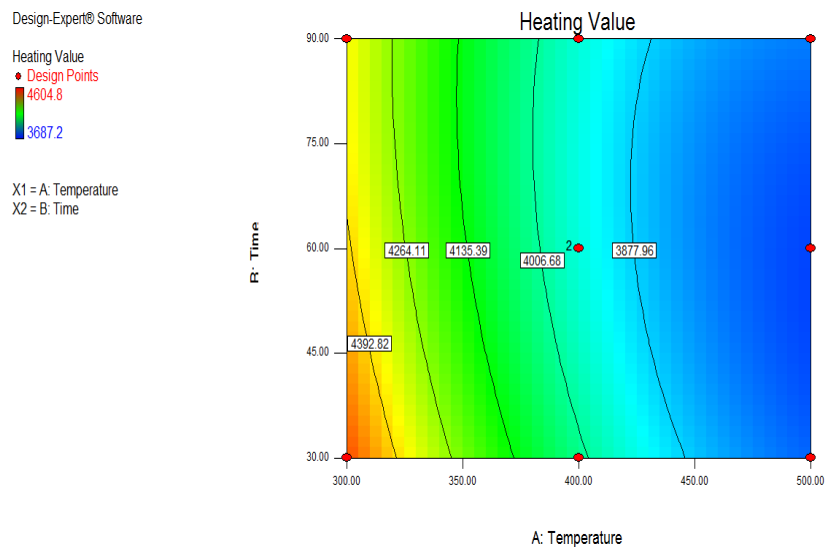
| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาท) | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) | | ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง | |
|----------|-------------------------|------------|-------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|
| | | | ค่าทดลอง | ค่าทำนาย | ค่าทดลอง | ค่าทำนาย |
| 1 | 300 | 30 | 4,547.21 | 4,521.51 | 71.62 | 70.53 |
| 2 | 300 | 60 | 4,604.82 | 4,672.52 | 71.95 | 72.86 |
| 3 | 300 | 90 | 4,423.34 | 4,365.44 | 70.90 | 70.50 |
| 4 | 400 | 18 | 4,156.12 | 4,072.83 | 68.04 | 67.22 |
| 5 | 400 | 30 | 3,941.53 | 4,021.34 | 65.88 | 66.12 |
| 6 | 400 | 60 | 4,055.96 | 3,948.06 | 64.76 | 64.39 |
| 7 | 400 | 60 | 4,086.04 | 3,948.04 | 65.05 | 64.39 |
| 8 | 400 | 90 | 4,000.78 | 3,953.68 | 60.49 | 64.14 |
| 9 | 400 | 102 | 3,924.65 | 3,977.96 | 66.25 | 64.25 |
| 10 | 500 | 30 | 3,708.29 | 3,779.09 | 62.42 | 64.45 |
| 11 | 500 | 60 | 3,687.22 | 3,749.94 | 59.50 | 61.74 |
| 12 | 500 | 90 | 3,761.01 | 3,799.73 | 63.44 | 60.51 |
| 13 | 541 | 60 | 3,856.55 | 3,743.22 | 62.45 | 61.45 |

จากตารางที่ 4.24 พบว่าค่าพลังงานความร้อนของแห้งเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที มีค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และให้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ร้อยละ 71.62 ขณะที่การทดลองที่ 11 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที มีค่าพลังงานความร้อนต่ำสุดที่ 3,687.22 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และให้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่ำสุดที่ร้อยละ 59.50

เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิง ค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์ จากตารางที่ 4.23 และ 4.24 แล้วจึงพิจารณากราฟทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์) เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกสัดส่วนของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17

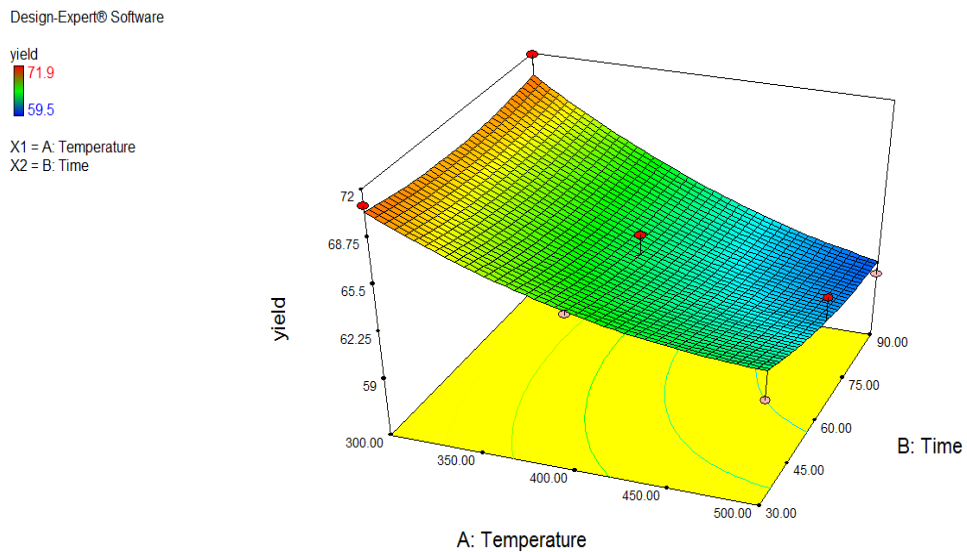


รูปที่ 4.14 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูง ด้วยวิธีการพื้นผิวดอปสนองแบบ 3 มิติ

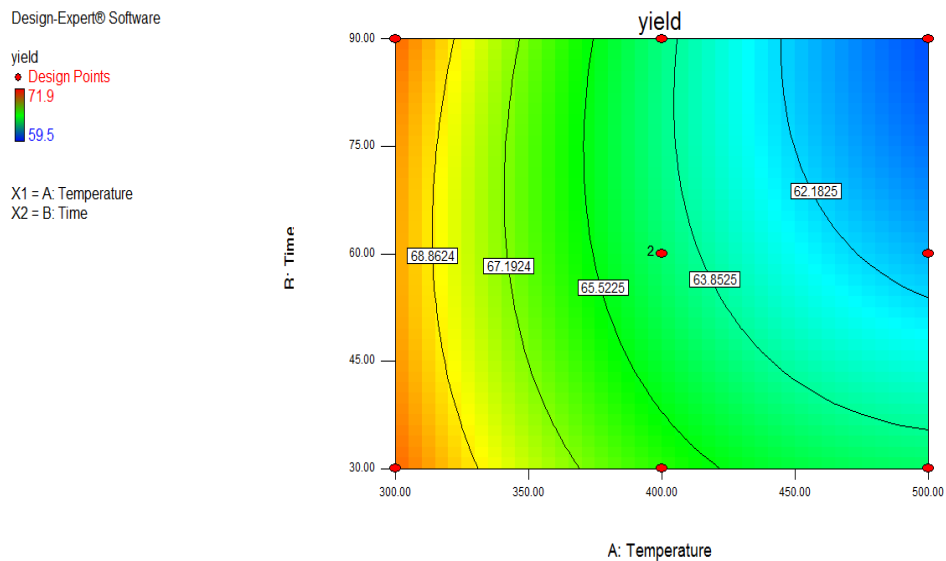


รูปที่ 4.15 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูง แบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 พิจารณาช่วงที่เหมาะสมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300 ถึง 330 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 ถึง 60 นาที เป็นช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้การคาร์บอไนซ์แท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม



รูปที่ 4.16 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีคาร์บอนสะสมของแท่งเชื้อเพลิงสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.17 ผลการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีคาร์บอนสะสมของแท่งเชื้อเพลิงสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พิจารณาช่วงที่เหมาะสมระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนสะสมแท่งเชื้อเพลิงที่ให้คาร์บอนสะสมของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงสูงพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300 ถึง 330 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 ถึง 90 นาที เป็นช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้การคาร์บอนสะสมแท่งเชื้อเพลิงมีคาร์บอนสะสมผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ร้อยละ 71.95

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงร่วมกับกราฟทำนายพบว่าช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงอยู่ในช่วง 300 ถึง 330 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 ถึง 60 นาที ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ช่วงปัจจัยที่ทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง

| ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย | ช่วงที่เหมาะสม | |
|----------------------------|-------------------------|-------------|
| | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) |
| ค่าพลังงานความร้อน | 300 – 330 | 30 – 60 |
| ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ | 300 – 330 | 30 – 90 |
| สรุปช่วงที่เหมาะสม | 300 – 330 | 30 – 90 |

จากตารางที่ 4.25 พบว่าช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงแล้วให้ค่าพลังงานความร้อนและค่าร้อยละผลิตภัณฑ์สูงจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 330 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 ถึง 90 นาที ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการใช้อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแห้งเชื้อเพลิง ผู้วิจัยจึงเลือกช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลา 60 นาที เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและผลการตอบสนองของปัจจัยต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์

4.4.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

นำผลการทดลองที่ได้มาทำการทดลองซ้ำโดยใช้สัดส่วนที่วิเคราะห์ผลได้จากตารางที่ 4.25 มาทำการทดลองให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยช่วงที่เหมาะสมนั้นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาให้น้อยที่สุด และให้ค่าพลังงานความร้อนและค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงเพื่อนำมากำหนดช่วงอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงให้มีความละเอียดมากขึ้น ดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการทดลองหาอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) | | | ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ | | |
|----------|-------------------------|-------------|-------------------------------|---------|---------|--------------------|-------|---------|
| | | | ค่าทดลอง | ทำนาย | P-Value | ค่าทดลอง | ทำนาย | P-Value |
| 1 | 310 | 30 | 4,538.9 | 4,538.4 | 0.71014 | 70.66 | 70.11 | 0.87048 |
| 2 | 310 | 60 | 4,364.3 | 4,363.9 | 0.55418 | 69.79 | 69.62 | 0.59906 |
| 3 | 330 | 30 | 4,282.4 | 4,282.1 | 0.05704 | 68.45 | 68.74 | 0.66398 |
| 4 | 330 | 60 | 4,232.1 | 4,231.2 | 0.55418 | 67.42 | 67.72 | 0.59254 |

จากการกำหนดช่วงอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบยืนยันผลพบว่าทั้ง 4 ชุดการทดลองให้ค่าพลังงานความร้อนและคาร์บอนผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน โดยการทดลองชุดที่ 1 ทำการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสที่เวลา 30 นาทีให้ค่าพลังงานความร้อนและคาร์บอนผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 4,538.9 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และร้อยละ 70.66 ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ 4 ให้ค่าพลังงานความร้อนและคาร์บอนผลิตภัณฑ์ต่ำสุดที่ 4,232.1 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และร้อยละ 67.42 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าทุกชุดการทดลอง มีค่า P-Value > 0.05 หมายถึง ทุกชุดการทดลองนั้นมีค่าจากการทดลองและค่าทำนายไม่แตกต่างกัน หลังจากทำการทดลองยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนแล้วจะนำแห้งเชื้อเพลิงที่ได้มาทำการทดสอบคุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงจากการยืนยันผล

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | ปริมาณความชื้น (%) | ปริมาณของแข็งรวม (%) | ปริมาณเถ้า (%) | ปริมาณของแข็งระเหย (%) |
|----------|-------------------------|-------------|--------------------|----------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 310 | 30 | 0.96 | 99.04 | 49.00 | 50.04 |
| 2 | 310 | 60 | 0.00 | 100 | 50.00 | 50.00 |
| 3 | 330 | 30 | 0.00 | 100 | 51.45 | 48.55 |
| 4 | 330 | 60 | 0.95 | 99.05 | 52.47 | 46.58 |

จากตารางที่ 4.27 พบว่าปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณเถ้า และปริมาณของแข็งระเหยในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการทดลองที่ 1 จากตารางที่ 4.27 มีปริมาณความชื้น และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดที่ร้อยละ 0.96 และร้อยละ 49.00 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยสูงที่สุดที่ร้อยละ 99.04 และร้อยละ 50.04 เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการทดลองจากตารางที่ 4.26 พบว่าการทดลองที่ 1 ทำการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสที่เวลา 30 นาที ให้ค่าพลังงานความร้อนและคาร์บอนผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 4,538.9 และร้อยละ 70.66 ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการคาร์บอนที่แห้งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 4,604.8 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และร้อยละ 71.95 จากตารางที่ 4.23 และตารางที่ 4.24 ตามลำดับ โดยมีปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำสุดที่ร้อยละ 1.92 และร้อยละ 48.03 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณ

ของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยสูงสุดที่ร้อยละ 98.08 และร้อยละ 50.05 เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ที่ต่ำกว่าแต่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

4.4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

4.4.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.0006 เมื่อค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($P\text{-Value} > 0.05$) หมายถึงแบบจำลองการถดถอยนั้นมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง หรือปัจจัยที่ศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนนั้น ดังนั้นสมการถดถอยที่ประมาณการณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.28

2) การทดสอบแบบจำลองการถดถอยของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีความเหมาะสมหรือไม่ โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.8710 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมกับข้อมูล ดังตารางที่ 4.28 ดังนี้

ตารางที่ 4.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง

| Source | df | SS | MS | F-Value | P-Value |
|-------------|----|------------|------------|---------|---------|
| Model | 5 | 1.065E+006 | 2.131E+005 | 19.18 | 0.0006 |
| Lack of fit | 6 | 51296.69 | 9.449E+005 | 0.32 | 0.8710 |
| Pure error | 1 | 26473.00 | 26473.00 | | |
| Residual | 7 | 77769.70 | 11109.96 | | |
| Total | 12 | 1.143E+006 | | | |

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับข้อมูล

พิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอยซึ่งมีเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนี้

3.1) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า standard Deviation (Std. Dev.) และค่า Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

3.2) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และค่า Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแบบจำลองการถดถอยพบว่าแบบจำลอง Quadratic เป็นแบบจำลองที่ให้ค่า R^2 และค่า Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่น และให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ดังตารางที่ 4.29 แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุด

ตารางที่ 4.29 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

| Source | Std. Dev. | PRESS | R^2 | Adj- R^2 |
|-----------|-----------|------------|--------|------------|
| Linear | 133.66 | 2.999E+005 | 0.8437 | 0.7376 |
| 2FI | 137.78 | 3.381E+005 | 0.8506 | 0.7042 |
| Quadratic | 85.40 | 2.811E+005 | 0.9320 | 0.7541 |
| Cubic | 98.37 | 4.465E+005 | 0.8984 | -2.9053 |

4.4.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสม หรือแบบจำลอง Quadratic แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

$$H_0 : \beta_j = 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลอง หรือปัจจัยที่มีค่า P-Value > 0.05 ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (อุณหภูมิและเวลา) ไว้ เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพบว่าเวลา (A) มีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.30

ดังนั้นสมการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาจากตารางที่ 4.31 มาสร้างสมการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากภาคก่อนน้ำเสียชุมชน ดังนี้

$$\text{ค่าพลังงานความร้อน} = 3948.00 - 327.06A - 33.87B + 44.18AB + 128.96A^2 + 39.57B^2$$

สมการค่าพลังงานความร้อนนี้สามารถนำไปใช้คาดการณ์ช่วงของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (อุณหภูมิและเวลา) เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าพลังงานความร้อนสูง

ตารางที่ 4.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

| Analysis of variance table [Partial of square] | | | | | |
|--|------------|----|------------|---------|---------|
| Source | SS | Df | MS | F-Value | P-Value |
| Model | 1.065E+006 | 5 | 2.131E+005 | 19.18 | 0.0006 |
| A | 9.449E+005 | 1 | 9.449E+005 | 85.05 | 0.0001 |
| B | 11380.65 | 1 | 11380.65 | 1.02 | 0.3452 |
| AB | 7805.72 | 1 | 7805.72 | 0.70 | 0.4296 |
| A ² | 90338.57 | 1 | 90338.57 | 8.13 | 0.0246 |
| B ² | 7556.00 | 1 | 7556.00 | 0.68 | 0.4367 |
| Residual | 77769.70 | 1 | 11109.96 | | |
| Corrected Total | 1.143E+006 | 12 | | | |

*หมายเหตุ A คือ อุณหภูมิ B คือ เวลา

ตารางที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

| Factor | Coefficient Estimate | Df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High |
|----------------|----------------------|----|----------------|------------|-------------|
| Intercept | 3948.00 | 1 | 69.94 | 3794.45 | 4101.56 |
| A-Temp. | -327.06 | 1 | 35.46 | -410.92 | -243.20 |
| B-Time | -33.87 | 1 | 33.47 | -113.00 | 45.26 |
| AB | 44.18 | 1 | 52.70 | -80.45 | 168.80 |
| A ² | 128.96 | 1 | 45.23 | 22.02 | 235.90 |
| B ² | 39.57 | 1 | 47.86 | -73.70 | 152.63 |

ผลจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.32 พบว่า

1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 105.40 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลังงานความร้อนมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานความร้อน (Mean) มีค่าเท่ากับ 4042.54

2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 2.811 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย เนื่องจากมีค่า Press ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

3) ค่า R² มีค่าเท่ากับ 0.9320 แสดงถึงปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลการตอบสนองได้ 93.20%

4) ค่า Adj-R² มีค่าเท่ากับ 0.8834 แสดงถึงการนำสมการนี้ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกลดลง 88.34%

5) ค่า Pred-R² มีค่าเท่ากับ 0.7541 แสดงถึงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความแปรผันทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 12.977 แสดงถึงแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้นเป็นที่ยอมรับเมื่อมีค่ามากกว่า 4

ตารางที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic

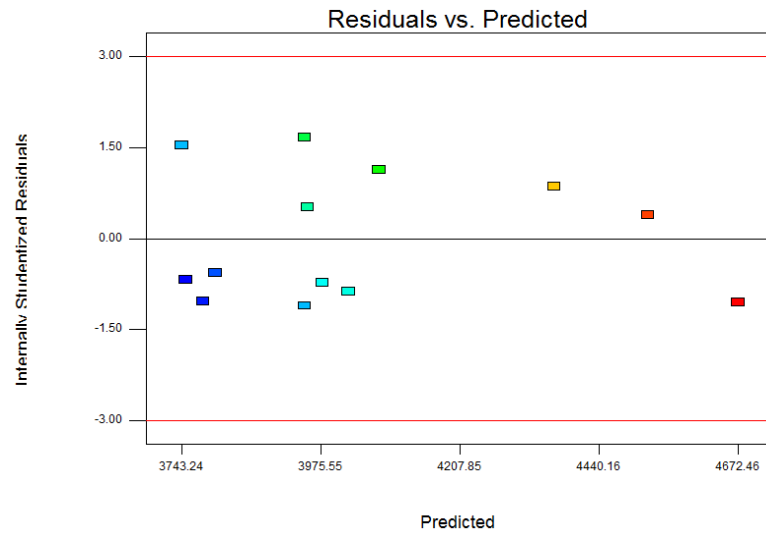
| | |
|---------------------|---------|
| Std. Dev. | 105.40 |
| Mean | 4042.54 |
| C.V. % | 2.61 |
| PRESS | 2.811 |
| R ² | 0.9320 |
| Adj-R ² | 0.8834 |
| Pred-R ² | 0.7541 |
| Adeq Precision | 12.977 |

4.4.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

การตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจากข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ การตรวจสอบการตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก ง.

1) การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบการตกค้างทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งการพล็อตส่วนตกค้างนี้เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน และความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการพล็อตแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย (Predict) ถ้าส่วนตกค้างอยู่ภายในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด $+3$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย

*หมายเหตุ สัญลักษณ์ ■ สีน้ำเงิน

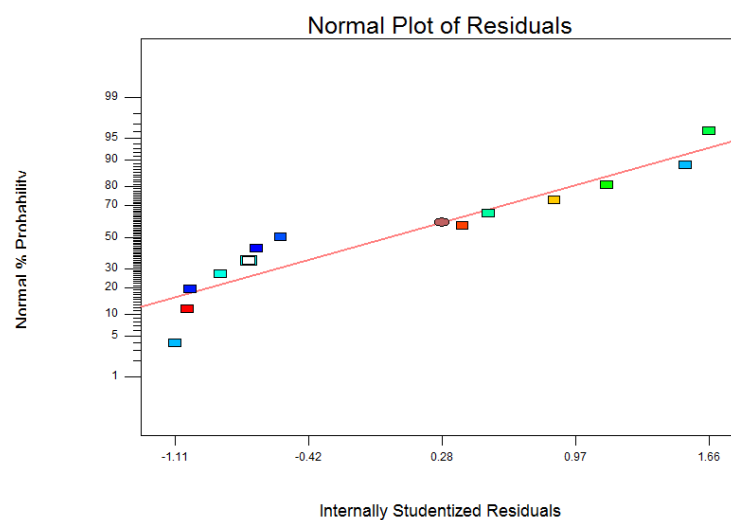
■ สีเขียว

■ สีเหลือง

■ สีแดง

แต่ละจุดในรูปที่ 4.18 ถึง รูปที่ 4.22 แทนชุดการทดลอง (Run)

การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected Values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยโดยพิจารณาจากการพล็อตแผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าแผนภาพการกระจายเข้าใกล้สมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงถึงรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ตั้งรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

2) การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณการแบบจำลองการถดถอยโดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii})

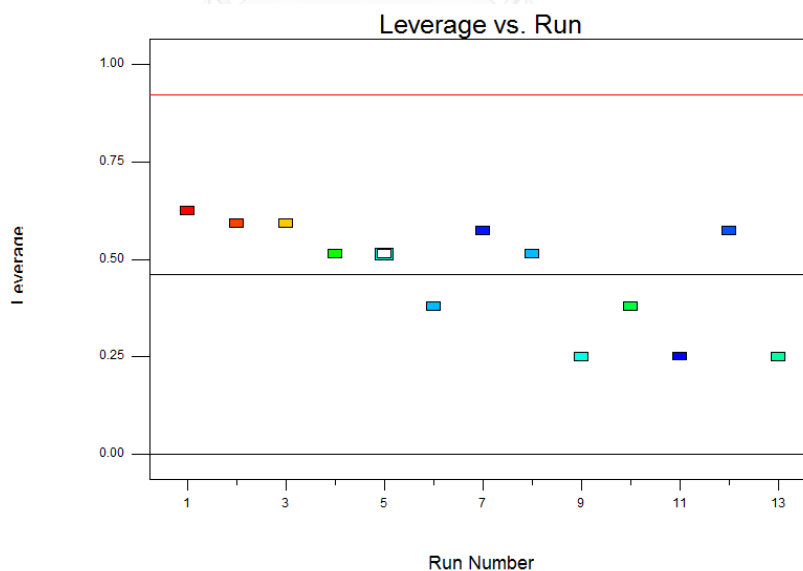
$$\text{โดย } h_{ii} > \frac{2p}{n} \text{ เมื่อ } p = k + 1$$

เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

n คือ จำนวนการทดลอง

จากแบบจำลองการถดถอย พบว่ามีจำนวนพารามิเตอร์ (p) ทั้งหมด 6 ตัว จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง (k) 5 ตัว และจำนวนการทดลอง (n) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะได้ค่า $h_{ii} > 1.000$ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษาเนื่องจากแผนภาพที่พล็อตได้มีค่าการกระจายไม่เกิน 1.000 ดังรูปที่ 4.20



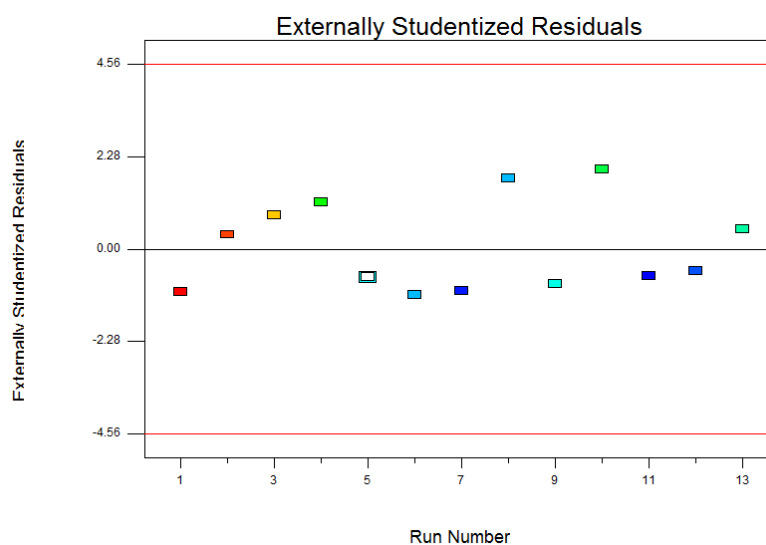
รูปที่ 4.20 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา

3) การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนองเป็นการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากค่าจริงว่าเบี่ยงเบนจากค่าทำนายไปเท่าใด โดยพิจารณาจากค่า Outlier (d_i) หรือ

Externally Studentized Residuals และค่า Studentized Residual (r_i) หากพบว่าค่าที่ได้มากกว่าช่วงกำหนดควบคุมจะถือว่าค่าที่ได้นั้นมีความผิดปกติเนื่องจากผลการตอบสนอง ควรนำมาตรวจสอบต่อไปว่าค่าที่ผิดปกตินั้นเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาต่อไป

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษานี้พบว่าค่าควบคุมอยู่ที่ +4.56 ดังรูปที่ 4.21 จะพบว่าทุกค่าการตอบสนองไม่เกินค่าควบคุม หมายถึง ในแต่ละลำดับการทดลองนี้ไม่พบความผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

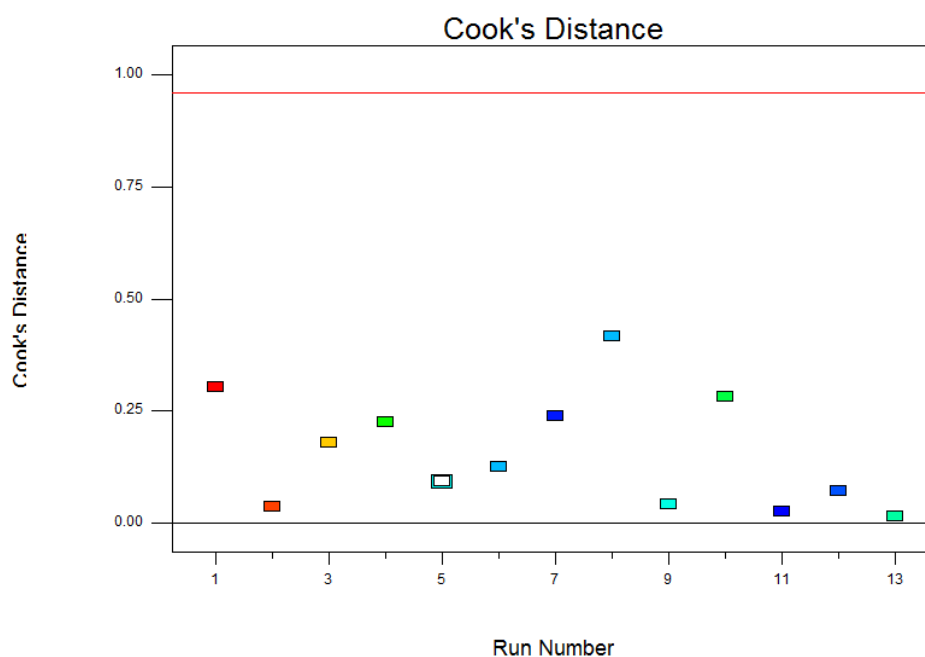


รูปที่ 4.21 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4) การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจาก Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้ในการวัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่าง และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัว ยกเว้นค่าสังเกตที่ i โดย $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล

จากแบบจำลองการถดถอยนี้กำหนดค่า Cook's Distance (D_i) ไม่เกิน 1 ดังรูปที่ 4.22 จะพบว่าไม่มีค่าใดมีค่า $D_i > 1$ จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่พบค่าที่มีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล



รูปที่ 4.22 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.4.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

4.4.5.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนองของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.0100 เมื่อค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ($P\text{-Value} > 0.05$) หมายถึงแบบจำลองการถดถอยนั้นมีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองต่อค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง หรือปัจจัยที่ศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของ

ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังนั้นสมการถดถอยที่ประมาณการณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าของค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.32

2) การทดสอบแบบจำลองการถดถอยของค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีความเหมาะสมหรือไม่ โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.3896 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมกับข้อมูล ดังตารางที่ 4.33 ดังนี้

ตารางที่ 4.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลการตอบสนอง

| Source | Df | SS | MS | F-Value | P-Value |
|-------------|----|--------|-------|---------|---------|
| Model | 5 | 169.65 | 33.93 | 7.46 | 0.0100 |
| Lack of fit | 6 | 30.39 | 5.06 | 3.46 | 0.3896 |
| Pure error | 1 | 1.46 | 1.46 | | |
| Residual | 7 | 31.85 | 4.55 | | |
| Total | 12 | 201.50 | | | |

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับข้อมูล

พิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอยซึ่งมีเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนี้

3.1) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า Standard Deviation (Std. Dev.) และค่า Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

3.2) เลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และค่า Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแบบจำลองการถดถอยพบว่าแบบจำลอง Quadratic เป็นแบบจำลองที่ให้ค่า R^2 และค่า $\text{Adj-}R^2$ สูงกว่าแบบจำลองอื่น และให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ดังตารางที่ 4.34 แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุด

ตารางที่ 4.34 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

| Source | Std. Dev. | PRESS | R^2 | $\text{Adj-}R^2$ |
|-----------|-----------|--------|--------|------------------|
| Linear | 2.14 | 76.61 | 0.7723 | 0.7267 |
| 2FI | 2.16 | 88.55 | 0.7911 | 0.7215 |
| Quadratic | 2.13 | 55.91 | 0.8419 | 0.7290 |
| Cubic | 2.26 | 196.53 | 0.8367 | 0.7466 |

4.4.5.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสม หรือแบบจำลอง Quadratic แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพื่อศึกษาปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง โดยสมมติฐานทดสอบ คือ

$$H_0 : \beta_j = 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลอง หรือปัจจัยที่มีค่า $P\text{-Value} \geq 0.05$ ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (อุณหภูมิและเวลา) ไว้ เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยพบว่า อุณหภูมิ (A) มีความสัมพันธ์กับค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.35

ดังนั้นสมการทำนายค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงที่วิเคราะห์ได้ทางสถิติ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาจากตารางที่ 4.36 มาสร้างสมการทำนายค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ดังนี้

$$\text{ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์} = 64.39 - 4.02A - 0.99B - 0.98AB + 1.37A^2 + 0.74B^2$$

สมการค่าความทนแรงอัดนี้สามารถนำไปใช้คาดการณ์สัดส่วนของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (อุณหภูมิ และเวลา) เพื่อให้ได้ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง

ตารางที่ 4.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลอง Quadratic

| Analysis of variance table [Partial of square] | | | | | |
|--|--------|----|--------|---------|---------|
| Source | SS | Df | MS | F-Value | P-Value |
| Model | 169.65 | 5 | 33.93 | 7.46 | 0.0100 |
| A | 142.65 | 1 | 142.65 | 31.35 | 0.0008 |
| B | 9.75 | 1 | 9.75 | 2.14 | 0.1866 |
| AB | 3.80 | 1 | 3.80 | 0.84 | 0.3910 |
| A ² | 10.19 | 1 | 10.19 | 2.24 | 0.1782 |
| B ² | 2.63 | 1 | 2.63 | 0.58 | 0.4720 |
| Residual | 31.85 | 1 | 4.55 | | |
| Corrected Total | 201.50 | 12 | | | |

*หมายเหตุ A คือ อุณหภูมิ B คือ เวลา

ตารางที่ 4.36 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

| Factor | Coefficient Estimate | Df | Standard Error | 95% CI Low | 95% CI High |
|----------------|----------------------|----|----------------|------------|-------------|
| Intercept | 64.39 | 1 | 1.31 | 61.28 | 67.50 |
| A-Temp. | -4.02 | 1 | 0.72 | -5.72 | -2.32 |
| B-Time | -0.99 | 1 | 0.68 | -2.59 | 0.61 |
| AB | -0.98 | 1 | 1.07 | -3.50 | 1.55 |
| A ² | 1.37 | 1 | 0.92 | -0.79 | 3.53 |
| B ² | 0.74 | 1 | 0.97 | -1.55 | 3.03 |

ผลจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.37 พบว่า

1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 2.13 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Mean) มีค่าเท่ากับ 65.60

2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 55.91 แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย เนื่องจากมีค่า Press ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น

3) ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8419 แสดงถึงปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลการตอบสนองได้ 84.19%

4) ค่า Adj- R^2 มีค่าเท่ากับ 0.7290 แสดงถึงการนำสมการนี้ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกลดลง 72.90%

5) ค่า Pred- R^2 มีค่าเท่ากับ 0.4744 แสดงถึงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความแปรผันทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย

6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 8.520 แสดงถึงแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้นเป็นที่ยอมรับเมื่อมีค่ามากกว่า 4

ตารางที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic

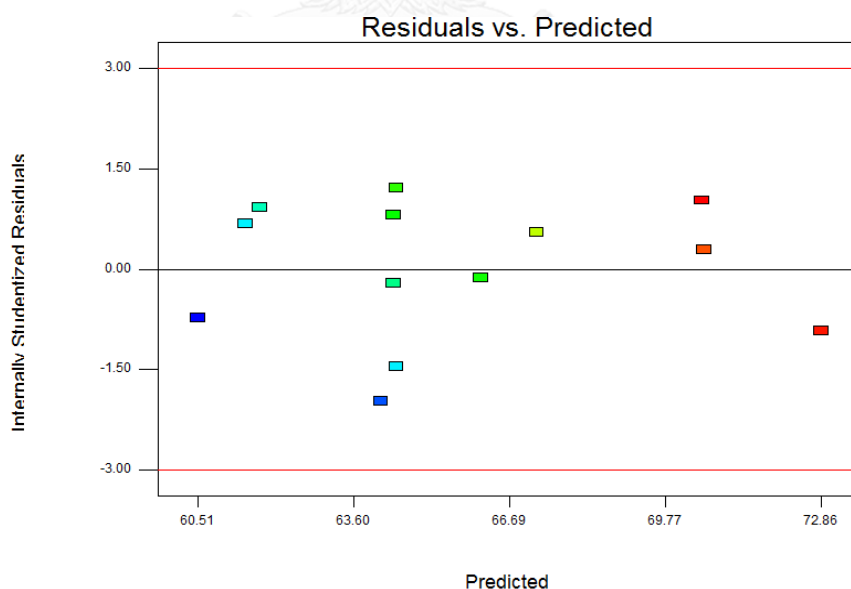
| | |
|----------------|--------|
| Std. Dev. | 2.13 |
| Mean | 65.60 |
| C.V. % | 3.25 |
| PRESS | 55.91 |
| R^2 | 0.8419 |
| Adj- R^2 | 0.7290 |
| Pred- R^2 | 0.4744 |
| Adeq Precision | 8.520 |

4.4.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

การตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจากข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ การตรวจสอบการตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก ง.

1) การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

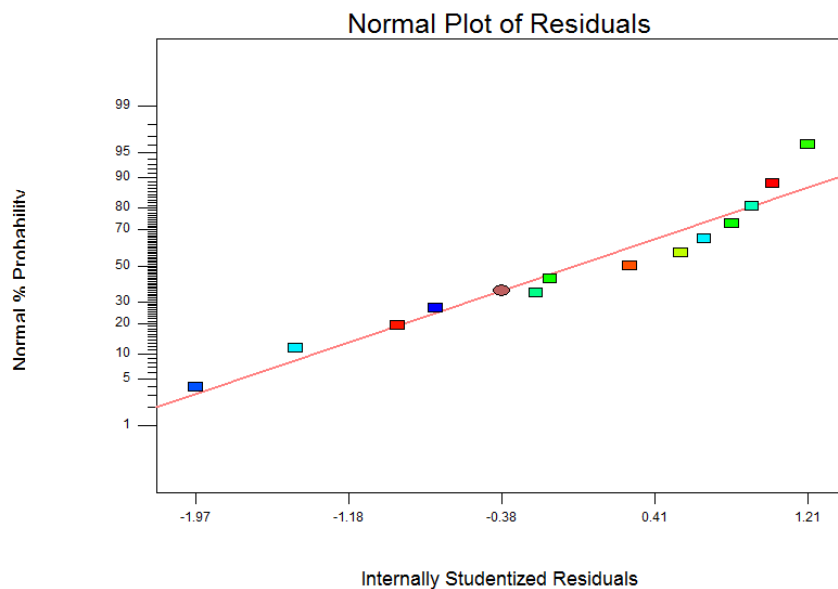
การตรวจสอบการตกค้างทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งการพล็อตส่วนตกค้างนี้เป็นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน และความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการพล็อตแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย (Predict) ถ้าส่วนตกค้างอยู่ในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด $+3$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างขึ้นนั้นเหมาะสมกับข้อมูล ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณการถดถอย

การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected Values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยโดยพิจารณาจากการพล็อต

แผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าแผนภาพการกระจายเข้าใกล้สมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงถึงรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

2) การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณการแบบจำลองการถดถอยโดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii})

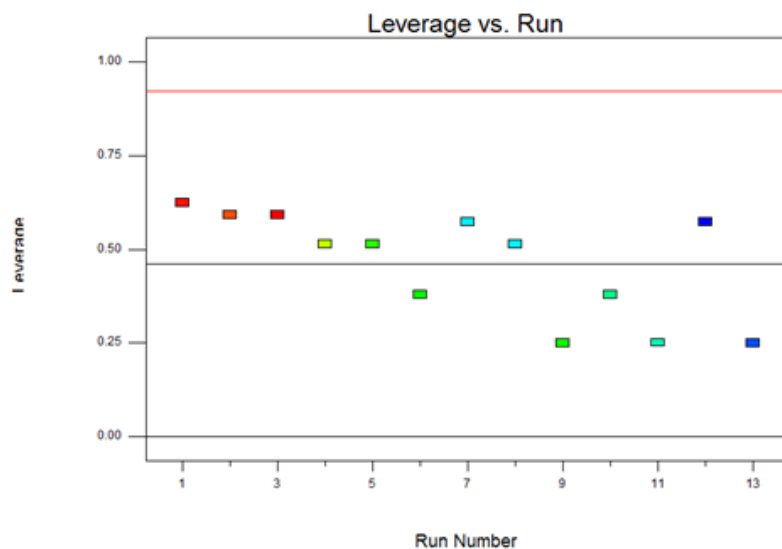
$$\text{โดย } h_{ii} > \frac{2p}{n} \text{ เมื่อ } p = k + 1$$

เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

n คือ จำนวนการทดลอง

จากแบบจำลองการถดถอย พบว่ามีจำนวนพารามิเตอร์ (p) ทั้งหมด 6 ตัว จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง (k) 5 ตัว และจำนวนการทดลอง (n) ทั้งหมด 13 การทดลอง จะได้ค่า $h_{ii} > 0.9230$ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษาเนื่องจากแผนภาพที่พล็อตได้มีค่าการกระจายไม่เกิน 0.9230 ดังรูปที่ 4.25

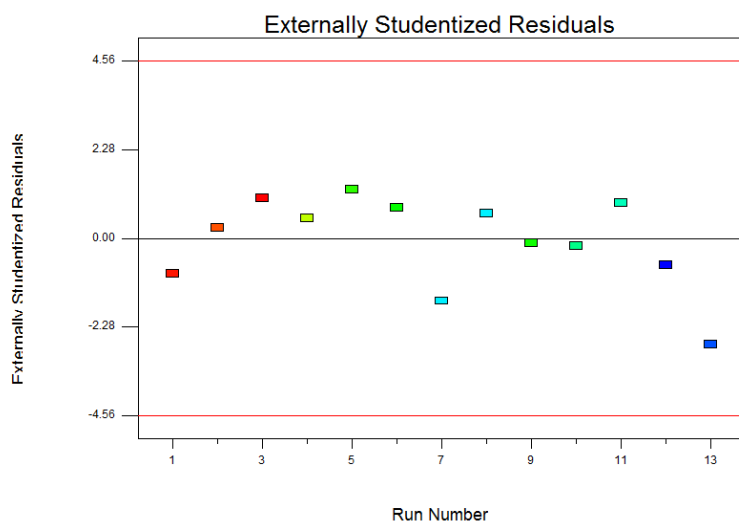


รูปที่ 4.25 การตรวจสอบค่าผิดปกติของค่าปัจจัยที่ศึกษา

3) การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติของผลตอบสนองเป็นการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากค่าจริงว่าเบี่ยงเบนจากค่าทำนายไปเท่าใด โดยพิจารณาจากค่า d_i หรือ Externally Studentized Residuals และค่า Studentized Residual (r_i) หากพบว่าค่าที่ได้มากกว่าช่วงกำหนดควบคุมจะถือว่าค่าที่ได้นั้นมีความผิดปกติเนื่องจากการตอบสนองควรนำมาตรวจสอบต่อไปว่าค่าที่ผิดปกติเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาต่อไป

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษานี้พบว่าค่าควบคุมอยู่ที่ ± 4.56 ดังรูปที่ 4.26 จะพบว่าทุกค่าการตอบสนองไม่เกินค่าควบคุม หมายถึง ในแต่ละลำดับการทดลองนี้ไม่พบความผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

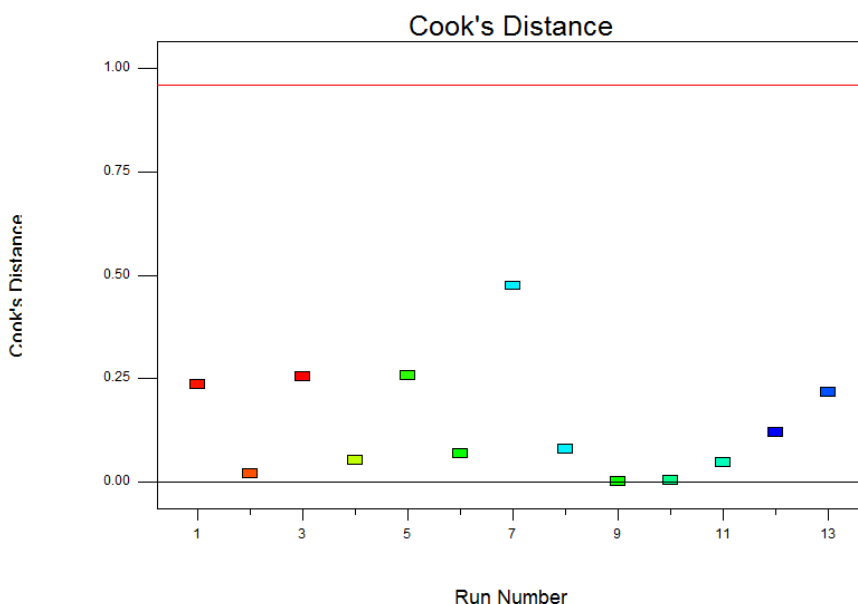


รูปที่ 4.26 ค่าผิดปกติของผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4) การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการถดถอยจะพิจารณาจาก Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้ในการวัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่าง และสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i โดย $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล

จากแบบจำลองการถดถอยนี้กำหนดค่า Cook's Distance (D_i) ไม่เกิน 1 ดังรูปที่ 4.27 จะพบว่าไม่มีค่าใดมีค่า $D_i > 1$ จึงสามารถสรุปได้ว่าไม่พบค่าที่มีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล



รูปที่ 4.27 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.4.6 การตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี

การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์จะทำการตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนทางทฤษฎีซึ่งได้จากการคำนวณคำนวณและเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนจากทฤษฎีกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบบดต่อตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังอยู่ที่ 5 : 4 : 1 ก่อนทำการคาร์บอนไนซ์จะมีค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎีซึ่งคำนวณได้ ดังตารางที่ 4.38

ตารางที่ 4.38 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี

| วัตถุดิบ | ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี ¹ (kcal/kg.) | สัดส่วนโดยน้ำหนัก ² (kg.) | ค่าพลังงานความร้อนจากการคำนวณ (kcal/kg.) |
|----------------------|--|--------------------------------------|--|
| กากตะกอนน้ำเสียชุมชน | 2,914.64 | 0.5 | 1,457.32 |
| แกลบบด | 3,800.40 | 0.4 | 1,520.16 |
| แป้งมันสำปะหลัง | 4,100.50 | 0.1 | 410.05 |
| รวม | | 1.0 | 3,387.53 |

*หมายเหตุ ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี¹ ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Bomb calorimeter และสัดส่วนโดยน้ำหนัก² คำนวณโดยกำหนดให้น้ำหนักโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 1 กิโลกรัม

2) การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยจะเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎีจากข้อ 1) กับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 4.39

ตารางที่ 4.39 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| งานวิจัย | วัตถุดิบ | สัดส่วนที่เหมาะสม | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) |
|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| ณัฐพร ดำรงโรจน์ วัฒนา (2546) | กากตะกอนน้ำเสียชุมชน และต้นธูปฤาษี | 1 : 2 | 2,826.41 |
| สุริยา ชัยเดชชยากุล (2544) | กากตะกอนน้ำเสีย และ เศษชิ้นไม้สับ | 40 : 60 | 2,817.86 |
| เกรียงไกร วงศาโรจน์ (2553) | สับุดำ แกลบ และแป้งมันสำปะหลัง | 65 : 20 : 15 | 3,468.60 |
| Muller (2000) | กากตะกอนน้ำเสียชุมชน และเศษใบไม้แห้ง | 1 : 1 | 4,300.04 |
| Oladeji (2010) | แท่งเชื้อเพลิงที่อัดจาก แกลบ | - | 3,200.05 |
| งานวิจัยนี้ | กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบ และ แป้งมัน | 5 : 4 : 1 | 3,387.53 |

จากตารางที่ 4.39 พบว่าค่าพลังงานความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านการคาร์บอไนซ์ จะมีค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 2,800.00 - 4,300.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยค่าพลังงานความร้อนจากที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ค่าพลังงานความร้อนที่คำนวณได้จากทฤษฎี คือ 3,387.53 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

3) การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอไนซ์

จากตารางที่ 4.24 ทำการคาร์บอไนซ์แท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าพลังงานความร้อน 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม จึงนำค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้มาทำการทดลองเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่ได้กับจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งผ่านการคาร์บอไนซ์แล้ว ดังตารางที่ 4.40

ตารางที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน หลังผ่านการคาร์บอไนซ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| งานวิจัย | วัตถุดิบ | การคาร์บอไนซ์ | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) |
|---|--|-----------------------------|-------------------------------|
| นิสา พักตร์วิไล | กากตะกอนน้ำเสียและแกลบ | 500 องศาเซลเซียส 90 นาที | 4,543.20 |
| ทองทิพย์ พูลเกษม (2542) | เชื้อเพลิงอัดแท่งจากแกลบ | 300 องศาเซลเซียส 40 นาที | 4,300.00 |
| กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (2544) | เศษถ่านแกลบอัดแท่งและผักตบชวาหมัก | 270 องศาเซลเซียส 60 นาที | 4,295.60 |
| กาญจนา บุญยเกียรติ และเพียรพรรคทัศตร (2544) | แกลบและชานอ้อย | 330 องศาเซลเซียส 30 นาที | 4,895.07 |
| ภัทรานิตย์ แซ่สม (2546) | กากตะกอนน้ำเสียชุมชนและใบกระถินณรงค์ | 450 องศาเซลเซียส 50 นาที | 4,431.75 |
| งานวิจัยนี้ | กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบบด และแป้งมันสำปะหลัง | 300 องศาเซลเซียส 60 นาที | 4,604.82 |

จากตารางที่ 4.40 พบว่าค่าพลังงานความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนแล้ว จะให้ค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 4,300.00 - 4,900.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการคาร์บอน ในงานวิจัยนี้เมื่อทำการคาร์บอนแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบโดยมีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงเดียวกับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนจากงานวิจัยอื่น ๆ

4.4.7 ประเมินต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

4.4.7.1 ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง แบ่งเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันดังนี้

- 1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ เช่น ค่าวัตถุดิบในการผลิต
- 2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่น ค่าไฟฟ้า โดย

ไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์และค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดังตารางที่ 4.41

ตารางที่ 4.41 ราคาต้นทุนแปรผันในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

| รายการ | จำนวน | ราคาต่อหน่วย | หมายเหตุ |
|----------------------|--------------|--------------|--|
| กากตะกอนน้ำเสียชุมชน | 390 กิโลกรัม | - | กากตะกอนน้ำเสียชุมชนได้รับความอนุเคราะห์จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม |
| แกลบสด | 254 กิโลกรัม | 8 | บาทต่อกิโลกรัม |
| แป้งมันสำปะหลัง | 40 กิโลกรัม | 10 | บาทต่อกิโลกรัม |
| ค่าไฟฟ้า | - | 1.3576 | อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 สำหรับ ส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร |

4.4.7.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

1) ต้นทุนคงที่ คำนวณจากราคาวัตถุดิบรวมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ได้แก่ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบสด และตัวประสาน โดยคิดจากน้ำหนักรวมของแท่งเชื้อเพลิงก่อนและหลังการคาร์บอน ดังนี้

แย่งซื้อเพลิ่งก่อนผ่านการคาร์บอน จะมีน้ำหนักโดยรวมประมาณ 700 กิโลกรัม ใช้สัดส่วนน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบบัดต่อตัวประสาที่ 5 : 4 : 1 หรือประมาณ 390 : 254 : 40 กิโลกรัม ตามลำดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กากตะกอน ราคา 0 บาท/กิโลกรัม จำนวน 390 กิโลกรัม

ดังนั้น ราคารวมของกากตะกอน คือ $0 \times 390 = 0$ บาท

แกลบบัด ราคา 8 บาท/กิโลกรัม จำนวน 254 กิโลกรัม

ดังนั้น ราคารวมของแกลบบัด คือ $8 \times 254 = 2,032$ บาท

แยมันสำปะหลัง ราคา 10 บาท/กิโลกรัม จำนวน 40 กิโลกรัม

ดังนั้น ราคารวมของแยมันสำปะหลัง คือ $40 \times 10 = 400$ บาท

ดังนั้นราคารวมค่าวัตถุดิบในการผลิตแย่งซื้อเพลิ่งก่อนนำไปทำการคาร์บอน คือ $0 + 2,032 + 400 = 2,432$ บาท โดยแย่งซื้อเพลิ่งก่อนนำไปทำการคาร์บอนจะมีน้ำหนักประมาณ 700 กิโลกรัม ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตแย่งซื้อเพลิ่งก่อนทำการคาร์บอน คือ $2,432/700 = 3.50$ บาทต่อกิโลกรัม

แย่งซื้อเพลิ่งหลังผ่านการคาร์บอน จะมีน้ำหนักโดยรวมประมาณ 300 กิโลกรัม ใช้สัดส่วนน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบบัดต่อตัวประสาที่ 5 : 4 : 1 หรือประมาณ 390 : 254 : 40 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยใช้ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตแย่งซื้อเพลิ่งก่อนทำการคาร์บอนที่ได้จากวิธีข้างต้นจะมีราคา 3.50 บาทต่อกิโลกรัม และค่าไฟคำนวณเฉพาะค่าไฟจากเตาเผา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เตาเผา กำลังไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 2 ชั่วโมง/วัน

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $15 \times 2 \times 1.3576 = 40.72$ บาท/วัน

ทำการคาร์บอนวันละ 1 ครั้ง ทั้งหมด 10 วัน วันละ 30 กิโลกรัม

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแย่งซื้อเพลิ่งประมาณ 300 กิโลกรัม = $40.72 \times 10 = 407.2$ บาทต่อ 300 กิโลกรัม เท่ากับกิโลกรัมละ 1.36 บาท

ดังนั้นราคารวมค่าวัตถุดิบในการผลิตแย่งซื้อเพลิ่งหลังทำการคาร์บอน คือ $3.50 + 1.36 = 4.86$ บาท

2) ต้นทุนแปรผัน คือ ค่าไฟฟ้าในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนใน งานวิจัยนี้จะทำการคาร์บอนแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาทีต่อ การคาร์บอน 1 ครั้ง ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 300 กิโลกรัม มีการคาร์บอนประมาณ 10 ครั้ง โดยทำ การคาร์บอนแท่งเชื้อเพลิงครั้งละประมาณ 30 กิโลกรัม ใช้เวลาครั้งละ 60 นาที โดยไม่รวม ระยะเวลาที่เตาใช้ในการคลายความร้อน ซึ่งมีวิธีการคำนวณ ดังสมการที่ 4.1

$$Z = KW \times H \times 1.3576 \quad (4.1)$$

| | | |
|-------|----|--|
| เมื่อ | Z | คือ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน (บาท) |
| | KW | คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์) |
| | H | คือ จำนวนชั่วโมงที่ใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในหนึ่งวัน (ชั่วโมง) |

ต้นทุนแปรผันในงานวิจัยนี้จะคำนวณจากค่าไฟฟ้าต่อวันที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ โดย คำนวณจากค่าไฟฟ้าหน่วยละ 1.365 (อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 สำหรับส่วนราชการและองค์กรที่ ไม่แสวงหากำไร) รายละเอียด ดังนี้

เครื่องตัดและบด กำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 1 ชั่วโมง/วัน
 ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $2.2 \times 1 \times 1.3576 = 3.00$ บาท/วัน

เครื่องอัดแท่ง กำลังไฟฟ้า 1.5 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 2 ชั่วโมง/วัน
 ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $1.5 \times 2 \times 1.3576 = 4.07$ บาท/วัน

เตาเผา กำลังไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 2 ชั่วโมง/วัน
 ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $15 \times 2 \times 1.3576 = 40.72$ บาท/วัน

ทำการคาร์บอนแท่งเชื้อเพลิง 300 กิโลกรัม (กก.) ทั้งหมด 10 วัน
 (วันละ 10 กิโลกรัม)

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $40.72 \times 10 = 407.2$ บาท/วัน

ตู้อบ กำลังไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ จำนวนชั่วโมงที่ใช้ในหนึ่งวัน 6 ชั่วโมง
 ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $2 \times 6 \times 1.3576 = 16.3$ บาท/วัน

ดังนั้นราคารวมค่าไฟฟ้าโดยประมาณในการผลิตแ่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมในหนึ่งวัน คือ $3.00 + 4.07 + 407.2 + 16.3 = 430.57$ บาท/300 กิโลกรัม/วัน หรือ 1.44 บาท/กิโลกรัม/วัน

จากงานวิจัยนี้สามารถประเมินราคาต้นทุนในการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนได้ ดังตารางที่ 4.42

ตารางที่ 4.42 ประเมินราคาต้นทุนในการผลิตแ่งเชื้อเพลิง

| รายการ | ราคา |
|---------------------------------|---------------------|
| แ่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนซ์ | 3.50 บาทต่อกิโลกรัม |
| แ่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอนซ์ | 4.86 บาทต่อกิโลกรัม |



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับแกลบ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานแล้วทำการอัดขึ้นรูปด้วยเทคนิคเอ็กทรูชัน (Extrusion) เพื่อหาสัดส่วนและสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด ค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ได้ผลการทดลอง ดังนี้

5.1.1 การทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง คือ กากตะกอนน้ำเสียชุมชน แกลบสด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง เมื่อนำทั้ง 3 ปัจจัยมาออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลาง และเลือกแบบจำลอง Quadratic เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับงานวิจัยพบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนต่อแกลบสดต่อตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงสุด คือ สัดส่วน 5 : 4 : 1 ให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุดที่ 0.8337 MPa ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด อีกทั้งคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ยังให้ค่าความทนแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.35 MPa

5.1.2 การทดลองหาช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน และค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อทำการคาร์บอนไนซ์แล้ว คือ อุณหภูมิและเวลา จึงนำปัจจัยทั้ง 2 นี้ มาออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางและเลือกแบบจำลอง Quadratic เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับงานวิจัยพบว่าคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ 4,604.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และร้อยละ 71.95 ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำสุดที่ร้อยละ 1.92 และร้อยละ 48.03 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยสูงสุดที่ร้อยละ 98.08 และร้อยละ

50.05 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนน้อยที่สุดเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและเวลาในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง อีกทั้งคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงยังให้ค่าพลังงานความร้อนใกล้เคียงกับเกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือ 5,000.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่ง, 2547)

5.1.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม โดยไม่คิดค่าอุปกรณ์และค่าแรงงานในการผลิต เนื่องจากเป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ คือ แท่งเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านการคาร์บอน 3.50 บาทต่อกิโลกรัม และแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอน 4.86 บาทต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

- 1) ศึกษาชีวมวล หรือเศษวัสดุเหลือใช้อื่น ๆ ที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าแกลบเพื่อเป็นการเพิ่มค่าพลังงานความร้อนให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าตามเกณฑ์ คือ ไม่ต่ำกว่า 5,000.00 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่ง, 2547) เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม เป็นต้น
- 2) ศึกษาทดลองการทำ Long lasting (อายุการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิง) เพื่อการทำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

รายการอ้างอิง

Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM) (2007a)
Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics
ASTM D1621-10 (Vol. 8.01).

Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM) (2007b)
Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal ASTM D5865-07 (Vol.
5.06).

Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards (ASTM) (2007c)
Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and
Coke ASTM D3173-03 (Vol. 5.06).

Muller and Dietrich (2000) *Sewage sludge fuel briquette*: US. Patent.

Oladeji J.T. (2010) *Fuel Characterization of Briquettes Produce from Corncob and*
Ricehusk Residues. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1), 101-
106.

Schulz and Helmut W (1998) *Sewage sludge disposal process and product*: US
Patent.

Slupek S, Buczek, A., Kurcz, L., and Sekula, R. (2000) *Energy Recovery from Liquid*
Wastes of a Sewage-Treatment Plant. *Energy Conversion & Management*:
641-648.

กรมควบคุมมลพิษ. (2557a) การบำบัดน้ำเสียและกากตะกอน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s3 [20 กันยายน 2558].

กรมควบคุมมลพิษ. (2557b) น้ำเสียชุมชน.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s1 [20 กันยายน 2558].

กรมป่าไม้ ส่วนข้อมูลกลางสำนักสารนิเทศ (2540) สถิติป่าไม้ของประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร:
โรงพิมพ์ เฟื่องฟ้า พรินต์ติ้ง จำกัด.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556) ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [ออนไลน์].

แหล่งที่มา <http://www.dede.go.th> [14 กันยายน 2558].

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2540) รายงาน
พลังงานของประเทศไทยปี 2539, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ พี เอ ลีฟวิ่ง.

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการพลังงาน และหน่วยวิจัยและพัฒนาโครงการส่วนพระองค์
สวนจิตรลดา. (2540) การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวจากผักตบชวาโดยใช้แกลบเป็น
ส่วนผสม.

กัญญา บุญเกียรติ และเพียรพรศ ทศกร (2544) การอัดแท่งเชื้อเพลิงก้อน, กรุงเทพมหานคร:
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประเทศไทย.

เกรียงไกร วงศาโรจน์ (2554) การผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากสับุดำ. วารสารวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ณัฐพร ดำรงโรจน์วัฒนา. (2546) การศึกษาการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษวัสดุเหลือใช้
ทางการเกษตรเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ทองทิพย์ พลุเกษม. (2542) การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนเพื่อทดแทนฟืนและถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ธนัญชัย ระวังวงศ์ และธีรพงศ์ จันทะเดช. (2538) การพัฒนาและปรับปรุงเชื้อเพลิงกระดากกล่องลูกฟูกด้วยเยื่อจากต้นธูปฤๅษี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธเรศ ศรีสถิตย์ (2557) วิศวกรรมการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นารา พิทักษ์อรุณพน (2542) รายงานฉบับที่ 2 โครงการวิจัยที่ ภ. 31 – 05 พัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้ชั้นอุตสาหกรรม. เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้. , กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

นิธิพงศ์ อนุรักษ์พงษ์ธร. (2546) การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นิศากร ดอนกระสินธุ์. (2545) การนำกากไขมันจากบ่อดักไขมันของสถานที่จำหน่ายอาหารมาผสมกับขี้เลื่อยเพื่อเป็นแท่งเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ประทีป ปิ่นท้วม. (2538) การศึกษาการนำซีลี้อยเหลือทิ้งหลังจากการเพาะเห็ดมาใช้ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปัจจรัตน์ โลจันนท์ และคณะ (2554) พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

พลกฤษณ์ จิตต์โต. (2542) สมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2549) ชีวมวล (*biomass*), กรุงเทพมหานคร: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. .

วานิช โสพาสพ. (2549) การผลิตถ่านอัดแท่งด้วยเศษวัสดุเหลือใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยนครสวรรค์.

วารี ช้วนรักษธรรม (2556) ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลไทยสู่ทางเลือกใหม่ด้านพลังงานทดแทน. วารสาร *Engineering Today*

วิรัชช พานิชวงศ์ (2545) การวิเคราะห์การถดถอย = *Regression analysis*, กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

วีระ ชานวิทิตกุล. (2546) การบำบัดน้ำเสียและกากตะกอน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.tumcivil.com/engfanatic/article_gen.php?article_id=112&hit=1 [24 กันยายน 2558].

ศกลธน ราโชกาญจน์. (2556) สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการ
ฟื้นผิวดอบสนอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมใจ กาญจนวงศ์ (2543) การหมักมูลฝอยชุมชนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยวิธีไร้ออกซิเจนแบบลิซเบด,
เชียงใหม่: สำนักพิมพ์และวารสารมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สรินทร์ ลิ้มปนาท. (2540) ประโยชน์จากเกลบของเหลือใช้ทางการเกษตร [ออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news> [26 กันยายน 2558].

สำนักงานระบายน้ำกรุงเทพมหานคร. (2555) โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม. [ออนไลน์].
แหล่งที่มา http://dds.bangkok.go.th/waterreuse/plant_nongkam.php [22 กันยายน
2558].

สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (2556) อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน, กรุงเทพมหานคร:
โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุริยา ชัยเดชชยากุล. (2544) การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย
และเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

เสริมพล รัตน์สุข และไชยยุทธ์ กลิ่นสุคนธ์ (2538) การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่ง
ชุมชน, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศแห่งประเทศญี่ปุ่น (Jica). (2554) การสำรวจเบื้องต้นโครงการ
บำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครในประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา
http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12034591.pdf [19 มีนาคม 2559].

อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ (2551) ศึกษาการผลิตแห้งเชื้อเพลิงจากชี้เถ้าแกลบผสมขี้ข้าวโพดและ
กะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กทราซันโดยใช้แปงเปียกเป็นตัวประสาน. บทความการประชุม
วิชาการเครือข่ายการวิจัยของสถาบันอุดมศึกษา

อานุก แก้ววงศ์. (2548) บทความวิชาการ ประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน. ภาควิชาชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

อาภาวดี เบ็ญจมาธารถกุล. (2546) การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อ
เป็นพลังงานทดแทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการ
สิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อำนาจ สรชาติ (2546) ถ่านจากชี้เลี้ยงอัด, กรุงเทพมหานคร: กรมป่าไม้.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก



ลักษณะแห่งเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 1 | 2.00 | 2.50 | 0.50 |  |
| 2 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |  |
| 3 | 4.00 | 0.00 | 1.00 |  |
| 4 | 4.00 | 2.50 | 0.00 |  |




ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 5 | 4.00 | 5.00 | 0.50 |  |
| 6 | 4.00 | 5.00 | 0.50 |  |
| 7 | 7.00 | 0.00 | 0.50 |  |
| 8 | 7.00 | 2.50 | 0.00 |  |


ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 9 | 7.00 | 2.50 | 0.50 |  |
| 10 | 7.00 | 2.50 | 0.50 |  |
| 11 | 7.00 | 2.50 | 1.00 |  |
| 12 | 7.00 | 2.50 | 1.50 |  |


ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 13 | 7.00 | 5.00 | 0.50 |  |
| 14 | 7.00 | 7.00 | 0.50 |  |
| 15 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |  |
| 16 | 10.00 | 0.00 | 1.00 |  |

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2

| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 17 | 10.00 | 5.00 | 0.00 |  |
| 18 | 10.00 | 5.00 | 0.50 |  |
| 19 | 10.00 | 5.00 | 1.00 |  |
| 20 | 12.00 | 2.50 | 0.50 |  |

ตารางที่ ก.2 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2 (ทดสอบเย็นย่นผล)


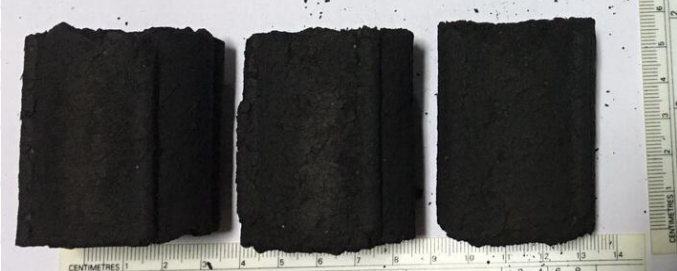

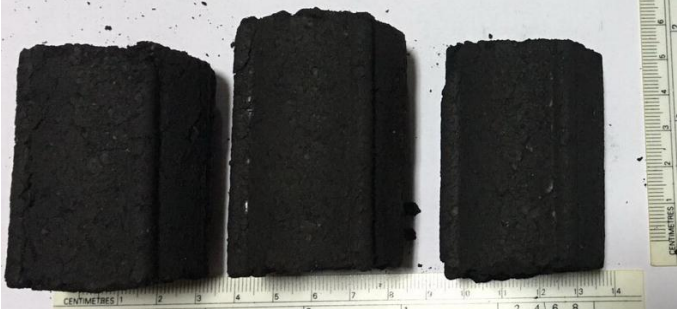
| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 1 | 4.00 | 5.00 | 1.00 |  |
| 2 | 5.00 | 3.00 | 0.00 |  |
| 3 | 5.00 | 3.00 | 0.50 |  |
| 4 | 5.00 | 3.00 | 1.00 |  |

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงหลังขึ้นรูปในการทดลองตอนที่ 2 (ทดสอบยืนยันผล)



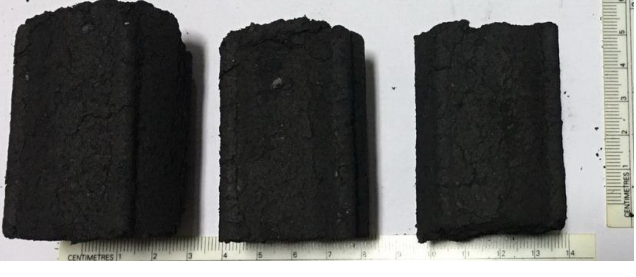
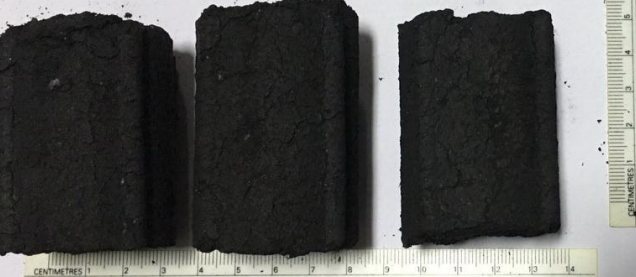
| การทดลอง | สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน) | | | ลักษณะแท่งเชื้อเพลิง |
|----------|---------------------------|------|-----------|--|
| | กากตะกอน | แกลบ | ตัวประสาน | |
| 5 | 5.00 | 4.00 | 1.0 |  |



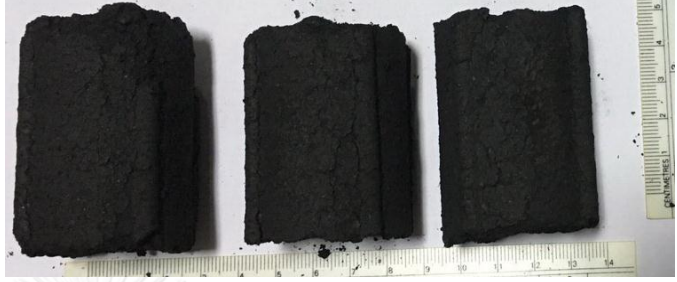


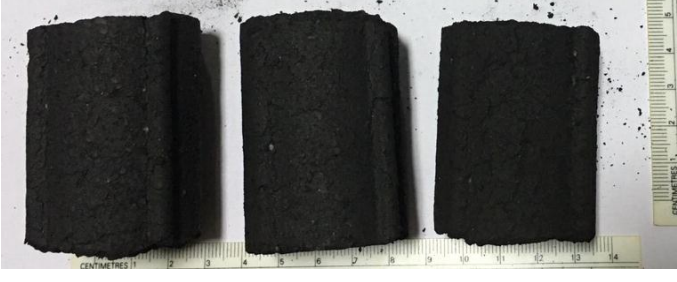
ตารางที่ ก.3 แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ในตอนี่ 4

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง |
|----------|-------------------------|-------------|--|
| 1 | 300 | 30 |  |
| 2 | 300 | 60 |  |
| 3 | 300 | 90 |  |
| 4 | 400 | 18 |  |


ตารางที่ ก.3 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ในตอนี่ 4

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง |
|----------|-------------------------|-------------|--|
| 5 | 400 | 30 |  |
| 6 | 400 | 60 |  |
| 7 | 400 | 60 |  |
| 8 | 400 | 90 |  |

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ในตอนี่ 4

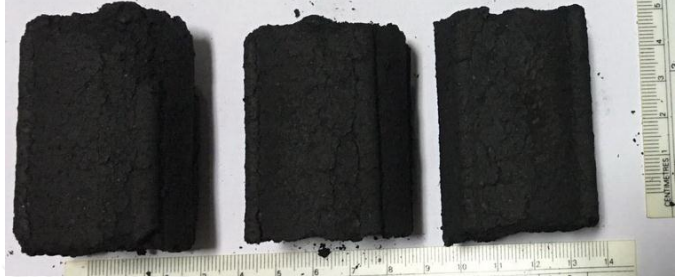
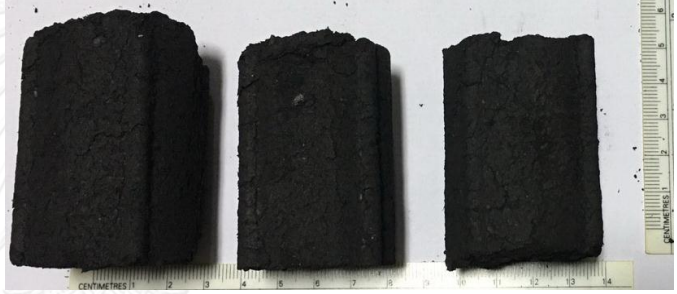
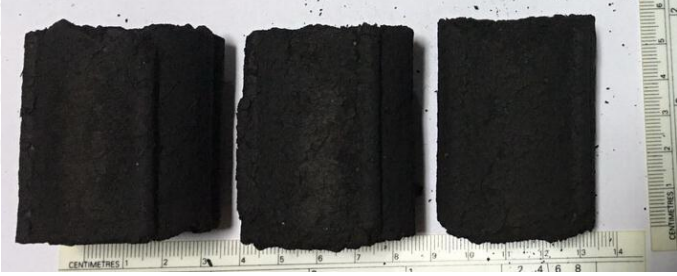
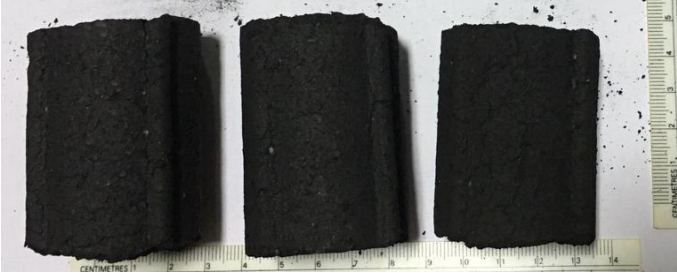
| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง |
|----------|-------------------------|-------------|--|
| 9 | 400 | 102 |  |
| 10 | 500 | 30 |  |
| 11 | 500 | 60 |  |
| 12 | 500 | 90 |  |

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ในตอนี่ 4

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง |
|----------|----------------------------|----------------|--|
| 13 | 541 | 60 |  |



ตารางที่ ก.4 แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ในตอนี่ 4 (ทดสอบยืนยันผล)

| การทดลอง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง |
|----------|----------------------------|----------------|--|
| 1 | 310 | 30 |  |
| 2 | 310 | 60 |  |
| 3 | 330 | 30 |  |
| 4 | 330 | 60 |  |



ภาคผนวก ข
วิธีการวิเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.1 การทดสอบค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) ASTM D1621

มีวิธีการทดสอบ ดังนี้

- 1) นำแท่งเชื้อเพลิงวางบนเครื่อง เครื่อง Universal Testing Machine Dartec ในแนวตั้ง
- 2) ทำการกดอัดแท่งเชื้อเพลิง จนเริ่มเสียหาย (มีการแตกร้าวเกิดขึ้น)
- 3) บันทึกค่าของแรงที่ทำให้เสียหาย
- 4) คำนวณพื้นที่หน้าตัดของแท่งเชื้อเพลิง

คำนวณหาค่าความทนแรงอัด ได้จากสมการที่ (ข.1)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ σ_c คือ ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
 F คือ แรงอัดที่ทำกับแท่งเชื้อเพลิงจนเริ่มแตกร้าว (กิโลกรัม)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งเชื้อเพลิง (ตารางเซนติเมตร)

ภาคผนวก ข.2 ค่าความร้อน (Heating Value) ASTM D5865

มีวิธีทดสอบ ดังนี้

สารเคมี

- 1) สารละลายแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) 100 กรัม/ลิตร
- 2) สารละลายกรดเกลือ (HCl) 1:9
- 3) สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.0709 โมล/ลิตร
- 4) สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) 4.3 กรัม/ลิตร
- 5) เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange)

วิธีการวิเคราะห์

การหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

- 1) ชั่งน้ำหนักถ้วยเผาไหม้ (Combustion Capsule) แล้วใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดน้ำหนักประมาณ 1 กรัมลงในถ้วยเผาไหม้ชั่งน้ำหนักให้แยกธาตุถึง 1 มิลลิกรัม
- 2) ตัดลวดยาวประมาณ 10 เซนติเมตร และวัดความยาวผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ของฟาบอมบ์

3) วางถ้วยเผาไหม้ที่ใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดบนห่วงอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดอยู่ด้านในของฝาบอมบ์ จัดลวดให้อยู่ที่บริเวณผิวหน้าของกรดเบนโซอิกอัดเม็ด (ระวังอย่าให้ลวดแตะกับถ้วยเผาไหม้)

4) ชั่งน้ำหนักน้ำให้ได้ประมาณ 2,000 มิลลิลิตรให้แยกธาตุถึง ± 0.01 กรัมลงในถังบรรจุบอมบ์ (Bucket)

5) ใส่น้ำกลั่นลงในตัวบอมบ์ 1 มิลลิลิตร จากนั้นประกอบฝาบอมบ์เข้ากับตัวบอมบ์ นำไปอัดก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 450 ปอนด์/ตารางนิ้ว นำไปวางในถังบอมบ์ เสียบสายอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับขั้วทั้งสองของตัวบอมบ์และปิดฝาเครื่อง

6) เปิดสวิตช์ แล้วกดปุ่ม F1 รอประมาณ 15 นาที จนกระทั่งหน้าจอขึ้นคำว่า “stand by”

7) กดปุ่ม Start และเมื่อหน้าจอขึ้นคำว่า “sample ID” ให้พิมพ์ sample ID ที่ต้องการลงไป กดปุ่ม Enter เมื่อหน้าจอขึ้นคำว่า “sample wt.” ให้ใส่น้ำหนักของกรดเบนโซอิกอัดเม็ด (ตามที่ได้ชั่งมา) แล้วกดปุ่ม Enter จากนั้นเครื่องจะเริ่มทำงานโดยเครื่องจะมีสัญญาณสั้นๆ หลายครั้งเมื่อมีการจุดระเบิด

8) รอจนกระทั่งมีเสียงสัญญาณครั้งที่ สอง (ซึ่งเป็นเสียงยาว) กดปุ่ม done เครื่องจะพิมพ์ผลการทดลองออกมา

9) เปิดฝาเครื่องนำบอมบ์ออกจากถังบรรจุบอมบ์ปล่อยก๊าซออกจากตัวบอมบ์อย่างช้าๆ จนกระทั่งหมด

10) ล้างฝาและตัวบอมบ์พร้อมถ้วยเผาไหม้ด้วยสารละลาย Methyl Orange (ซึ่งจะได้สารละลายสีแดง) จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองจึงหยุดล้าง นำน้ำล้างที่ได้มาไตเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 โมล/ลิตร สังเกตจุดยุติจากการที่สารละลายเปลี่ยนจากสีแดงไปเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ไป

11) วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกค่า

โดยที่ค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ คำนวณได้จากสมการที่ (ข. 2)

$$W = \frac{[(H)g + e_1 e_2]}{t} \quad (\text{ข.2})$$

| | | |
|-------|---|---|
| เมื่อ | W | คือ ค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (แคลอรี/องศาเซลเซียส) |
| | H | คือ ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (แคลอรี/กรัม) (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6315.2 แคลอรี/กรัม) |
| | g | คือ น้ำหนักของกรดเบนโซอิก (กรัม) |

- e_1 คือ การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก (แคลอรี) (มีค่าเท่ากับ จำนวน ml ของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 โมล/ลิตร)
- e_2 คือ การแก้ค่าความร้อนของลาวด (แคลอรี) (มีค่าเท่ากับ $2.3 \times$ ความยาวของลาวดที่ใช้เป็นเซนติเมตร)
- t คือ อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งได้แก้ค่าเทอร์โมมิเตอร์แล้ว (องศาเซลเซียส)

การหาค่าความร้อนของตัวอย่าง

- 1) ชั่งน้ำหนักถ้วยเผาไหม้ (Combustion Capsule) แล้วเติมตัวอย่างประมาณ 1 กรัมลงในถ้วยเผาไหม้ ชั่งน้ำหนักให้แยกธาตุถึง 1 มิลลิกรัม
- 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ตามข้อ 1) ถึง 11)

ภาคผนวก ข.3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ASTM D3173

มีวิธีทดสอบดังนี้

- 1) อบถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
- 2) ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก
- 3) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง ชั่งน้ำหนัก
- 4) นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
- 5) นำออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก

โดยที่ร้อยละของปริมาณความชื้น คำนวณได้จากสมการที่ (ข. 3)

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100 \quad (\text{ข.3})$$

- เมื่อ M คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น
- W_1 คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (Crucible) และตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)
- W_2 คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (Crucible) และตัวอย่างหลังอบ (กรัม)
- W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ภาคผนวก ข.4 ปริมาณเถ้า (Ash Content) (รเรศ ศรีสถิตย์, 2557)

มีวิธีทดสอบ ดังนี้

1) อบถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ที่อุณหภูมิ 100 ± 3 องศาเซลเซียส ในตู้อบประมาณ 3 ชั่วโมง นำเข้าโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องและปิดฝา ชั่งน้ำหนัก แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 815 ± 10 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง

3) นำออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก

โดยที่ร้อยละของปริมาณเถ้า คำนวณได้จากสมการที่ (ข. 4)

$$A = \frac{W_6 - W_5}{W} \times 100 \quad (\text{ข.4})$$

| | | |
|-------|-------|--|
| เมื่อ | A | คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า (%โดยน้ำหนัก) |
| | W_5 | คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ก่อนเผา (กรัม) |
| | W_6 | คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (Crucible) และตัวอย่างหลังเผา (กรัม) |
| | W | คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) |

ภาคผนวก ข.5 ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids) กรณี Dry basis

คำนวณได้จากสมการที่ (ข. 5) (รเรศ ศรีสถิตย์, 2557)

$$V = 100 - A \quad (\text{ข. 5})$$

โดยในสถานะ Wet basis จะต้องทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ เพื่อให้ได้ $T = A + V$ และ $W + A + V = 100\%$

| | | |
|-------|---|-----------------------------------|
| เมื่อ | V | คือร้อยละของปริมาณของแข็งระเหยได้ |
| | T | คือ ปริมาณของแข็งรวม |
| | A | คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า |

ภาคผนวก ข.6 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield)

คำนวณได้จากสมการที่ (ข.6) (นรงค์ ฉิมพาลี, 2557)

$$Y = \frac{Y_2}{Y_1} \times 100 \quad (\text{ข.6})$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | Y | คือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ |
| | Y_1 | คือ น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ (กรัม) |
| | Y_2 | คือ น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอนไนซ์ (กรัม) |

ภาคผนวก ข.7 วิธีการประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

มีวิธีการคำนวณ ดังนี้

$$A = \Sigma B + \Sigma Z \quad (\text{ข.7})$$

| | | |
|-------|---|--|
| เมื่อ | A | คือ ต้นทุนในการผลิตในหนึ่งวัน (บาท/วัน/กิโลกรัม) |
| | B | คือ ค่าต้นทุนคงที่ในการผลิตหนึ่งวัน (บาท/วัน/กิโลกรัม) |
| | Z | คือ ค่าต้นทุนแปรผันในการผลิตหนึ่งวัน (บาท) |

ซึ่งคำนวณ Z จากสมการ ที่ (ข.8)

$$Z = KW \times H \times 1.3576 \quad (\text{ข.8})$$

| | | |
|-------|----|---|
| เมื่อ | Z | คือ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน (บาท) |
| | KW | คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์) |
| | H | คือจำนวนชั่วโมงที่ใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าในหนึ่งวัน (ชั่วโมง) |



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

| การทดลอง | ค่าความทนแรงอัด (MPa) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|-----------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 0.8174 | 0.8185 | 0.8182 | 0.8180 |
| 2 | 0.3485 | 0.3471 | 0.3475 | 0.3477 |
| 3 | 0.2681 | 0.2664 | 0.2686 | 0.2677 |
| 4 | 0.7831 | 0.7852 | 0.7837 | 0.7840 |
| 5 | 0.7817 | 0.7801 | 0.7806 | 0.7808 |
| 6 | 0.7661 | 0.7634 | 0.7674 | 0.7673 |
| 7 | 0.2536 | 0.2518 | 0.2512 | 0.2522 |
| 8 | 0.6080 | 0.6097 | 0.6072 | 0.6083 |
| 9 | 0.5787 | 0.5792 | 0.5785 | 0.5788 |
| 10 | 0.5722 | 0.5727 | 0.5723 | 0.5724 |
| 11 | 0.7160 | 0.7158 | 0.7150 | 0.7156 |
| 12 | 0.6935 | 0.6942 | 0.6937 | 0.6938 |
| 13 | 0.7032 | 0.7021 | 0.7025 | 0.7026 |
| 14 | 0.6344 | 0.6347 | 0.6350 | 0.6347 |
| 15 | 0.2989 | 0.2981 | 0.2991 | 0.2987 |
| 16 | 0.3025 | 0.3013 | 0.3022 | 0.3020 |
| 17 | 0.6965 | 0.6959 | 0.6962 | 0.6962 |
| 18 | 0.6298 | 0.6305 | 0.6297 | 0.6300 |
| 19 | 0.8180 | 0.8185 | 0.8181 | 0.8182 |
| 20 | 0.8218 | 0.8223 | 0.8219 | 0.8220 |

ตารางที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)

| การทดลอง | ค่าความทนแรงอัด (MPa) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|-----------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 0.8868 | 0.8875 | 0.8876 | 0.8873 |
| 2 | 0.5782 | 0.5786 | 0.5787 | 0.5785 |
| 3 | 1.1275 | 1.1268 | 1.1273 | 1.1272 |
| 4 | 0.6768 | 0.6775 | 0.6776 | 0.6773 |
| 5 | 0.8333 | 0.8340 | 0.8338 | 0.8337 |

ตารางที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

| การทดลอง | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|-------------------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 4539.4 | 4551.8 | 4550.4 | 4547.2 |
| 2 | 4601.2 | 4607.7 | 4605.5 | 4604.8 |
| 3 | 4425.0 | 4420.7 | 4424.2 | 4423.3 |
| 4 | 4152.9 | 4157.6 | 4157.8 | 4156.1 |
| 5 | 3944.2 | 3939.5 | 3940.8 | 3941.5 |
| 6 | 4048.8 | 4057.4 | 4061.5 | 4055.9 |
| 7 | 4087.9 | 4085.3 | 4084.8 | 4086.0 |
| 8 | 3999.2 | 4001.5 | 4001.4 | 4000.7 |
| 9 | 3925.5 | 3923.1 | 3924.3 | 3924.6 |
| 10 | 3705.5 | 3709.2 | 3708.1 | 3708.2 |
| 11 | 3682.4 | 3689.7 | 3689.5 | 3687.2 |
| 12 | 3759.9 | 3763.4 | 3759.7 | 3761.0 |
| 13 | 3854.2 | 3857.1 | 3858.2 | 3856.5 |

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของแพ่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)

| การทดลอง | ค่าพลังงานความร้อน (kcal/kg.) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|-------------------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 4536.0 | 4539.4 | 4541.3 | 4538.9 |
| 2 | 4363.2 | 4366.4 | 4363.3 | 4364.3 |
| 3 | 4283.8 | 4281.5 | 4281.9 | 4282.4 |
| 4 | 4230.4 | 4233.0 | 4239.2 | 4232.1 |

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแพ่งเชื้อเพลิง

| การทดลอง | ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|---------------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 71.55 | 71.70 | 71.61 | 71.62 |
| 2 | 70.58 | 72.82 | 72.45 | 71.95 |
| 3 | 71.57 | 69.61 | 71.52 | 70.90 |
| 4 | 68.89 | 67.76 | 67.47 | 68.04 |
| 5 | 65.90 | 65.42 | 66.27 | 65.88 |
| 6 | 64.10 | 65.20 | 62.98 | 64.76 |
| 7 | 64.84 | 64.56 | 65.75 | 65.05 |
| 8 | 60.75 | 60.76 | 59.96 | 60.49 |
| 9 | 65.83 | 66.90 | 66.02 | 66.25 |
| 10 | 62.01 | 62.79 | 62.46 | 62.42 |
| 11 | 58.99 | 59.87 | 59.64 | 59.50 |
| 12 | 63.08 | 63.40 | 63.84 | 63.44 |
| 13 | 62.90 | 62.11 | 62.34 | 62.45 |

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์แห่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)

| การทดลอง | ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ (%) | | | ค่าเฉลี่ย |
|----------|---------------------------|------------|------------|-----------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 1 | 71.01 | 70.51 | 70.46 | 70.66 |
| 2 | 70.02 | 69.34 | 70.01 | 69.79 |
| 3 | 68.84 | 68.20 | 68.31 | 68.45 |
| 4 | 67.21 | 67.64 | 67.41 | 67.42 |





ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง.1 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าความทนแรงอัด

| Diagnostics Case Statistics | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------|----------|----------------------|-----------------|
| Run | Actual Value | Predicted Value | Residual | Leverage | Studentized Residual | Cook's Distance |
| 1 | 0.82 | 0.84 | -0.019 | 0.568 | -0.379 | 0.019 |
| 2 | 0.39 | 0.44 | -0.052 | 0.677 | -1.260 | 0.314 |
| 3 | 0.78 | 0.75 | 0.030 | 0.311 | 0.457 | 0.010 |
| 4 | 0.57 | 0.51 | 0.058 | 0.733 | 1.598 | 0.607 |
| 5 | 0.82 | 0.77 | 0.050 | 0.575 | 1.033 | 0.144 |
| 6 | 0.78 | 0.72 | 0.062 | 0.471 | 1.160 | 0.116 |
| 7 | 0.67 | 0.75 | -0.084 | 0.311 | -1.408 | 0.081 |
| 8 | 0.57 | 0.61 | -0.041 | 0.253 | -0.616 | 0.014 |
| 9 | 0.58 | 0.65 | -0.070 | 0.235 | -1.077 | 0.035 |
| 10 | 0.70 | 0.68 | 0.027 | 0.171 | 0.379 | 0.003 |
| 11 | 0.63 | 0.59 | 0.043 | 0.657 | 0.968 | 0.181 |
| 12 | 0.35 | 0.37 | -0.015 | 0.329 | -0.234 | 0.003 |
| 13 | 0.72 | 0.61 | 0.043 | 0.235 | 1.715 | 0.083 |
| 14 | 0.61 | 0.59 | 0.016 | 0.312 | 0.242 | 0.003 |
| 15 | 0.69 | 0.70 | -4.666 | 0.830 | -0.143 | 0.011 |
| 16 | 0.70 | 0.72 | -0.026 | 0.710 | -0.629 | 0.103 |
| 17 | 0.50 | 0.53 | -0.026 | 0.873 | -0.973 | 0.654 |
| 18 | 0.30 | 0.29 | 5.042 | 0.867 | 0.175 | 0.022 |
| 19 | 0.82 | 0.77 | 0.053 | 0.592 | 1.097 | 0.175 |
| 20 | 0.63 | 0.72 | -0.11 | 0.272 | -1.864 | 0.104 |

ตารางที่ ง.2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าพลังงานความร้อน

| Diagnostics Case Statistics | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------|----------|----------------------|-----------------|
| Run | Actual Value | Predicted Value | Residual | Leverage | Studentized Residual | Cook's Distance |
| 1 | 4547.20 | 4521.54 | 25.66 | 0.591 | 0.381 | 0.035 |
| 2 | 4604.80 | 4672.46 | -67.66 | 0.624 | -1.046 | 0.302 |
| 3 | 4423.30 | 4365.44 | 57.86 | 0.591 | 0.859 | 0.178 |
| 4 | 4156.10 | 4072.78 | 83.32 | 0.513 | 1.132 | 0.225 |
| 5 | 3941.50 | 4021.34 | -79.84 | 0.250 | -0.874 | 0.042 |
| 6 | 3708.20 | 3779.07 | -70.87 | 0.574 | -1.030 | 0.238 |
| 7 | 4086.00 | 3948.00 | 138.00 | 0.380 | 1.662 | 0.282 |
| 8 | 4000.70 | 3953.60 | 47.10 | 0.250 | 0.516 | 0.015 |
| 9 | 3924.60 | 3977.94 | -53.34 | 0.513 | -0.725 | 0.092 |
| 10 | 3855.90 | 3948.00 | -92.10 | 0.380 | -1.109 | 0.125 |
| 11 | 4547.20 | 4521.54 | 25.66 | 0.591 | 0.381 | 0.035 |
| 12 | 3761.00 | 3799.68 | -38.68 | 0.574 | -0.562 | 0.071 |
| 13 | 3856.50 | 3743.24 | 113.26 | 0.513 | 1.539 | 0.415 |

ตารางที่ ง.3 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์

| Diagnostics Case Statistics | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------|----------|----------------------|-----------------|
| Run | Actual Value | Predicted Value | Residual | Leverage | Studentized Residual | Cook's Distance |
| 1 | 71.65 | 72.86 | -1.21 | 0.624 | 0.919 | 0.047 |
| 2 | 71.90 | 70.50 | 1.40 | 0.591 | 1.027 | 0.255 |
| 3 | 70.92 | 70.53 | 0.39 | 0.591 | 0.284 | 0.019 |
| 4 | 68.04 | 67.22 | 0.82 | 0.513 | 0.549 | 0.053 |
| 5 | 65.88 | 66.12 | -0.24 | 0.250 | -0.130 | 0.001 |
| 6 | 65.76 | 64.39 | 1.37 | 0.380 | 0.814 | 0.068 |
| 7 | 64.05 | 64.39 | -0.34 | 0.380 | -0.203 | 0.004 |
| 8 | 60.49 | 64.14 | -3.65 | 0.250 | -1.973 | 0.216 |
| 9 | 66.25 | 64.45 | 1.80 | 0.513 | 1.211 | 0.257 |
| 10 | 62.42 | 64.45 | -2.03 | 0.574 | -1.454 | 0.474 |
| 11 | 59.50 | 60.51 | -1.01 | 0.574 | -0.727 | 0.119 |
| 12 | 63.44 | 61.74 | 1.70 | 0.250 | 0.919 | 0.047 |
| 13 | 62.45 | 61.45 | 1.00 | 0.513 | 0.673 | 0.079 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- : นางสาวสุพัฒตรา ส่งเสริม
- : เกิดวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดอุบลราชธานี
- : สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี
- : สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยศิลปากร คณะวิทยาศาสตร์ (เอกวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
- : เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาปลายปี 2555 ในหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย

