

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพ่นผิวตอบสนอง



นางสาวศกลชน ราโชภาณูจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

OPTIMUM CONDITION FOR FUEL BRIQUETTES PRODUCED FROM CORN STEM USING
RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

Miss Sakolthana Rachokarn



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้น
ข้าวโพดด้วยวิธีการพ่นฝอยตอบสนอง

โดย

นางสาวศกลธน ราชิกกาญจน์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ทรรศนีย์ พลุกษาสีทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุทธรังษี)

ศกลธน ราโชภาณูจน์ : สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง. (OPTIMUM CONDITION FOR FUEL BRIQUETTES PRODUCED FROM CORN STEM USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์, 179 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งเป็นการนำต้นข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม โดยการวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพด ซังข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง โดยนำต้นข้าวโพดมาเป็นส่วนผสมในปริมาณมากที่สุด ขณะที่นำซังข้าวโพดกับตัวประสานมาเป็นส่วนผสมในปริมาณน้อยที่สุด และยังคงทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความทนแรงอัดสูง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการคาร์บอนเซชันแท่งเชื้อเพลิง เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในกระบวนการคาร์บอนเซชันแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ผลการศึกษา พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่างต้นข้าวโพด ซังข้าวโพดและตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง คือ 7.5:1.5:2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความทนแรงอัดอยู่ที่ 0.3556 MPa และมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 365.15 Kg/m³ โดยมีอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการคาร์บอนเซชันแท่งเชื้อเพลิง คือ อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 90 นาที โดยให้ค่าพลังงานความร้อน 4,689.43 Kcal/kg และร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 40.20 ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้าต่ำสุด คือ ร้อยละ 7.45 และ 5.54 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูงสุด คือ ร้อยละ 94.46 87.01 และ 48.34 ตามลำดับ ดังนั้น จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง พบว่าแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปใช้งานทั้งในระดับครัวเรือน และระดับอุตสาหกรรม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5587173120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: FUEL BRIQUETTES / CORN STEM / COB / RSM

SAKOLTHANA RACHOKARN: OPTIMUM CONDITION FOR FUEL BRIQUETTES PRODUCED FROM CORN STEM USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM). ADVISOR: ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 179 pp.

The objective of this research was to study the optimum condition for fuel briquettes produced from corn stem using Response Surface Methodology (RSM). Corn stem was a waste from maize production and can be used as a raw material in the production of appropriate fuel for households and industries. The experiments were carried out into two parts. The first one was study the ratio of the corn stem, cob and binder from starch of cassava that gave the higher compressive strength of briquettes, and this briquettes must be had the weight of corn stem was high but the weight of cob 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 time for reduce resource in production process of briquettes. The results showed that the appropriate in ratio of corn stem, cob and binder by weight was 7.5:1.5:2. This ratio was give the highest compressive strength was 0.3556 MPa and the density was 365.15 Kg/m³ respectively. And the appropriate of carbonization temperature was 475 degree Celsius and time was 90 minute. That gave the briquettes has heating value (4,689.43 Kcal/kg) and percent yield (40.20%) were high, the moisture content (5.54%) and ash content (7.45%) were low. But the total solids (94.46%), volatile solids (87.01%) and carbon content (48.34%) were high. From the optimum condition for fuel briquettes produced from corn stem 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: 2013

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ข้อคิดเห็น ความช่วยเหลือ ชี้แนะและแก้ไขสิ่งที่บกพร่องมาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนกระทั่งจบโครงการ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ผู้อำนวยการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุททวงษ์ และ อาจารย์ ดร. ทรรศนีย์ พุกขาสีสิทธิ์ ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำชี้แนะ และคำปรึกษา จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองประสิทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิพัฒน์ จิตรอารีย์รักษ์ และอาจารย์ประภัสสร ประเทืองไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการ รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์สุธิสา มากจรูญ อาจารย์ประจำภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการลดขนาดวัตถุบในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อำไพ ทองธีรภาพ อาจารย์ประจำภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำในการแปลผลทางสถิติ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาและขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ถ
สารบัญแผนภูมิ.....	ธ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หมอกควัน (Smog).....	5
2.1.1 ความหมายของหมอกควัน (Smog).....	5
2.1.2 หมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย.....	5
2.1.3 สาเหตุของการเกิดหมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย.....	7
2.1.4 ผลกระทบของหมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย.....	8
2.1.5 มาตรฐานคุณภาพอากาศ (Air Quality Standard) และดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI).....	9
2.1.5.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศ (Air Quality Standard).....	9
2.1.5.2 ดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI).....	10
2.2 ข้าวโพด (Corn).....	12
2.2.1 พฤษศาสตร์ทั่วไป.....	12
2.2.1.1 ราก (Root).....	12
2.2.1.2 ลำต้น (Culm หรือ Stalk หรือ Stem).....	13

2.2.1.3 ใบ (Leaf).....	13
2.2.1.4 ดอก (Flower).....	14
2.2.1.5 ผลและเมล็ด (Fruit and Seed).....	15
2.2.2 การจำแนกชนิดข้าวโพด	15
2.2.2.1 จำแนกตามคุณสมบัติของแป้งในเมล็ด	15
2.2.2.2 จำแนกตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์	17
2.2.3 การใช้ประโยชน์.....	17
2.2.4 สถานการณ์การปลูกข้าวโพดภายในประเทศ	18
2.2.5 การปลูกข้าวโพดภายในประเทศไทย.....	20
2.2.5.1 ฤดูฝน (รุ่นที่ 1).....	21
2.2.5.2 ฤดูแล้ง (รุ่นที่ 2)	21
2.3 ชีวมวล (Biomass)	21
2.3.1 ความหมายของชีวมวล (Biomass).....	21
2.3.1.1 ความชื้น (Moisture).....	21
2.3.1.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance).....	22
2.3.1.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-Combustible substance)	22
2.3.2 ประเภทของชีวมวล	24
2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล	24
2.4 เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Fuel Briquettes).....	25
2.4.1 แหล่งวัสดุที่สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง.....	26
2.4.2 วิธีการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง.....	29
2.4.2.1 กระบวนการอัดร้อน (Hot Press Process)	29
2.4.2.2 กระบวนการอัดเย็น (Cold Press Process)	29
2.4.2.3 เทคนิคการอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)	30
2.5 ถ่าน (Charcoal)	30
2.5.1 ประเภทของการผลิตถ่าน	30
2.5.1.1 การผลิตถ่านแบบพื้นเมือง	30

2.5.1.2 การผลิตถ่านแบบอุตสาหกรรม	30
2.5.2 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)	31
2.5.2.1 การลดความชื้น (Dehydration)	32
2.5.2.2 การเผาไหม้ (Combustion).....	32
2.5.2.3 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ (refinement).....	33
2.5.2.4 การทำให้เย็นตัว (Cooling).....	33
2.5.3 คุณภาพของถ่าน.....	34
2.5.4 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่าน	35
2.5.4.1 ค่าความร้อน.....	35
2.5.4.2 ปริมาณสารที่ระเหยได้.....	35
2.5.4.3 ปริมาณความชื้น.....	36
2.5.4.4 ปริมาณคาร์บอน.....	36
2.5.4.5 กำมะถันรวม	36
2.5.4.6 เถ้า	36
2.5.4.7 ร้อยละของผลิตภัณฑ์	36
2.5.5 การใช้ประโยชน์จากถ่าน	37
2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM).....	37
2.6.1 การออกแบบการทดลองโดยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง	37
2.6.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง	39
2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA).....	41
2.8 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)	41
2.8.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง	41
2.8.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง	43
2.8.2.1 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนอง	43
2.8.2.2 ทดสอบ Lack of Fit	43
2.8.2.3 วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง	44
2.8.3 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก ..	46

2.8.4 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย.....	47
2.8.4.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง.....	47
2.8.4.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา.....	49
2.8.4.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง.....	49
2.8.4.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล.....	50
2.9 พิจารณาพื้นผิวตอบสนอง และทดสอบเพื่อยืนยันผล.....	51
2.10 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิง.....	51
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	61
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	61
3.2 แผนการทดลอง.....	61
3.2.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง.....	62
3.2.2 ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแห่งเชื้อเพลิง.....	63
3.2.3 ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห่งเชื้อเพลิง.....	64
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	65
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	65
3.4.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง.....	65
3.4.2 ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแห่งเชื้อเพลิง.....	66
3.4.2.1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแห่งเชื้อเพลิง.....	66
3.4.2.2 การขึ้นรูปแห่งเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน.....	67
3.4.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของแห่งเชื้อเพลิง.....	67
3.4.2.4 การทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	67
3.4.2.5 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง.....	68
3.4.3 ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห่งเชื้อเพลิง.....	68
3.4.3.1 นำแห่งเชื้อเพลิงจากผลการวิจัยในข้อ 3.4.2 มาศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์.....	68
3.4.3.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization).....	68
3.4.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของแห่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์.....	69

3.4.2.4 การทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (recheck)	69
3.4.2.5 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง	69
3.5 การประเมินราคาต้นทุนการผลิต	69
3.6 รวบรวมและวิเคราะห์ผลการศึกษา	70
3.7 สรุปผลการศึกษา	70
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์	79
4.1 การวิจัยตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแห้งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแห้งเชื้อเพลิง	79
4.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมโดยน้ำหนักในกระบวนการผลิตแห้งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง	79
4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแห้งเชื้อเพลิงและผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแห้งเชื้อเพลิง	81
4.1.3 การทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาสัดส่วนที่เหมาะสม	87
4.1.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความทนแรงอัดของแห้งเชื้อเพลิง	88
4.1.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง	88
4.1.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก	91
4.1.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย	94
4.1.4.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง	94
4.1.4.3.2 การตรวจสอบค่าผิดพลาด เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	96
4.1.4.3.3 การตรวจสอบค่าผิดพลาดเนื่องจากผลตอบสนอง	97
4.1.4.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล	98
4.2 ผลการวิจัยตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง	99
4.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิง	99
4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงและผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง	101

4.2.3 การทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม	106
4.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	108
4.2.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง	108
4.2.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวใน แบบจำลองที่เลือก.....	110
4.2.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย	113
4.2.4.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง.....	113
4.2.4.3.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	115
4.2.4.3.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง.....	116
4.2.4.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล	117
4.2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง	118
4.2.5.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง	118
4.2.5.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวใน แบบจำลองที่เลือก.....	120
4.2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย	123
4.2.5.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง.....	123
4.2.5.3.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	125
4.2.5.3.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง.....	125
4.2.5.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล	126
4.2.6 การตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนทางทฤษฎี	127
4.2.6.1 การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์... ..	127
4.2.6.2 การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอนไนซ์	130
4.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง.....	132
4.3.1 ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง.....	132
4.3.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง.....	132
4.3.2.1 ต้นทุนคงที่.....	132
4.3.2.2 ต้นทุนแปรผัน.....	133
4.3.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง.....	135

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.1.1 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิง	136
5.1.2 การศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง	136
5.1.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง	137
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป	137
รายการอ้างอิง	138
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	144
ภาคผนวก ข ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง.....	148
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง.....	158
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง.....	166
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	173
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	179

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศ	10
ตารางที่ 2.2 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย	11
ตารางที่ 2.3 ปริมาณพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในปี พ.ศ. 2555-2556	19
ตารางที่ 2.4 การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่าง ปี 2547-2552	22
ตารางที่ 2.5 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552	23
ตารางที่ 2.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	27
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติชีวมวลชนิดต่างๆ	28
ตารางที่ 2.8 แบบจำลองการถดถอยและสมมติฐานที่ใช้สำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง	43
ตารางที่ 2.9 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	57
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรและระดับของการออกแบบการทดลอง	80
ตารางที่ 4.2 จำนวนชุดการทดลองด้วยวิธีการพินผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง	80
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัด ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง	82
ตารางที่ 4.4 ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมของความสัมพัทธ์แต่ละปัจจัย	86
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม	87
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง	89
ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย	90
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic	92
ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย	93
ตารางที่ 4.10 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าทนแรงอัดของ แท่งเชื้อเพลิง	94
ตารางที่ 4.11 ตัวแปรและระดับของการออกแบบการทดลอง	100
ตารางที่ 4.12 จำนวนชุดการทดลองด้วยวิธีการพินผิวตอบสนอง แบบส่วนประสมกลาง	100
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ..	101
ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณเถ้า ปริมาณของแข็ง ระเหย และปริมาณคาร์บอนของแท่งเชื้อเพลิง	102
ตารางที่ 4.15 ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมของความสัมพัทธ์แต่ละปัจจัย	105
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม	106
ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจากการยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสม	107

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง	109
ตารางที่ 4.19 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย	110
ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic	111
ตารางที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย	112
ตารางที่ 4.22 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	113
ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง	119
ตารางที่ 4.24 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย	120
ตารางที่ 4.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic	121
ตารางที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย	122
ตารางที่ 4.27 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	123
ตารางที่ 4.28 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี	128
ตารางที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	128
ตารางที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนหลังการคาร์บอนไนซ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ...	130
ตารางที่ 4.31 ราคาต้นทุนแปรผันในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง	132
ตารางที่ 4.32 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตเชื้อเพลิง	133
ตารางที่ 4.33 รายละเอียดการคำนวณค่าไฟฟ้า	135
ตารางที่ 4.34 ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม	135
ตารางที่ ข.1 แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1	149
ตารางที่ ข.2 แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1 (การทดสอบยืนยันผล)	153
ตารางที่ ข.3 แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ขึ้นในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2	154
ตารางที่ ข.4 แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ขึ้นในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2 (การทดสอบยืนยันผล)	157
ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง	167
ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)	167
ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง	168
ตารางที่ ง.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)	168

ตารางที่ ง.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	169
ตารางที่ ง.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	169
ตารางที่ ง.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง.....	170
ตารางที่ ง.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	170
ตารางที่ ง.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง	171
ตารางที่ ง.10 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	171
ตารางที่ ง.11 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง.....	172
ตารางที่ ง.12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)	172
ตารางที่ จ.1 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าความทนแรงอัด	174
ตารางที่ จ.2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าพลังงานความร้อน	175
ตารางที่ จ.3 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของร้อยละของผลิตภัณฑ์	176
ตารางที่ จ.4 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	177
ตารางที่ จ.5 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	177
ตารางที่ จ.6 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	178
ตารางที่ จ.7 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	178
ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง	167
ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	167
ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง	168
ตารางที่ ง.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	168
ตารางที่ ง.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	169

ตารางที่ ง.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	169
ตารางที่ ง.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง.....	170
ตารางที่ ง.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	170
ตารางที่ ง.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง	171
ตารางที่ ง.10 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล).....	171
ตารางที่ ง.11 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง.....	172
ตารางที่ ง.12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบยืนยันผล)	172

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ต้นข้าวโพด	12
ภาพที่ 2.2 รอยต่อระหว่างกาบใบและแผ่นใบของข้าวโพด	14
ภาพที่ 2.3 ดอกตัวผู้ของข้าวโพด (1) และดอกตัวเมียของข้าวโพด (2)	14
ภาพที่ 2.4 เมล็ดข้าวโพดตัดตามยาว	15
ภาพที่ 2.5 ลักษณะเมล็ดข้าวโพดชนิดต่างๆ	16
ภาพที่ 2.6 เชื้อเพลิงเขียว (1) และเชื้อเพลิงอัดแท่ง (2)	26
ภาพที่ 2.7 เส้นระดับและกราฟพื้นผิวตอบสนอง	39
ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนของการออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ 2 ปัจจัย.....	40
ภาพที่ 2.9 การออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ 3 ปัจจัย	40
ภาพที่ 2.10 รูปร่างของ Residual Plots.....	48
ภาพที่ 2.11 Residual Plots และ Normal Probability Plots ที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย.....	48
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิธีการพื้นผิวตอบสนอง	63
ภาพที่ 3.2 ผังวิธีการดำเนินการวิจัย	71
ภาพที่ 4.1 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ	83
ภาพที่ 4.2 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ	84
ภาพที่ 4.3 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ.....	84
ภาพที่ 4.4 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ.....	85
ภาพที่ 4.5 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างซังข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ	85
ภาพที่ 4.6 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างซังข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ	86
ภาพที่ 4.7 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย	95
ภาพที่ 4.8 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง 96	

ภาพที่ 4.9 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	97
ภาพที่ 4.10 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง	98
ภาพที่ 4.11 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง.....	99
ภาพที่ 4.12 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูง ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ.....	103
ภาพที่ 4.13 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูง	104
ภาพที่ 4.14 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่ง เชื้อเพลิงสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ.....	104
ภาพที่ 4.15 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่ง เชื้อเพลิงสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot).....	105
ภาพที่ 4.16 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย	114
ภาพที่ 4.17 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง	115
ภาพที่ 4.18 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	116
ภาพที่ 4.19 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง	117
ภาพที่ 4.20 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง.....	118
ภาพที่ 4.21 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย	124
ภาพที่ 4.22 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง	124
ภาพที่ 4.23 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา	125
ภาพที่ 4.24 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง	126
ภาพที่ 4.25 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง.....	127
ภาพที่ ก.1 ต้นข้าวโพด (1) ซังข้าวโพด (2) ต้นข้าวโพดบด (3)และซังข้าวโพดบด (4)	145
ภาพที่ ก.2 เครื่องตัดและบดย่อย.....	146
ภาพที่ ก.3 เครื่องอัดแท่งแบบเอ็กทรูชัน (Extrusion).....	146
ภาพที่ ก.4 เต้าเผา.....	147
ภาพที่ ก.5 ตู้อบ	147

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 2.1 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง จากผลการตรวจวัดคุณภาพ
 อากาศในพื้นที่ภาคเหนือ ช่วงเดือน มกราคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2555 6

แผนภูมิที่ 2.2 ปริมาณผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก และปริมาณชีวมวลของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พ.ศ. 2552
 20



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนเมษายนของทุกปี พื้นที่ในภาคเหนือของประเทศไทยมักประสบปัญหาหมอกควัน และมีแนวโน้มที่ทวีความรุนแรงขึ้นตามลำดับ (วิจารณ์ สิมาฉายา, 2554) ปัญหาหมอกควันที่เกิดขึ้นได้ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM₁₀) มีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศอย่างมาก ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดว่า PM₁₀ จะต้องไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555b) และปัญหาหมอกควันยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพประชาชน คุณภาพชีวิต การคมนาคม เศรษฐกิจ รวมถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม และสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาหมอกควัน คือ การเผาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของเกษตรกรในพื้นที่ภาคเหนือ

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการปลูกข้าวโพดในหลายพื้นที่ รวมถึงภาคเหนือของประเทศไทยที่มีการปลูกข้าวโพดเป็นจำนวนมาก ข้าวโพดมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ทำให้การปลูกข้าวโพดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในแต่ละปี เมื่อข้าวโพดถูกนำไปแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ จะมีเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปเป็นจำนวนมาก เช่น ต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เป็นต้น เกษตรกรจึงกำจัดเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้ด้วยวิธีต่างๆ โดยเฉพาะการเผาต้นข้าวโพดเพื่อกำจัดและปรับสภาพพื้นที่ไว้สำหรับการปลูกข้าวโพดในครั้งต่อไป

ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือ และยังเป็น การนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ที่ดีกว่าการเผาทิ้งทำลาย จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่า และเป็นการกำจัดเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยลดการเกิดปัญหาต่างๆที่จะตามมา โดยเฉพาะการลดปัญหาหมอกควันในภาคเหนือ จากการศึกษาการเพิ่มมูลค่าของเศษชังข้าวโพดโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่า การอัดแท่งเศษชังข้าวโพดที่ปริมาณ 100 ตันต่อปี ให้ผลการลงทุนที่คุ้มค่าและได้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อนสูง (ชมธิดา ชื่นนิยม, 2553) และการผลิตเชื้อเพลิงชีวะอัดแท่งจากลำต้นข้าวโพดสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่มีค่าความร้อนสูงได้ (พิสิษฐ มณีโชติ และคณะ, 2556)

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำหนักโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง เพื่อผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัดสูง และศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิกับเวลาในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของสัดส่วน อุณหภูมิและเวลาในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง รวมถึงศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด เพื่อนำมาพัฒนาเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการนำไปใช้งานในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง ในกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง โดยนำต้นข้าวโพดมาใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณมากที่สุด ขณะที่นำชั่งข้าวโพดและตัวประสานมาใช้เป็นส่วนผสมในปริมาณที่น้อยที่สุด

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันของแท่งเชื้อเพลิงที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่น้อยที่สุด เพื่อเป็นการลดการใช้ทรัพยากรในการผลิต

1.2.3 เพื่อประเมินราคาต้นทุนของการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด

1.3 สมมติฐานการวิจัย

สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสานต่อน้ำหนักโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง มีผลทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน มีผลทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด ในสัดส่วนผสมระหว่างต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด และตัวประสานที่แตกต่างกัน และทำการคาร์บอนไนซ์ แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตในระดับอนุกรม และเวลาที่แตกต่างกัน

1.4.1 คำนิยาม ต้นข้าวโพด หมายถึง ต้นข้าวโพด และใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต ชังข้าวโพด หมายถึง ฝักข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่นำเมล็ดข้าวโพดออก และตัวประสาน หมายถึง แป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำร้อนในอัตราส่วน 10:90

1.4.2 ศึกษาาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของสัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง ในกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความทนแรงอัดสูง ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

1.4.3 ทำการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) โดยเครื่องอัดรีด

1.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง โดยจะทำการทดสอบหาค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) และค่าความหนาแน่น (Density) แล้วเลือกสัดส่วนการผสมที่ดีที่สุดโดยอาศัยค่าความทนแรงอัดเป็นเกณฑ์การตัดสินใจ

1.4.5 ศึกษาาระดับอนุกรม และระยะเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงจากผลการวิเคราะห์ข้อ 1.4.4 ที่มีค่าความทนแรงอัดสูงมาทำการคาร์บอนไนซ์ เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน (Heating Value) และร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent Yield) สูง ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

1.4.6 ทำการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงโดยใช้เตาเผา (Muffle furnace) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

1.4.7 วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) คือ ค่าความร้อน (Heating Value) ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent Yield) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile Solid) และปริมาณคาร์บอน (Carbon)

1.4.8 ประเมินราคาต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิง โดยวิธีการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิต เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์การผลิตและค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสม อุณหภูมิ และเวลาในกระบวนการผลิตแห่งเชื้อเพลิงจาก ต้นข้าวโพด ที่ทำให้แห่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ สูง

1.5.2 เป็นแนวทางให้เกษตรกรนำต้นข้าวโพดไปผลิตเป็นแห่งเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ของเกษตรกรและเพิ่มมูลค่าของต้นข้าวโพด และใบข้าวโพด

1.5.3 เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาหมอกควันในภาคเหนือจากการเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

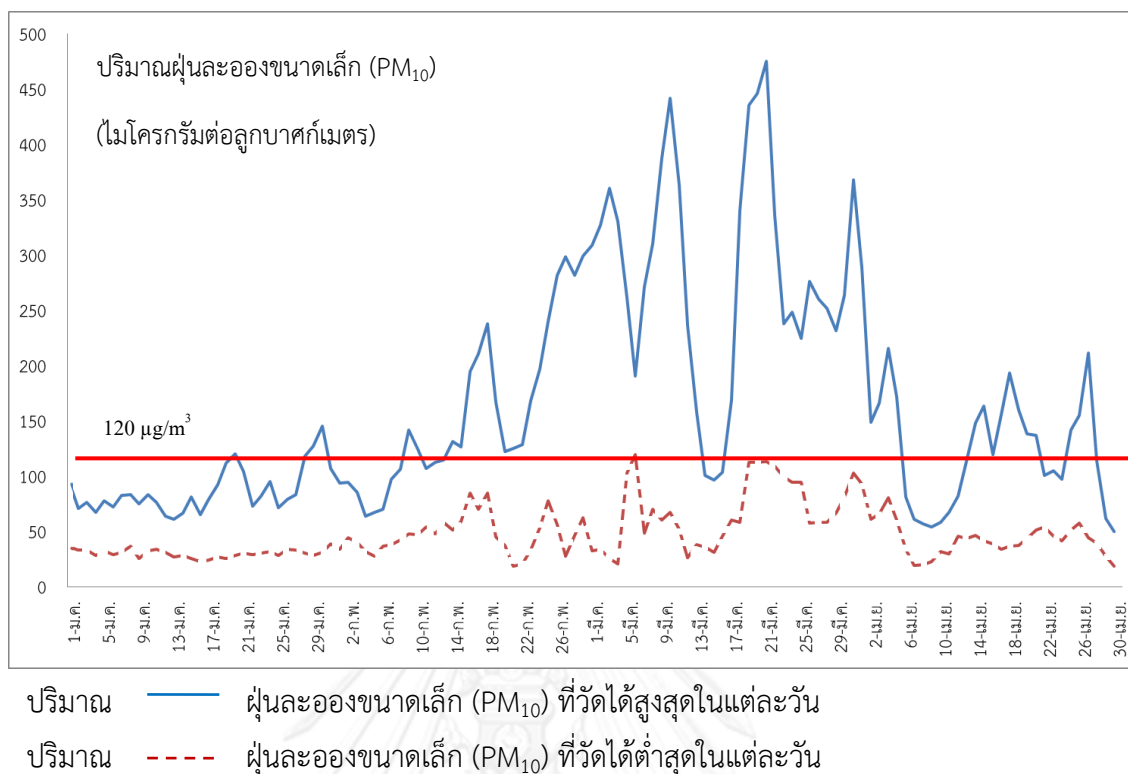
2.1 หมอกควัน (Smog)

2.1.1 ความหมายของหมอกควัน (Smog)

หมอกควัน หมายถึง การสะสมของควันหรือฝุ่นในอากาศส่วนใหญ่เกิดจากเผาเศษวัสดุทางการเกษตรและไฟฟ้าหมอกควันจัดเป็นมลพิษทางอากาศประเภทหนึ่งซึ่งเกิดจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter 10 : PM₁₀) ปะปนอยู่ในอากาศและมีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนความเป็นอันตรายของฝุ่นละอองต่อสุขภาพขึ้นอยู่กับขนาดของฝุ่นละอองความเข้มข้นและระยะเวลาที่สัมผัสรวมทั้งสภาพร่างกายของผู้รับแต่ละคน โดยหมอกควันมักหมายถึงหมอกควันจากการเกษตร การก่อสร้าง หมอกควันมีพิษจากอุตสาหกรรม ยานพาหนะ เครื่องจักรกล ซึ่งมักเป็นอนุภาคของฝุ่น ควัน และเถ้า (รังสรรค์ อากาศพิษกุล, 2547)

2.1.2 หมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย

ในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนมีนาคมของทุกปีพื้นที่ในภาคเหนือมักประสบปัญหาหมอกควันปกคลุมโดยเฉพาะในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2555 พบว่ามีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) สูงกว่าปีที่ผ่านมามากซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ ไม่เกิน 120 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจัดอยู่ในเกณฑ์อันตราย ตามเกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI) ซึ่งบุคคลทั่วไปควรหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายภายนอกอากาศ จัดเป็นระดับคุณภาพอากาศที่ไม่ปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโดยค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) เดือนมีนาคมพ.ศ. 2555 ที่จังหวัดเชียงใหม่สามารถวัดค่าสูงสุดได้ถึง 437.6-470.8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555b)



แผนภูมิที่ 2.1 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง จากผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในพื้นที่ภาคเหนือ ช่วงเดือน มกราคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2555 (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555b)

จากแผนภูมิที่ 2.1 พบว่า ตั้งแต่ช่วงปลายเดือนกุมภาพันธ์จนถึงต้นเดือนเมษายน พ.ศ. 2555 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ ซึ่งกำหนดให้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) โดยเฉลี่ยในระยะเวลา 24 ชั่วโมงต้องไม่เกิน 120 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และตามเกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI) พบว่า ตั้งแต่ช่วงปลายเดือนกุมภาพันธ์จนถึงต้นเดือนเมษายน 2555 มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) จัดอยู่ในเกณฑ์มีผลกระทบต่อสุขภาพจนถึงอันตราย และมีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) สูงสุดในช่วงเดือนมีนาคม ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์อันตราย (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555b)

2.1.3 สาเหตุของการเกิดหมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย

เนื่องจากสภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่ของภาคเหนือเป็นพื้นที่ภูเขาสลับซับซ้อนโดยมีชุมชนส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในราบลุ่มแม่น้ำมีภูเขาล้อมรอบเป็นลักษณะแอ่งกระทะเช่นจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน และลำพูน ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการกระจายตัวของมลพิษหมอกควันที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษหมอกควันเพิ่มขึ้นอีก ได้แก่

1) การเกิดไฟป่า ส่วนใหญ่เกิดจากการที่คนจุดไฟป่าเพื่อหาของป่า ล่าสัตว์ เผาไร่ ในช่วงเดือนมกราคมถึง เมษายนของปี พ.ศ. 2551 และพ.ศ. 2552 มีสถิติไฟป่าสะสมที่จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเจ้าหน้าที่ต้องเข้าไปจัดการเพื่อดับไฟป่ากว่า 1,400 ครั้ง สร้างความเสียหายอย่างน้อยปีละประมาณ 9,000 ไร่ ซึ่งเป็นเพียงส่วนน้อยมากของไฟป่าทั้งหมดที่เกิดขึ้นจริงที่เจ้าหน้าที่สามารถเข้าไปจัดการดับไฟได้

2) การเผาเศษพืชและเศษวัสดุการเกษตร ซึ่งเกิดจากการเผาเพื่อเตรียมทำการเกษตรจากความเชื่อว่าการเผาเพียงเล็กน้อยไม่ก่อให้เกิดปัญหา ช่วยเพิ่มผลผลิตและช่วยกำจัดวัชพืช รวมทั้งเชื้อโรคในดิน การเผาเพื่อทำเกษตรเป็นกิจกรรมที่ครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางทั่วภาคเหนือ

3) การเผาขยะมูลฝอย จากชุมชนที่ไม่ได้มีการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูงทำให้เกิดหมอกควันในรูปของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{10}) ที่เกิดจากการเผาขยะโดยเฉลี่ยจะเท่ากับ 45 กรัมต่อครัวเรือนต่อวัน

4) สาเหตุอื่นๆ เช่น การเผาวัชพืชริมถนน การเผาในพื้นที่รกร้างว่างเปล่า รวมถึงมลพิษจากอุตสาหกรรมด้วย (มงคล ราชะนาคร, 2553)

เจียมใจ เครือสุวรรณ และคณะ (2551) พบว่า ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM_{10}) นั้นมีแหล่งกำเนิดจากไฟป่า และการเผาพื้นที่การเกษตรประมาณร้อยละ 50-70 จากเครื่องยนต์ดีเซลประมาณร้อยละ 10 และส่วนที่เหลือเป็นการพัดพาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ หมอกควันในภาคเหนือมักจะเกิดขึ้นในช่วงฤดูหนาวก่อนเข้าสู่ฤดูร้อนซึ่งเป็นช่วงอากาศนิ่ง เพราะความกดอากาศสูง ทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่ถูกพัดพาขึ้นสู่บรรยากาศระดับสูงได้

2.1.4 ผลกระทบของหมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทย

หมอกควันในภาคเหนือของประเทศไทยนั้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัย และเศรษฐกิจ ดังนี้

1) ผลกระทบของหมอกควันต่อสิ่งแวดล้อม

หมอกควันจะลดความสามารถในการมองเห็น เนื่องจากหมอกควันในบรรยากาศสามารถดูดซับและหักเหแสงได้ ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของหมอกควัน

2) ผลกระทบของหมอกควันต่อสุขภาพอนามัย

หมอกควันที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้นั้น คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ จะเกาะตัวหรือตกค้างในส่วนต่างๆ ของระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะ เช่น เนื้อเยื่อปอด ซึ่งหากได้รับในปริมาณมากหรือได้รับในช่วงระยะเวลาอันยาวนานจะสะสมในเนื้อเยื่อปอด และทำให้การทำงานของปอดมีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้เกิดหลอดลมอักเสบ หอบหืด และถุงลมโป่งพองได้ ซึ่งจำนวนผู้ป่วยที่อาจได้รับผลกระทบจากหมอกควัน ในกลุ่มโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ โรคหลอดเลือด โรคตา และโรคผิวหนัง ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละปี โดยในปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 พบว่า มีปริมาณผู้ป่วยสะสม คือ 82,036 คน และ 152,036 คน ตามลำดับ (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงใหม่, 2556)

ทศวิญา พัดเกาะ และคณะ (2556) พบว่า การสัมผัสหมอกควันต่อเนื่องเป็นระยะเวลา ยาวนานตั้งแต่ 3 ปีขึ้นไป ทำให้เนื้อปอดสูญเสียความสามารถในการขยายตัวและส่งผลให้ความชุกของผู้ที่มีการจำกัดการขยายตัวของทรวงอกเพิ่มสูงขึ้น

3) ผลกระทบของหมอกควันต่อเศรษฐกิจ

ปัญหาหมอกควัน ส่งผลให้นักท่องเที่ยวต่างชาตินลดลง โดยนักท่องเที่ยวต่างชาติที่มีกำหนดเข้าพักในระยะยาวได้เลื่อนเวลากลับเร็วขึ้น และนักท่องเที่ยวชาวไทยลดลงร้อยละ 50.14 ในปี

พ.ศ. 2550 ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจที่เกี่ยวกับการท่องเที่ยวและบริการในพื้นที่ภาคเหนือโดยตรง (ทวีศักดิ์ ใจคำสืบ, 2550)

2.1.5 มาตรฐานคุณภาพอากาศ (Air Quality Standard) และดัชนีคุณภาพอากาศ สำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI)

2.1.5.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศ (Air Quality Standard)

มาตรฐานคุณภาพอากาศได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อประโยชน์ต่อการใช้กฎหมายในการควบคุมดูแลคุณภาพอากาศทั้งในบรรยากาศและในสถานที่ประกอบการหรือบริเวณที่อยู่อาศัยอยู่ในระดับที่เกิดความปลอดภัย โดยเฉพาะต้องคำนึงถึงสุขภาพอนามัย ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศเพื่อความสะดวกต่อการดำเนินการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยมักกำหนดเป็นมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศและมาตรฐานคุณภาพจากแหล่งกำเนิด

สำหรับมาตรฐานคุณภาพอากาศที่ถูกกำหนดขึ้นในประเทศไทย โดยประกาศ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2535) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 112 ตอนที่ 52 ง. วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2538 ซึ่งในรายละเอียดของมาตรฐานนั้นได้กำหนดให้มาตรฐานของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซโอโซน และฝุ่นละออง เหล่านี้ในช่วงเวลาหนึ่งเวลาใดให้เป็นไปตามค่าเฉลี่ยที่กำหนด ส่วนค่าตะกั่วเฉลี่ย 1 เดือนไม่เกิน 1.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรดังตารางที่ 2.1

นอกจากการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศดังกล่าวแล้ว ยังมีการกำหนดถึงวิธีการวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานของคุณภาพอากาศที่ตรวจวัดได้ให้มีความเที่ยงตรงหรือให้ได้วิธีการประเมินคุณภาพอากาศที่ได้มาตรฐาน และเป็นการป้องกันไม่ให้คุณภาพอากาศในบรรยากาศถูกทำลายหรือแปรเปลี่ยนไปในทางที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีพ (พัฒนา มูลพฤกษ์, 2545)

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศ

สารมลพิษ	1 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ย	8 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ย	24 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ย	1 ปี ค่าเฉลี่ย
คาร์บอนมอนอกไซด์	30 ppm	9 ppm	-	-
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0.17 ppm	-	-	-
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	0.30 ppm	-	0.12 ppm	0.04 ppm
โอโซน	0.10 ppm	-	-	-
ฝุ่นละออง < 10 μ	-	-	0.12 mg/m ³	1.5 μ g/m ³
ฝุ่นละออง < 100 μ	-	-	0.33 mg/m ³	0.10 mg/m ³

(คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2538)

2.1.5.2 ดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI)

ดัชนีคุณภาพอากาศเป็นการรายงานข้อมูลคุณภาพอากาศในรูปแบบที่ง่ายต่อความเข้าใจของประชาชนทั่วไป เพื่อเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ให้สาธารณชนได้รับทราบถึงสถานการณ์มลพิษทางอากาศในแต่ละพื้นที่ว่าอยู่ในระดับใด มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยหรือไม่ ซึ่งดัชนีคุณภาพอากาศเป็นรูปแบบสากลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย สิงคโปร์ มาเลเซีย และประเทศไทย เป็นต้น

ดัชนีคุณภาพอากาศที่ใช้ในประเทศไทย คำนวณโดยเทียบจากมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไปของสารมลพิษทางอากาศ 5 ประเภท ได้แก่ ก๊าซโอโซน (O₃) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) เฉลี่ย 1 ชั่วโมง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เฉลี่ย 8 ชั่วโมง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง และฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM₁₀) เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ ดัชนีคุณภาพอากาศที่คำนวณได้ของสารมลพิษทางอากาศประเภทใดมีค่าสูงสุด จะใช้เป็นดัชนีคุณภาพอากาศของวันนั้น โดยดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ตั้งแต่ 0 ถึง มากกว่า 300 ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบกับระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย โดยดัชนีคุณภาพอากาศจะมีค่าเทียบเท่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป หากดัชนีคุณภาพอากาศมีค่าสูงเกินกว่า 100 แสดงว่าค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศมีค่าเกินมาตรฐานและคุณภาพอากาศในวันนั้นจะเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ดังตารางที่ 2.2 (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555a)

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศสำหรับประเทศไทย (Air Quality Index, AQI)

AQI	PM ₁₀ 24ชั่วโมง ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	สีที่ใช้	ความหมาย	แนวทางการป้องกันผลกระทบ
0-50	40	ฟ้า	คุณภาพดี	ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ
51-100	120	เขียว	คุณภาพปานกลาง	ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ
101-200	350	เหลือง	มีผลกระทบต่อสุขภาพ	ผู้ป่วยโรคทางเดินหายใจ ควรหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายนอกอาคาร บุคคลทั่วไปโดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ไม่ควรทำกิจกรรมภายนอกอาคารเป็นเวลานาน
201-300	420	ส้ม	มีผลกระทบต่อสุขภาพมาก	ผู้ป่วยโรคทางเดินหายใจ ควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมนอกอาคาร บุคคลทั่วไป โดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ควรจำกัดการออกกำลังกายนอกอาคาร
มากกว่า 300	มากกว่า 420	แดง	อันตราย	ผู้ป่วยโรคทางเดินหายใจ ควรอยู่ในอาคาร บุคคลทั่วไป ควรหลีกเลี่ยงการออกกำลังกายภายนอกอาคาร

(กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2555a)

2.2 ข้าวโพด (Corn)

ข้าวโพดเป็นธัญพืชมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea Mays* L. โดยจัดอยู่ในวงศ์ Gramineae มีถิ่นกำเนิดในประเทศเม็กซิโก และประเทศแถบอเมริกา นิยมใช้ประโยชน์เพื่อเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ การผลิตโดยทั่วไปอยู่ในเขตอบอุ่น เขตกึ่งร้อน และพื้นที่ราบเขตร้อน สามารถปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมค่อนข้างกว้าง ข้าวโพดสามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลายชนิด ทั้งในอุตสาหกรรม แป้ง น้ำมัน น้ำตาล และยังสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ ดังภาพที่ 2.1 (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541)



ภาพที่ 2.1 ต้นข้าวโพด (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541)

2.2.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไป

2.2.1.1 ราก (Root)

ข้าวโพดมีระบบรากแบบฝอย (Fibrous Root System) ซึ่งเจริญมาจาก 2 ส่วน คือ รากที่เจริญมาจากคัมภะ เรียกว่า Primary Root หรือ First Seeding Root และรากที่เจริญมาจากลำต้น เรียกว่า Adventitious Root มีจุดกำเนิดรากที่ข้อส่วนล่างของลำต้น ซึ่งจะเจริญเติบโตอยู่ตลอดชีวิตของข้าวโพดสามารถเจริญแผ่กระจายรอบลำต้นมีรัศมีประมาณ 1 เมตร และหยั่งลึกลงไป ในดินได้ 2.1-2.4 เมตร (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541)

2.2.1.2 ลำต้น (Culm หรือ Stalk หรือ Stem)

ลำต้นประกอบด้วยข้อ (Node) และปล้อง (Internode) บริเวณข้อมีเนื้อเยื่อเจริญ จุดกำเนิดราก ตา และรอยกาบใบ มีความสูงตั้งแต่ 30 เซนติเมตร จนถึง 1.4 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น 2.5-5.0 เซนติเมตรโดยมีโครงสร้างภายในลำต้นข้าวโพด ดังนี้

1) อีพิเดอมิส (Epidermis) เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ชั้นนอกสุด ทำหน้าที่ป้องกันอันตรายให้แก่เนื้อเยื่อภายในของลำต้น ส่วนใหญ่เซลล์เรียงตัวเพียงชั้นเดียว

2) คอร์เทก (Cortex) เป็นเนื้อเยื่อบางๆ 1-2 ชั้น ส่วนใหญ่เป็นเนื้อเยื่อชนิด พारेงไคมา (Parenchyma)

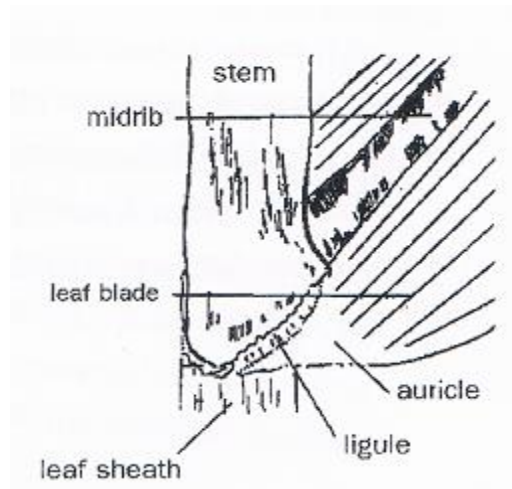
3) สตีล (Stele)

3.1) วาสคูลา บันเดิล (Vascular bundle) คือ กลุ่มของเนื้อเยื่อลำเลียง ประกอบด้วย ส่วนของไซเลม (Xylem) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อลำเลียงน้ำ และโฟลเอ็ม (Phloem) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อลำเลียงแร่ธาตุนั้นจะถูกล้อมรอบด้วยเนื้อเยื่อพारेงไคมา (Parenchyma) และเรียกเซลล์ที่มาล้อมรอบนี้ว่า บันเดิล ชีท (Bundle sheath)

3.2) พิท (Pith) เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ส่วนกลางของลำต้นส่วนใหญ่เป็นเนื้อเยื่อประเภทพारेงไคมา (Parenchyma) และในข้าวโพดจะพบ วาสคูลา บันเดิล (Vascular bundle) กระจายอยู่ (รังสฤษดิ์ กาวีติยะ และคณะ, 2541)

2.2.1.3 ใบ (Leaf)

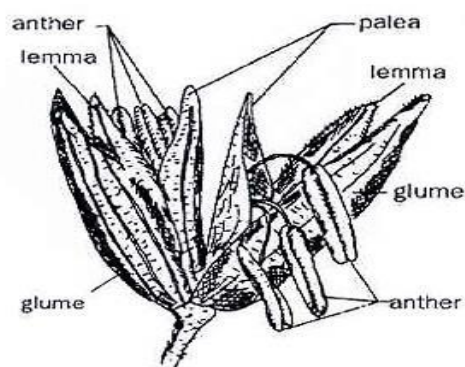
ใบประกอบด้วย กาบใบ (Leaf Sheath) และแผ่นใบ (Leaf Blade) กาบใบจะหุ้มลำต้น ส่วนแผ่นใบแผ่กางออก มีเส้นกลางใบเรียกว่า Midrib ข้าวโพดที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ให้ทนต่ออัตราการปลูกสูง มักจะมีลักษณะใบตั้ง แผ่นใบด้านบนมีขนเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง ส่วนแผ่นใบด้านล่างจะเรียบ และมีปากใบจำนวนมาก (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542) ดังภาพที่ 2.2



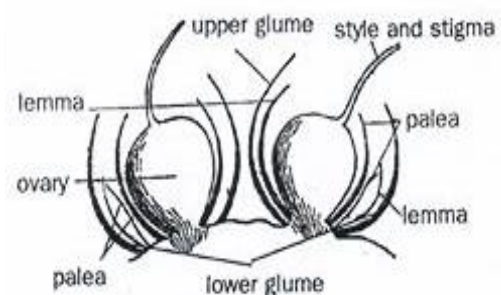
ภาพที่ 2.2 รอยต่อระหว่างกาบใบและแผ่นใบของข้าวโพด (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542)

2.2.1.4 ดอก (Flower)

ข้าวโพดมีช่อดอกตัวผู้และช่อดอกตัวเมียอยู่บนต้นเดียวกันแต่แยกกันอยู่คนละตำแหน่ง (monoecious plant) แต่ละกลุ่มดอกประกอบด้วย 2 ดอกย่อย ดอกย่อยที่อยู่ด้านบนมีการเจริญเติบโตดีกว่าดอกย่อยที่อยู่ด้านล่าง การพัฒนาของช่อดอกเริ่มขึ้นเมื่อข้าวโพดมีอายุ 40-45 วัน (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541) ดังภาพที่ 2.3 (1) และ ภาพที่ 2.3 (2)



(1)

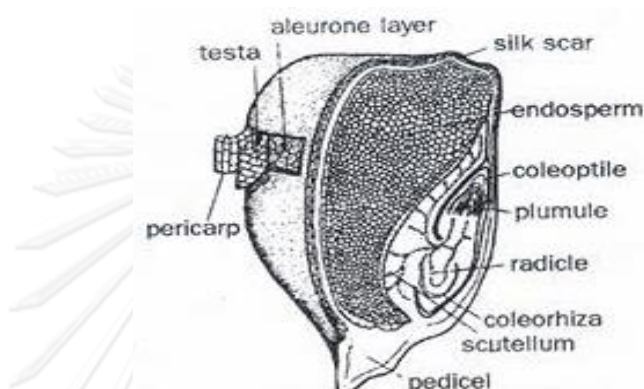


(2)

ภาพที่ 2.3 ดอกตัวผู้ของข้าวโพด (1) และดอกตัวเมียของข้าวโพด (2) (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541)

2.2.1.5 ผลและเมล็ด (Fruit and Seed)

ผลมีเยื่อหุ้มผลติดอยู่กับส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ ใสไม่มีสี เยื่อหุ้มผลและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวโพดจะสะสมแป้งไว้ในส่วนของเอนโดสเปิร์ม การสะสมแป้งจะสิ้นสุดเมื่อข้าวโพดเจริญเติบโตถึงระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา โดยจะปรากฏแผ่นเยื่อสีดำ หรือน้ำตาลดำ (Black Layer) ที่บริเวณโคนของเมล็ด (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542) ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เมล็ดข้าวโพดตัดตามยาว(นพพร สายัมพล และคณะ, 2542)

2.2.2 การจำแนกชนิดข้าวโพด

2.2.2.1 จำแนกตามคุณสมบัติของแป้งในเมล็ด

ภายในเมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิด คือ แป้งแข็ง (Hard Starch) และแป้งอ่อน (Soft Starch) จึงสามารถจำแนกโดยอาศัยตำแหน่งของแป้งแต่ละชนิดและลักษณะของเปลือกหุ้มเมล็ด ได้เป็น 7 ชนิด ดังภาพที่ 2.5 ดังนี้

1) ข้าวโพดป่า (Pod Corn) เป็นข้าวโพดเก่าที่ปลูกในบริเวณถิ่นกำเนิดแถบอเมริกา กลางและใต้ เมล็ดข้าวโพดป่าทุกเมล็ดจะมีเปลือกหุ้มเมล็ดอย่างมิดชิดเหมือนกับเมล็ดหญ้า และยังมีเปลือกหุ้มฝักหุ้มอีกชั้นหนึ่ง เมล็ดมีสีต่างๆ หรือเป็นลาย

2) ข้าวโพดคั่ว (Pop corn) เป็นข้าวโพดที่เมล็ดมีแป้งแข็งที่อัดกันอย่างแน่นมาก มีแป้งอ่อนเป็นองค์ประกอบเล็กน้อย ลักษณะรูปร่างของเมล็ดแบ่งเป็น 2 พวก คือ พวกที่มีรูปร่างเรียวยาวแหลมคล้ายเมล็ดข้าวเรียกว่า Rice Pop Corn และพวกที่ลักษณะเมล็ดกลมเรียกว่า Pearl Pop

Corn เมื่อเมล็ดข้าวโพดชนิดนี้ได้รับความร้อนระดับหนึ่งแป้งจะขยายตัวสร้างความดันขึ้นภายในจนกระทั่งเปลือกหุ้มเมล็ดที่หนาแตกออก ปริมาตรของแป้งจะเพิ่มขึ้น 25-30 เท่า

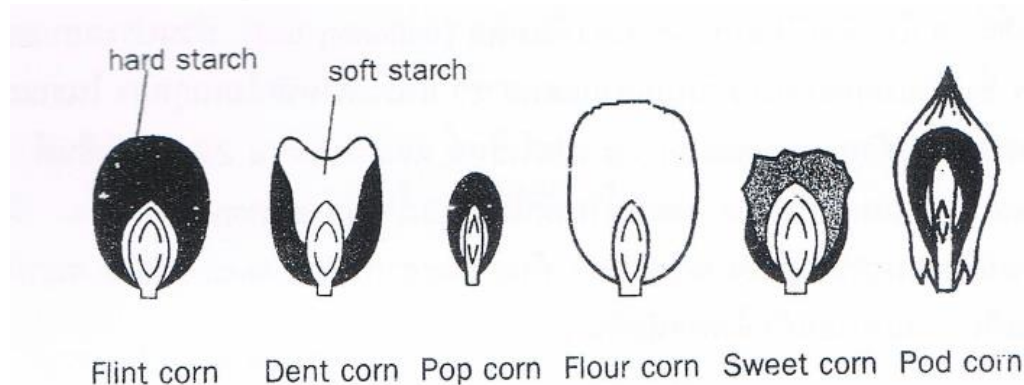
3) ข้าวโพดหัวแข็ง (Flint Corn) เป็นข้าวโพดที่ด้านบนของเมล็ดมีแป้งแข็งเป็นองค์ประกอบ ส่วนแป้งอ่อนจะอยู่ในตรงกลางเมล็ดหรืออาจไม่มีเลย เมื่อเมล็ดแห้งจะไม่มีรอยบุบด้านบน เมล็ดจะมีสีต่างๆ เช่น เหลือง เหลืองส้ม ขาว และดำ

4) ข้าวโพดหัวบุบ (Dent Corn) เป็นข้าวโพดที่มีส่วนประกอบของแป้งอ่อนอยู่ด้านบนของเมล็ด ส่วนแป้งแข็งจะอยู่ด้านล่างและด้านข้าง เมื่อข้าวโพดแก่เมล็ดจะสูญเสียความชื้นทำให้แป้งอ่อนด้านบนหดตัวเมล็ดจึงเกิดรอยบุบ

5) ข้าวโพดแป้ง (Flour Corn) เป็นข้าวโพดที่มีองค์ประกอบเป็นแป้งอ่อนเกือบทั้งหมด มีแป้งแข็งเป็นชั้นบางๆ อยู่ด้านในเมล็ด เมื่อข้าวโพดแก่การหดตัวของแป้งในเมล็ดจะเท่าๆกัน ทำให้เมล็ดมีรูปร่างเหมือนข้าวโพดหัวแข็ง แต่มีลักษณะทึบแสง (Opaque)

6) ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) เป็นข้าวโพดที่น้ำตาลในเมล็ดเปลี่ยนไปเป็นแป้งไม่สมบูรณ์ เมล็ดจึงยังมีความหวานมากกว่าข้าวโพดชนิดอื่นๆ เมล็ดเมื่อแก่จะเหี่ยวยุบ

7) ข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy Corn) เมล็ดประกอบด้วยแป้งอ่อนที่มีความเหนียวเนื่องจากองค์ประกอบของแป้งส่วนใหญ่เป็นอะมิโลเพกติน (Amylopectin) เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของอะมิโลเพกตินกับอะมิโลส (Amylose) มีประมาณร้อยละ 73:27 ทำให้เมล็ดมีรูปร่างเหมือนข้าวโพดแป้ง (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542)



ภาพที่ 2.5 ลักษณะเมล็ดข้าวโพดชนิดต่างๆ (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542)

2.2.2.2 จำแนกตามวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์มี 4 ประเภท ดังนี้

- 1) ใช้เมล็ดสุกแก่ เป็นข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวเมล็ดแก่มาใช้ประโยชน์เพื่อการบริโภคทั้งมนุษย์และสัตว์ หรือใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งหรือน้ำมัน
- 2) ใช้บริโภคฝักสด คือ ข้าวโพดที่ปลูกเพื่อเก็บเกี่ยวฝักที่ยังอ่อนไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้แก่ ข้าวโพด ฝักอ่อน ข้าวโพดหวาน และข้าวโพดข้าวเหนียว
- 3) ใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ คือ ปลูกข้าวโพดแล้วตัดต้นในระยะก่อนแก่ เพื่อนำข้าวโพดทั้งต้นไปทำหญ้าสด (Fodder) หญ้าหมัก (Silage) หรือหญ้าแห้ง (Hay)
- 4) ปลูกเพื่อใช้ฝักสำหรับประดับ (Ornamental Corn) ข้าวโพดที่เมล็ดบนฝักเดียวกันมีหลากสีเนื่องจากการสะสมสารสี (Pigment) ที่แตกต่างกัน สามารถนำฝักไปประดับตกแต่งได้ (นพพร สายัมพล และคณะ, 2542)

2.2.3 การใช้ประโยชน์

ข้าวโพดเป็นพืชที่ใช้ประโยชน์เป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ รวมทั้งเพื่อการอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากเกือบทุกส่วนของข้าวโพดมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ การนำมาใช้ประโยชน์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างขวาง ดังนี้

- 1) ใช้เป็นอาหารมนุษย์ นำเมล็ดข้าวโพดมาบดให้แตกหรือละเอียด สามารถนำมาหุงหรือต้มเป็นอาหารหรือใช้ทำขนมปังได้ ข้าวโพดเป็นอาหารหลักในหลายประเทศ เช่น เม็กซิโก สเปน อิตาลี เป็นต้น
- 2) ใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นชนิดข้าวโพดหัวแข็ง และข้าวโพดหัวบอบ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ดเป็นแป้ง และมีโปรตีนอยู่บ้าง ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์เลี้ยงที่มีคุณภาพและราคาถูก ผลผลิตเมล็ดข้าวโพดประมาณร้อยละ 72 นำไปใช้ในการผลิตอาหารเลี้ยงสัตว์ ทั้งไก่ หมู เป็ด และโคนม มีบางประเทศโดยเฉพาะประเทศในทางยุโรปจะปลูกข้าวโพดแล้วตัดข้าวโพดทั้งต้นไปทำหญ้าหมัก (Silage) สำหรับเลี้ยงสัตว์

สำหรับประเทศไทยนั้นสามารถแบ่งประเภทของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ออกเป็น 3 ประเภท คือ ข้าวโพดพันธุ์แท้ เกิดจากการผสมของสายพันธุ์ตามธรรมชาติ เช่น สายพันธุ์แก่นครสวรรค์ 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสม เกิดจากการผสมของสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกคุณสมบัติ เพื่อให้เกิดสายพันธุ์ที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่ต้องการได้ เช่น สายพันธุ์นครสวรรค์ 72 และ ข้าวโพดพันธุ์ผสมเปิด เกิดจากการผสมของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ระหว่างสายพันธุ์ในประเทศไทยและสายพันธุ์จากต่างประเทศเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ เช่น สายพันธุ์นครสวรรค์ 1 (พิเชษฐ กุลดอยมา และสุรพงษ์ ประสิทธิ์วัฒน์เสรี, 2550)

3) ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เมล็ดข้าวโพดสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางด้านอาหาร เช่น แป้ง น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำตาล น้ำส้ม อาหารกระป๋อง และอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น พลาสติก फिल्म เครื่องเคลือบ แอลกอฮอล์ กระดาษ และเสื้อผ้า นอกจากนี้มีการผลิตน้ำเชื่อมจากข้าวโพดที่เรียกว่า High Fructose Corn Syrup เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มอย่างกว้างขวางอีกด้วย (รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ และคณะ, 2541)

2.2.4 สถานการณ์การปลูกข้าวโพดภายในประเทศ

ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยทำรายได้ให้กับประเทศคิดเป็นมูลค่าประมาณปีละ 10,000 ล้านบาท โดยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดประมาณปีละ 11-12 ล้านไร่ ให้ผลผลิตประมาณปีละ 4-5 ล้านตัน โดยผลผลิตประมาณร้อยละ 65 ของทั้งหมดใช้บริโภคภายในประเทศในรูปแบบวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานอาหารสัตว์ส่วนที่เหลือส่งออกในรูปแบบของข้าวโพดข้าวโพดบดและแป้งข้าวโพดซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 5,000-6,000 ล้านบาท (โชคชัย เอกทัศนาวรรณ, 2547) ดังตารางที่ 2.3

แหล่งปลูกข้าวโพดที่สำคัญอยู่ในภาคเหนือซึ่งมีพื้นที่ปลูกถึงกว่าครึ่งหนึ่งของทั้งประเทศส่วนที่เหลือกระจายปลูกในทุกภาคของประเทศ ข้าวโพดถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ในปริมาณมากเนื่องจากข้าวโพดจะประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน รวมถึงวิตามินต่างๆ เป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับวัตถุดิบในการผลิตอาหารชนิดอื่น เช่น ปลาป่น กากถั่วเหลือง ปลาขี้ขาว เป็นต้นและข้าวโพดเป็นพืชไร่ที่เจริญเติบโตได้ดีในดินแทบทุกชนิด โดยเฉพาะในดินร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำดี และมีปริมาณแร่ธาตุอาหารพืชอุดมสมบูรณ์ดี พื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ควรจะเป็นที่ดอนหรือเป็นที่ไม่มีน้ำท่วมขัง และมีความลาดชันต่ำ

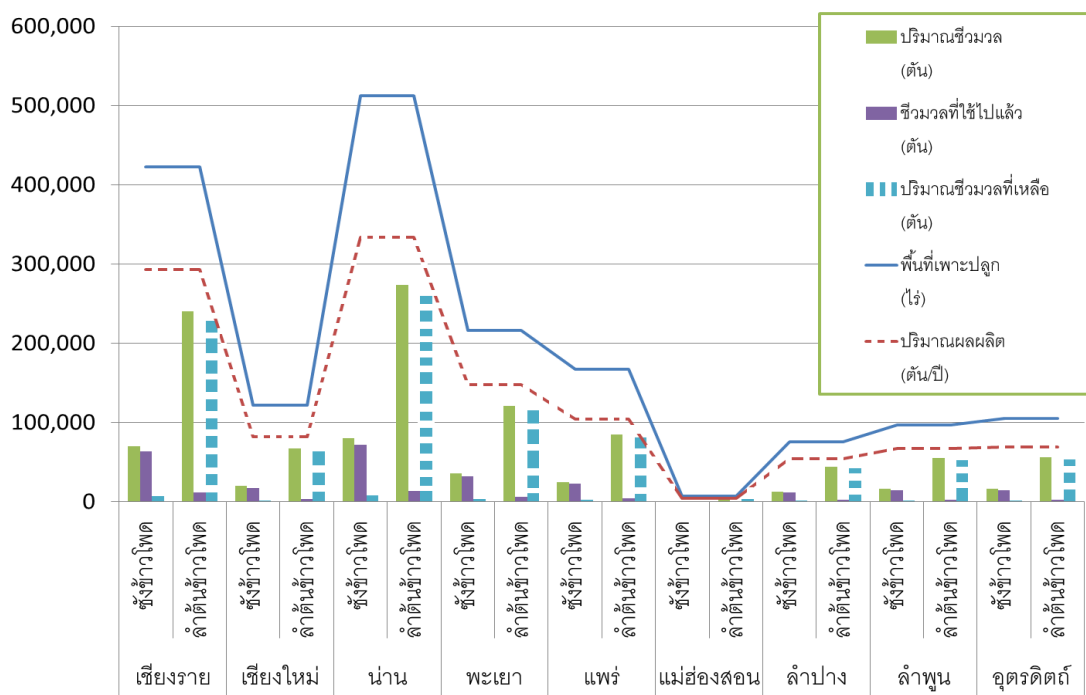
เนื่องจากข้าวโพดเป็นพืชที่ปลูกง่าย และมีความต้องการผลผลิตในปริมาณมากเพื่อนำมาผลิตเป็นอาหารสัตว์จึงทำให้ในประเทศไทยมีการปลูกข้าวโพดเป็นจำนวนมากการปลูกข้าวโพดจะเริ่มจากขั้นตอนการเตรียมดินให้มีความเหมาะสมต่อการปลูก หลังจากนั้นเกษตรกรจะทำการหยอดเมล็ดลงในร่องโดยมีการใส่ปุ๋ยเพื่อให้ข้าวโพดมีผลผลิตที่ดี แต่การปลูกข้าวโพดให้ได้ผลผลิตดี ต้องมีการควบคุมและกำจัดวัชพืชภายหลังการเก็บเกี่ยวฝักข้าวโพด เกษตรกรจะทำการกำจัดต้นข้าวโพดที่เหลือด้วยการเผาเพื่อเตรียมพื้นที่ในการปลูกข้าวโพดรอบต่อไป เนื่องจากเกษตรกรมีความเชื่อที่ว่า การเผาต้นข้าวโพดช่วยเพิ่มผลผลิต ช่วยกำจัดวัชพืชและเชื้อโรคในดิน รวมถึงเป็นการกำจัดต้นข้าวโพดซึ่งขยะเหลือทิ้งทางการเกษตร (สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย, 2555)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในปี พ.ศ. 2555-2556

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	เนื้อที่เพาะปลูก(ไร่)			ผลผลิต (ตัน)		
	2554	2555	2556	2554	2555	2556
ภาคเหนือ	4,733,239	5,078,643	5,085,652	3,146,865	3,359,467	3,369,547
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	1,874,857	1,736,312	1,743,949	1,309,421	1,121,281	1,225,179
ภาคกลาง	793,383	714,033	711,846	527,981	470,427	471,826
รวมทั้งประเทศ	7,401,479	7,528,988	7,541,447	4,984,267	4,951,175	5,066,552

(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556)

จากตารางที่ 2.3 พบว่า เนื้อที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในบริเวณภาคเหนือของประเทศสูงถึงประมาณ 4 ล้านไร่ และมากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาณเนื้อที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของทั้งประเทศ ขณะที่ผลผลิตจากการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของภาคเหนือจะมีปริมาณสูงถึงประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งคิดเป็นสามในสี่ส่วนของปริมาณผลผลิตของทั้งประเทศ และจากความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ จึงทำให้แนวโน้มความต้องการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ผลิตได้จะถูกนำไปผลิตเป็นอาหารสำหรับไก่เนื้อประมาณร้อยละ 40 สุกรประมาณร้อยละ 36 ไก่ไข่ประมาณร้อยละ 21 และโคนมประมาณร้อยละ 2 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556)



แผนภูมิที่ 2.2 ปริมาณผลผลิต พื้นที่เพาะปลูก และปริมาณข้าวมวลของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พ.ศ. 2552 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552b)

จากแผนภูมิที่ 2.2 พบว่า ปริมาณข้าวมวลจากการปลูกข้าวโพด มี 2 ประเภท คือ ข้าวมวลจากซังข้าวโพด และ ข้าวมวลจากลำต้นข้าวโพด เมื่อคิดอัตราการปลูกที่เท่ากันข้าวมวลจากลำต้นข้าวโพดจะมีปริมาณมากกว่าข้าวมวลจากซังข้าวโพดประมาณร้อยละ 60-70 ซึ่งข้าวมวลจากซังข้าวโพดนั้นมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทำให้ข้าวมวลจากซังข้าวโพดที่เหลือใช้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณข้าวมวลจากซังข้าวโพดทั้งหมด ขณะที่ข้าวมวลจากลำต้นข้าวโพดนั้นมีการนำไปใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อย จึงทำให้ข้าวมวลจากลำต้นข้าวโพดเหลือใช้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับปริมาณข้าวมวลจากลำต้นข้าวโพดทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน , 2552b)

2.2.5 การปลูกข้าวโพดภายในประเทศไทย

ข้าวโพดเป็นพืชที่สามารถปลูกได้ตลอดปีโดยขั้นตอนการปลูกข้าวโพดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาตั้งแต่เริ่มเตรียมดินสำหรับปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวผลผลิต จะใช้ระยะเวลาประมาณ 100-120 วันซึ่งจะ

ขึ้นอยู่กับชนิดของสายพันธุ์ข้าวโพดที่ใช้ปลูก โดยทั่วไปเกษตรกรปลูกข้าวโพดจะอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ดังนั้นฤดูปลูกโดยทั่วไปในประเทศไทยมี 2 ฤดู คือ

2.2.5.1 ฤดูฝน (รุ่นที่ 1) เริ่มปลูกประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมขึ้นอยู่กับการตกและการกระจายของฝนในท้องถิ่น เกษตรกรนิยมปลูกข้าวโพดต้นฤดูฝนเนื่องจากได้ผลผลิตสูงและผลผลิตจะเก็บเกี่ยวมากในช่วงเดือนกันยายนประมาณร้อยละ 86 ของผลผลิตทั้งประเทศ ซึ่งสามารถสรุปพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่นิยมปลูกในช่วงฤดูฝน คือ พันธุ์ซีพี-ดีเค 888 เกษตรกรปลูกร้อยละ 34.74 รองลงมาคือ พันธุ์คาร์กิลล์ 919 พันธุ์บีบี 717 และพันธุ์แปซิฟิก 984 มีการปลูกร้อยละ 17.69 ร้อยละ 6.87 และร้อยละ 2.26 ตามลำดับ (วินัย ศรวัต, 2550)

2.2.5.2 ฤดูแล้ง (รุ่นที่ 2) เริ่มปลูกประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด ของการปลูกข้าวโพด เนื่องจากอุณหภูมิโดยทั่วไป จะอยู่ประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมรวมไปถึง เมื่อเข้าสู่การเก็บเกี่ยวเป็นระยะที่อากาศร้อนและแห้งแล้งจึงสะดวกในการเก็บเกี่ยวและสามารถตากแห้งได้ดีซึ่งผลผลิตจะเก็บเกี่ยวมากที่สุดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ประมาณร้อยละ 13 ของผลผลิตทั้งประเทศ (รังสฤษฎ์ กาวีตะ และคณะ, 2541)

2.3 ชีวมวล (Biomass)

2.3.1 ความหมายของชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ในธรรมชาติ ซึ่งเก็บสะสมพลังงานเอาไว้และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตร ซึ่งองค์ประกอบชีวมวลจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

2.3.1.1 ความชื้น (Moisture)

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน ร้อยละ 50

2.3.1.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ของแข็งระเหยได้ (Volatiles Solid) กับปริมาณคาร์บอน (Carbon) ส่วนของแข็งระเหยได้คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ดี ดังนั้น ชีวมวลชนิดที่ค่าของแข็งระเหยได้สูง จะสามารถติดไฟได้ดี

2.3.1.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (Ash) เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนเถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัด (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2555)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพาราและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น จึงมีของเสียและเศษวัสดุทางการเกษตรมากมาย เช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง และกากอ้อย เป็นต้น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวลบางส่วนถูกนำมาแปรรูปเป็นปุ๋ย วัสดุคืบ และเชื้อเพลิง บางส่วนถูกเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย/ยอดอ้อย และรากไม้ยางพารา เป็นต้น พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นแต่ละปีเทียบเท่าถ่านหินลิกไนต์ประมาณ 54 ล้านตันดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่าง ปี 2547-2552 (หน่วย: พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)

ชนิด	2547	2548	2549	2550	2551	2552
ฟืน	3,693	3,452	3,372	3,237	3,300	3,138
ถ่าน	2,608	2,698	2,807	2,932	3,095	2,996
แกลบ	1,073	1,084	998	1,043	1,184	1,234
กากอ้อย	2,949	2,866	2,435	2,636	2,818	2,829
วัสดุเหลือใช้	188	724	1,381	1,797	1,848	2,261
รวม	10,511	10,100	10,993	11,645	12,245	12,455

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552a)

ตารางที่ 2.5 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552

ชนิด	ผลผลิต (ton)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล ที่เหลือใช้ (ton)	ค่าความร้อน (Kcal/Kg)	ศักยภาพพลังงาน (TJ)	ศักยภาพพลังงาน (Kton)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	3,440.20	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	4,154.52	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	3,409.15	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	2,446.37	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	4,644.27	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	4,309.81	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	4,309.81	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	4,266.81	18,304.15	433.29
		ใบ	162,970.06	4,209.47	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	4,410.15	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	2,348.42	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	4,400.59	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	4,400.59	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990.82	3,679.11	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	3,877.40	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	4,283.53	2,311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	3,578.77	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

*หมายเหตุ หน่วยศักยภาพพลังงาน TJ หมายถึง เทระจูล (10^{12} J)

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552c)

2.3.2 ประเภทของชีวมวล

ประเภทของชีวมวลสามารถแบ่งตามประเภทของแหล่งที่มาได้ ดังนี้

1) ชีวมวลรวบรวมได้จากโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น แกลบได้จากโรงสีข้าว ปีกไม้ เศษไม้และขี้เลื่อยได้จากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ ไຍปาล์ม ทะลายและกะลาปาล์ม ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ชังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด ชานอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานแป้งมัน เปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากโรงไม้สับ เป็นต้น สำหรับชีวมวลประเภทนี้เป็นที่ต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากรวบรวมได้ง่าย

2) ชีวมวลที่รวบรวมได้จากไร่ สวน และนาข้าว เช่น ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยังพาราอยู่ในสวนยางพารา ใบอ้อยและยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย เหง้ามันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง ทางปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน ชังข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพด เป็นต้น การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยกว่า ดังนั้นส่วนใหญ่จึงถูกเผาทิ้ง

3) ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไม้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า วิธีการนี้ยังเริ่มเป็นที่นิยมในประเทศไทย เพื่อลดความเสี่ยงด้านเชื้อเพลิง

ชีวมวลมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในประเภทเดียวกับถ่านหิน แต่รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของชีวมวล นอกจากนี้ความชื้นและสิ่งเจือปนถือได้ว่าเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของชีวมวล (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2555)

2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวล

ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่มีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโตอีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิง

ฟอสซิลมาก ทำให้การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า

ข้อเสียของชีวมวล คือ การเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหา หรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อยมี จำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่า เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากันจะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่า น้ำมันเตา เป็นต้น (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2555)

2.4 เชื้อเพลิงอัดแท่ง (Fuel Briquettes)

เชื้อเพลิงอัดแท่ง คือการนำชีวมวลมาผลิตเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) เชื้อเพลิงเขียว เป็นการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาอัดขึ้นรูปให้มีความหนาแน่นมากขึ้น และมีลักษณะเป็นแท่งเหมาะแก่การใช้งาน สามารถจุดติดไฟและลุกไหม้ได้เวลานานขึ้น ตัวอย่างของเชื้อเพลิงเขียว เช่น เชื้อเพลิงเขียวจากขี้เลื่อย เป็นต้นดังภาพที่ 2.6 (1)

2) ถ่านอัดแท่ง เนื่องจากสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงเขียวที่ผลิตได้นั้น ไม่เหมาะสมในการใช้ในครัวเรือนที่ชุมชนหนาแน่นและภาคอุตสาหกรรม เพราะมีควันมากในขณะเผาไหม้ อีกทั้งยังมี ข้อดีน้อยกว่าฟืนและถ่านไม้ ทั้งในด้านของความร้อนที่ต่ำกว่า ปริมาณเถ้าที่มากกว่า และระยะเวลาที่ ลุกไหม้ก็สั้นกว่า จึงมีการผลิตถ่านอัดแท่ง โดยการเผาเศษวัสดุให้เป็นถ่านดำก่อน แล้วจึงนำเศษถ่าน ดำนั้นมาอัดเป็นแท่ง หรือนำเชื้อเพลิงเขียวที่อัดเป็นแท่งแล้วมาเผาให้เป็นแท่งถ่าน เช่น ถ่านอัดแท่ง จากกะลามะพร้าว เป็นต้น (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2549) ดังภาพที่ 2.6 (2)



(1)



(2)

ภาพที่ 2.6 เชื้อเพลิงเขียว (1) และเชื้อเพลิงอัดแท่ง (2) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555)

2.4.1 แหล่งวัสดุที่สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่

1) เศษพืชหรือวัสดุเหลือทิ้งหลังการเก็บเกี่ยว (Crop Residues) ซึ่งมีทั้งในไร่นา สวน ป่า และโรงงาน เช่น โรงเลื่อย

2) วัชพืช หมายถึง พืชที่ไม่เป็นที่ต้องการ ซึ่งมีอยู่กระจายในพื้นที่เพาะปลูก หรือ ในพื้นที่ว่างเปล่า นอกจากนี้วัชพืชที่ขึ้นในเขตป่าอาจเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าเมื่อถึงฤดูแล้ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างประเมินค่าไม่ได้

3) เศษวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กากส่าเหล้าจากโรงงานสุรา กากส่าเปียร์จากโรงงานเบียร์ แกลบจากโรงสี เป็นต้น

4) ขยะมูลฝอย ซึ่งนับเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญของประเทศ เนื่องจากปริมาณขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากสามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงจะสามารถลดความรุนแรงของปัญหาขยะดังกล่าว และเป็นแนวทางหนึ่งในการอนุรักษ์พลังงานควบคู่กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2549) ดังตารางที่ 2.6 และ ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	หน่วย	ปริมาณความร้อน (Kcal/unit)
ก๊าซชีวภาพ	ลบ.ม.	5,000
ไม้ยางพารา	กก.	4,560
ถ่านไม้ยางพารา	กก.	7,650
กะลามะพร้าว	กก.	4,830
ถ่านกะลามะพร้าว	กก.	7,760
เส้นใยปาล์ม	กก.	4,820
ถ่านกะลาปาล์ม	กก.	7,460
ซังข้าวโพด	กก.	4,540
ขี้เลื่อย	กก.	4,990
ผักตบชวา	กก.	3,010
กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย	กก.	2,390-4,060

(มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2555)

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติชีวมวลชนิดต่างๆ

คุณสมบัติชีวมวล	Moisture %	Ash %	Volatile Matter %	Fixed Carbon %	Higher Heating Value (kcal/kg)	Lower Heating Value (kcal/kg)
แกลบ (Rice Husk)	12.00	12.65	56.46	18.88	3,526.53	3,230.64
ฟางข้าว (Rice Straw)	10.00	10.39	60.70	18.90	3,262.43	2,946.94
ชานอ้อย (Bagasse)	50.73	1.43	41.98	5.86	2,209.13	1,761.00
ใบอ้อย (Cane Trash)	9.20	6.10	67.80	16.90	4,013.86	3,699.57
ไม้ยางพารา (Parawood)	45.00	1.59	45.70	7.71	2,477.30	2,055.45
เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)	38.50	4.42	42.68	14.39	3,137.43	2,724.67
กะลาปาล์ม (Palm Shell)	12.00	3.50	68.20	16.30	4,365.92	4,039.20
ทะลายปาล์ม (Empty Fruit Bunch)	58.60	2.03	30.46	8.90	2,197.90	1,730.40
ต้นปาล์ม (Palm Trunk)	48.40	1.20	38.70	11.70	2,239.48	1,805.93
ทางปาล์ม (Palm Leaf)	78.40	0.70	16.30	4.60	934.03	420.65
ซังข้าวโพด (Corncob)	40.00	0.90	45.42	13.68	2,700.29	2,298.04
ลำต้นข้าวโพด (Corn Stalk)	41.70	3.70	46.46	8.14	2,797.32	2,349.43
เหง้ามันสำปะหลัง (Tapioca Rhizome)	59.40	1.50	31.00	8.10	1,780.83	1,313.10
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark)	60.00	2.44	28.00	9.56	1,627.87	1,175.19

(มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2555)

2.4.2 วิธีการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง

วิธีการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงสามารถแบ่งตามกระบวนการขึ้นรูปได้เป็น 2 ลักษณะคือ กระบวนการอัดร้อนและกระบวนการอัดเย็น

2.4.2.1 กระบวนการอัดร้อน (Hot Press Process)

เป็นการอัดขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ความร้อนตลอดเวลาที่ทำการอัด โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับวัสดุที่เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดสารเคมีอินทรีย์ที่ช่วยยึดเนื้อวัสดุเข้าหากัน จึงทำให้สามารถยึดเกาะขึ้นรูปเป็นแท่งได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน ตัวอย่างวัสดุที่สามารถนำมาทำเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยกระบวนการอัดร้อน คือ วัสดุเศษทางการเกษตร (แกลบ ชี้เลื่อย ยอด อ้อย ฟางข้าว เปลือกผลไม้ ชังข้าวโพด ชานอ้อย ฯลฯ) วัชพืชบก-น้ำ และผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะพืชที่มีแป้งและน้ำตาล (ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวฟ่าง ฯลฯ)

2.4.2.2 กระบวนการอัดเย็น (Cold Press Process)

เหมาะสำหรับวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติในการจับตัวได้ด้วยความร้อนมี 2 วิธีคือ

1) การอัดเย็นชนิดเติมตัวประสานซึ่งเป็นการอัดเย็นที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป เนื่องจากเครื่องมือและวิธีการที่ง่ายและใช้พลังงานต่ำใช้วัสดุมาผสมกับตัวประสาน โดยทั่วไปจะเป็นแป้งมันสำปะหลังหากวัสดุมีขนาดใหญ่ เช่น กะลามะพร้าวต้องมีเครื่องบดให้ละเอียดก่อนแล้วจึงนำมาผสมกับแป้งมันและน้ำในอัตราส่วนตามที่ต้องการ

2) การอัดเย็นด้วยแรงอัดสูง เป็นการอัดเย็นระบบใหม่ที่ไม่ต้องใช้ตัวประสานแต่จะใช้แรงดันในการอัดสูงกว่าปกติอย่างมาก เพื่อให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการอัดตัวแน่นจนจับตัวเป็นก้อนได้ซึ่งการอัดเย็นประเภทนี้จะใช้มอเตอร์ที่มีกำลังค่อนข้างสูงและยังใช้พลังงานไฟฟ้ามาก แต่จะมีขั้นตอนในการอัดเพียงขั้นตอนเดียวเพราะไม่ต้องผสมตัวประสานและไม่มีความจำเป็นที่จะต้องบดวัสดุก่อนเข้าอัด ยกเว้น วัสดุที่มีขนาดใหญ่ต้องทำการบดให้มีขนาดเหมาะสมที่จะทำการอัดขึ้นรูปได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555)

2.4.2.3 เทคนิคการอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)

การอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) หรือ การอัดผ่านเกลียว หรือการอัดพอง โดยใช้อุปกรณ์เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสม (mixing) การนวด (kneading) การเขี่ย และ การขึ้นรูป

1) หลักการของเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แล้วลำเลียงผ่านสกรูลำเลียง (screw conveyor) โดยสกรูจะทำหน้าที่ลำเลียงส่วนผสม ตามแนวยาวของสกรูโดยอยู่ในช่องว่างระหว่างเกลียวสกรู ระหว่างการลำเลียงจะเกิดการผสม (mixing) และการนวด (kneading) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้ส่วนผสมเกิดความร้อน ขณะที่ส่วนผสมเคลื่อนที่จะมีแรงอัดเพิ่มขึ้น ผ่านหน้าพิมพ์ (die) ได้ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งเรียกว่า เอ็กซ์ทรูเตด (extrudate)

2) ข้อดีของเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) เช่น ใช้แรงงานในการผลิตน้อยได้กำลังการผลิตสูง เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง รวมถึงได้ผลผลิตสูง มีของเสีย (waste) จากกระบวนการผลิตน้อย (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2555)

2.5 ถ่าน (Charcoal)

2.5.1 ประเภทของการผลิตถ่าน (Classification of Charcoal Marking)

2.5.1.1 การผลิตถ่านแบบพื้นเมือง การผลิตถ่านแบบพื้นเมืองนี้จะมีการพัฒนาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย เช่น สภาพป่า ธรณีวิทยา ภูมิประเทศ สภาพอากาศ และวิธีการนำเอาถ่านไปใช้ วิธีการพื้นเมืองนี้ สามารถแบ่งวิธีการผลิตได้ออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการเผาโดยการถมกลบ (Heap Method) และวิธีการใช้เตาเผาถ่าน (Charcoal Kiln Method)

2.5.1.2 การผลิตถ่านแบบอุตสาหกรรม สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1) วิธีการกลั่นแยกไม้แบบแห้ง เป็นกระบวนการผลิตที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแยกองค์ประกอบของไม้ในโรงงาน โดยวัตถุประสงค์หลักของกรรมวิธีนี้ คือ การผลิตกรดอะซิติกเมธา

นอลอะซิโตน และน้ำมันดินจากไม้ ส่วนผลพลอยได้ คือ ถ่าน และก๊าซจากไม้ ไม่มีการผลิตถ่านด้วยวิธีนี้ในปัจจุบัน ถ่านที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีน้ำหนักเบา ผิวหยาบ แตกง่าย และมีคุณภาพต่ำ

2) วิธีการกลั่นแยกแบบแห้งสำหรับการผลิตน้ำมันสน นิยมใช้กันทั่วไปเพื่อผลิตถ่านใช้เองในครัวเรือน (Small Scale) โดยการใช้ไม้สนหรือต่อไม้ในการผลิตน้ำมันสนเพื่อใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบในการทำธูปหอมหรือกำยาน โดยส่วนใหญ่จะพบอุตสาหกรรมประเภทนี้ในประเทศจีนและประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

3) การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) สำหรับการผลิตถ่าน เป็นการผลิตที่มีต้นทุนต่ำกว่าการกลั่นแยกไม้แบบแห้ง โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีโดยเกิดการไพโรไลซิสของไม้เริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส เกิดคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส และกลายเป็นถ่านที่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2.5.2 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์ คือ กระบวนการแยกสารอินทรีย์ภายในไม้ในสภาวะที่มีอากาศอยู่น้อยมาก และมีการให้ความร้อนในระหว่างกระบวนการช่วยกำจัดน้ำ น้ำมันดิน และสารประกอบอื่นๆ ออกจากไม้ ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนั้นจะประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีสารประกอบหลัก คือ คาร์บอน (ร้อยละ 80) นอกจากนั้นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละ 10-20) เถ้า (ร้อยละ 0.5-10) และแร่ธาตุต่างๆ เช่น กำมะถัน และฟอสฟอรัส สำหรับกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์ในเนื้อไม้เปลี่ยนรูปเป็นถ่านเรียกว่า “กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน” (Carbonization)

สามารถแยกกระบวนการดังกล่าว ได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การลดความชื้น การเผาไหม้ การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ และการทำให้เย็นตัว แต่ละขั้นตอนอาจจะเกิดขึ้นภายในเตาเผาในช่วงเวลาเดียวกันหรือแตกต่างกันก็ได้ สำหรับเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนขึ้นอยู่กับขนาดของเตาเผา ถ่าน ชนิดของเตาเผา ถ่าน ขั้นตอนในการทำงาน ความชื้นในเนื้อไม้ และสภาวะอากาศ (สุพรชัย มั่งมีสิทธิ, 2555)

2.5.2.1 การลดความชื้น (Dehydration)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยการเผาไหม้เพื่อไล่ความชื้นภายในเนื้อไม้ให้ออกไปอยู่ในรูปของไอน้ำ โดยระหว่างกระบวนการ อุณหภูมิของเตาเผาถ่านจะค่อยๆสูงขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส ความชื้นก็จะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งหมดไป สังเกตได้จากปริมาณไอน้ำสีขาวที่เกิดขึ้นจนหนาที่บ

ขั้นตอนการลดความชื้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 20-270 องศาเซลเซียสจำเป็นต้องใช้ความร้อนจากภายนอกเพื่อให้ชีวมวลเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) สะสมเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction)

โดยการลดความชื้นกระทำได้ 2 วิธีคือ

1) การให้ความร้อนโดยตรงโดยการจุดชีวมวลบางส่วนในเตาเพื่อที่จะทำให้บางส่วนของชีวมวลที่จะทำถ่านลุกไหม้ และเกิดความร้อนเพียงพอที่จะไล่ความชื้นออกจากไม้ในส่วนที่เหลือวิธีนี้ประสิทธิภาพจะต่ำและหากควบคุมอากาศไม่ดีจะทำให้เกิดเขม่ามากเป็นเหตุให้ผลผลิต (yield) ต่ำ

2) การให้ความร้อนทางอ้อมโดยการจุดเชื้อเพลิงหน้าเตาและนำเพียงลมร้อนเข้าไปไล่ความชื้นออกจากชีวมวลในเตา หากชีวมวลในเตามีความชื้นมากก็จะต้องใช้เชื้อเพลิงและเวลามากขึ้น

2.5.2.2 การเผาไหม้ (Combustion)

ขั้นตอนนี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 270-400 องศาเซลเซียสโดยการเปลี่ยนเป็นถ่านนี้ควันที่ออกมาจะประกอบด้วยสารต่างๆ ที่เกิดหลายชนิดจากการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อน (pyrolysis) และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ซึ่งแบ่งการเผาไหม้ออกได้เป็น 2 ช่วงคือ

1) ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 270-300 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ชีวมวลในเตาสะสมความร้อนไว้มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) โดยไม่ต้องเติมเพิ่ม

ความร้อน ชีวมวลจะลุกไหม้และสลายตัวด้วยความร้อนที่สะสมไว้ในตัวเองเซลลูโลส (cellulose) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และการสลายตัวจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2) ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เซลลูโลส (cellulose) ยังคงสลายตัวอย่างต่อเนื่องและลิกนิน (lignin) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส การสลายตัวทั้งหมดจะเสร็จสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส หลังสิ้นสุดขั้นตอนนี้ชีวมวลที่ทำ कारบอไนซ์จะเปลี่ยนเป็นถ่านอย่างสมบูรณ์

2.5.2.3 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์ (refinement)

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้แล้ว ชีวมวลจะเปลี่ยนเป็นถ่านซึ่งจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้วที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ยังมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ต่ำ และยังมีน้ำมันดิน (tar) เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่สูงมาก หากนำไปใช้ประโยชน์จะได้ถ่านคุณภาพต่ำ และถ่านนำไปประกอบอาหารปิ้ง-ย่างน้ำมันดินที่ยังคงค้างอยู่ในถ่าน เมื่อถูกเผาไหม้จะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งเช่น 3.4-benzopyrene และ 1.2.5.6-dibenzanthracene

ดังนั้น ขั้นตอนการทำให้ถ่านบริสุทธิ์ จึงเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยการปรับให้อากาศไหลเข้ามากขึ้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 700 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ให้น้ำมันดินออกไปจากถ่าน

2.5.2.4 การทำให้เย็นตัว (Cooling)

เป็นกระบวนการลดความร้อนของเตา เพื่อนำถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ออกจากเตาเพราะถ่านที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียสสามารถลุกติดไฟเองได้ (spontaneous combustion) ถ้าได้รับออกซิเจนจากอากาศ (นิคม แหลมสัก, 2551)

2.5.3 คุณภาพของถ่าน

คุณภาพของถ่านจะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ

1) ชนิดของชีวมวลที่ทำการคาร์บอนไนซ์ซึ่งชีวมวลเนื้อแข็งจะกลายเป็นถ่านเนื้อแข็ง เช่น ถ่านจากกะลามะพร้าว และชีวมวลเนื้ออ่อนจะกลายเป็นถ่านเนื้ออ่อน เช่น ถ่านจากชานอ้อย

2) ระยะเวลาในการคาร์บอนไนซ์ (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ) การคาร์บอนไนซ์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หรือใช้ระยะเวลาสั้นๆ หรือมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จะได้เนื้อถ่านที่มีความแกร่งน้อย และการคาร์บอนไนซ์ที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ หรือใช้ระยะเวลามากหรือมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ จะได้ถ่านที่มีความแกร่งมาก

ความแกร่ง หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ ซึ่งความแกร่งของถ่านวัดได้จากการทดสอบความแกร่ง (Hardness Tester) โดยมีระดับความแกร่งเป็นสเกลความแข็งของโมห์ (Moh's scale of hardness)

3) การควบคุมอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์มีผลต่อคุณภาพของถ่าน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในชีวมวล หรือ เซลลูโลสและลิกนินจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเหลืออยู่ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อถ่านมาก หรือน้ำหนักของถ่านมาก มีปริมาณน้ำมันดินและก๊าซที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ต่ำ ขณะที่การคาร์บอนไนซ์อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินจะสลายไปเกือบหมด ทำให้ถ่านที่ได้จะมีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อถ่านน้อย หรือน้ำหนักของถ่านน้อย มีปริมาณน้ำมันดินและก๊าซที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์สูง (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2.5.4 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่าน

2.5.4.1 ค่าความร้อน (Calorimetric Value or Heating Value)

ค่าความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หรือเรียกว่าความร้อนของการเผาไหม้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำมีหน่วยเป็นกิโลจูล (KJ) หรือกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของมวล (Kcal/Kg) ซึ่ง 1 กิโลแคลอรี จะมีค่าเท่ากับ 4.2 กิโลจูล (1Kcal=4.2KJ)

1) ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งรวมถึงปริมาณความร้อนแฝงที่ถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำที่เป็นองค์ประกอบของของเสียเกิดการควบแน่น

2) ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เป็นค่าความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝง

ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำที่ตรวจวัดได้ในของมวลชนิดหนึ่งจะแตกต่างกันเสมอโดยค่าความแตกต่างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในชีวมวล ดังนั้น ในกรณีของชีวมวลที่มีความชื้นมากอาจใช้วิธีการตากแดดหรือผึ่งลมเพื่อลดความชื้น แล้วตรวจวัดเฉพาะค่าความร้อนสูงก็ได้ เนื่องจากในระหว่างการผลิตเชื้อเพลิงแท่งนั้นกระบวนการอัดและการตากแห้งแท่งเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้จะทำให้ไอน้ำในชีวมวลถูกกำจัดออกไปบางส่วนและคงเหลือในแท่งเชื้อเพลิงอีกบางส่วน

2.5.4.2 ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Solids)

ปริมาณสารที่ระเหยได้ คือ องค์ประกอบในชีวมวลที่สามารถระเหยได้ เมื่อได้รับความร้อนชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยได้สูงจะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูง ด้วยสารที่ระเหยได้บางชนิดอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำวัสดุเชื้อเพลิงไปใช้งาน เช่น สารอัลคาไลน์ในทะลายนปาล์มจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดท่อน้ำในห้องเผาไหม้ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำลดลง

2.5.4.3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณความชื้น คือ ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากที่ตากแห้งชีวมวล ความชื้นของชีวมวลมีผลต่อค่าความร้อนโดยตรง หากชีวมวลมีความชื้นมากจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ทำให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลง

2.5.4.4 ปริมาณคาร์บอน (Carbon)

ปริมาณคาร์บอน คือ ปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยากโดยจะคงเหลืออยู่ในชีวมวลหลังจากที่เผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งชีวมวลที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน

2.5.4.5 กำมะถันรวม (Total Sulfur)

เมื่อกำมะถันทำปฏิกิริยาสันดาปกับออกซิเจนจะกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนั้นหากชีวมวลที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมากจึงไม่เหมาะสมจะเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากจะเกิดมลสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ในปริมาณมาก

2.5.4.6 เถ้า (Ash)

เถ้า คือ ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาไหม้ ภายในเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้น หากชีวมวลมีเถ้าปริมาณมากจะเป็นปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555)

2.5.4.7 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield)

ร้อยละของผลิตภัณฑ์ คือ การคำนวณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตตามทฤษฎีเป็นร้อยละ 100 แต่ในการผลิตจริง พบว่า โดยปกติปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ตามทฤษฎี จึงมีการคำนวณเพื่อหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

ได้เป็นร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริงกับปริมาณผลิตภัณฑ์ตามทฤษฎี (นรงค์ ฉิมพาลี, 2557)

2.5.5 การใช้ประโยชน์จากถ่าน (Use of Charcoal)

ถ่านมีการใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ แอกติเวทคาร์บอน (Activated Carbon) ถ่านไม้สนสีดำใช้สำหรับฟอกผ้า ถ่านจากกะลามะพร้าวใช้สำหรับดับกลิ่น เป็นต้น

นอกจากนี้ ถ่านยังมีประโยชน์ทางเกษตร เช่น ปรับปรุงสภาพดิน ดูดซับสารเคมีทางการเกษตร ปุ๋ยส่วนเกินและสามารถใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยสัตว์ เช่น ถ่านไม้สนสีดำเมื่อถูกบดเป็นผงแล้วนำไปผสมกับอาหารใช้เลี้ยงสัตว์เพื่อรักษาโรคเกี่ยวกับอวัยวะในการย่อยอาหาร ช่วยในการหมักหญ้าเพื่อใช้เป็นอาหารประโยชน์ในการก่อสร้าง เช่น ควบคุมความชื้นภายในอาคาร และประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น การขจัดกลิ่นของขยะดับกลิ่นภายในตู้เย็น เป็นต้น (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2.6 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแห่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองนั้นมีทฤษฎีที่นำมาใช้อ้างอิงเป็นโดยมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 การออกแบบการทดลองโดยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

ในปี ค.ศ. 1951 G.E.P.Box และ K.B.Wilson ได้คิดค้นพื้นผิวตอบสนองขึ้น โดยการนำความรู้ในด้านต่างๆ มาใช้ร่วมกัน ได้แก่ การวางแผนการทดลอง (Experimental Design) การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) และการสร้างแผนภาพแบบเส้นระดับ เพื่อเป็นเทคนิคทางสถิติอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้แผนภาพแบบเส้นระดับ (Contour Plot) ดังภาพที่ 2.7 ในการตรวจสอบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่สนใจ โดยเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับค่าการตอบสนอง เพื่อแสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังสามารถใช้หาสูตรหรือสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ที่จะทำ

ให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัย หรือสามารถใช้เลือกจุดที่เหมาะสมได้จากผลตอบสนองหลายๆ เมื่อพิจารณาปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมกัน (อนุวัตร แจ่มชัด, 2549)

แต่ในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลโดยใช้พื้นผิวตอบสนองนั้น จำเป็นต้องมีการหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าการตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆ โดยการหาฟังก์ชันต่างๆ เหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบสมการพหุนาม (Polynomial) เช่นลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First Order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second Order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ (Montgomery, 1991) ดังสมการที่ (2.1)

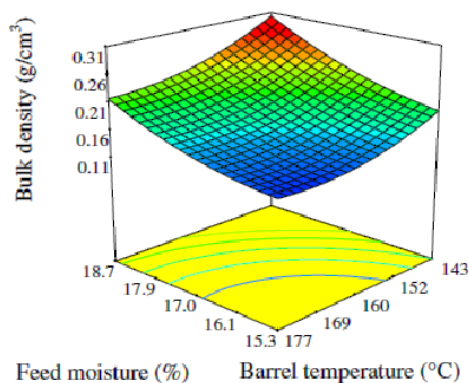
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ	y	คือ	ตัวแปรตามหรือผลตอบสนองของการศึกษา
	$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$	คือ	ค่าพารามิเตอร์
	x_1, x_2, \dots, x_k	คือ	ปัจจัยที่ทำการการศึกษา
	ε	คือ	ค่าคาดเคลื่อนจากการศึกษาผลตอบสนอง

สำหรับลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งจะใช้สมการพหุนามที่มีลำดับสูงขึ้นเช่น ลำดับสองหรือกำลังสองมีความสัมพันธ์กัน (Montgomery, 1991) ดังสมการที่ (2.2)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_{i1} + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_{i2} + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} + \varepsilon \quad (2.2)$$

เมื่อ	y	คือ	ตัวแปรตามหรือผลตอบสนองของการศึกษา
	$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{i < j}$	คือ	ค่าพารามิเตอร์
	$x_1, x_2, \dots, x_{i < j}$	คือ	ปัจจัยที่ทำการการศึกษา
	ε	คือ	ค่าคาดเคลื่อนจากการศึกษาผลตอบสนอง



ภาพที่ 2.7 เส้นระดับและกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Meng และคณะ, 2009)

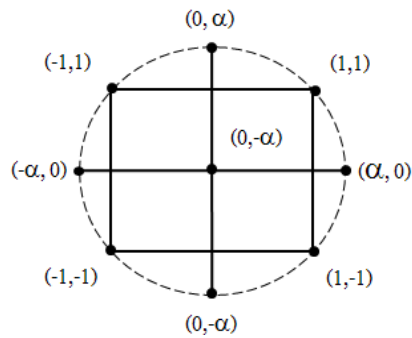
2.6.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมโดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 3 ส่วนดังต่อไปนี้

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

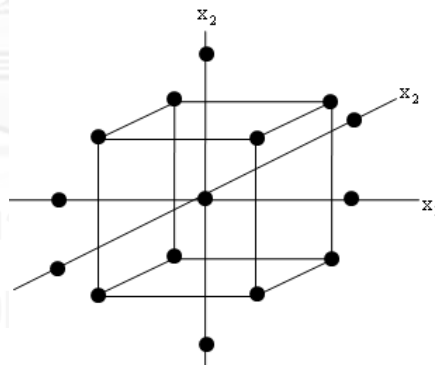
2) ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งคือตำแหน่งที่เป็นแนว $+\alpha$ หรือ $-\alpha$ ในแนวแกนที่เรียกว่า star point $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$

3) ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่งที่เรียกว่า central point (ตำแหน่ง $0,0$) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนของการออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ 2 ปัจจัย (เสาวนีย์ นิลลักษณ์, 2551)

เพราะฉะนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ($k=2$) จะมีจำนวนสิ่งทดลองทั้งสิ้น $2^k + (2k+1) = 2^2 + 5 = 9$ สิ่งทดลอง โดยที่ 2^k จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ $(-1,1)$ $(+1,-1)$ $(+1,+1)$ $(-1,+1)$ และ $(2k+1)$ จะตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 5 ตำแหน่งคือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ $(0, -\alpha)$ และ $(0, 0)$ ดังนั้น กรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีจำนวนสิ่งทดลองทั้งสิ้น 9 สิ่งทดลอง แสดงดังภาพที่ 2.8 หรือกรณีสำหรับจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัว ($k = 3$) จะทำให้การออกแบบ $2^k + (2k+1)$ มี 15 สิ่งทดลองทำให้การทดลองแบบนี้จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ 3 ปัจจัย (เสาวนีย์ นิลลักษณ์, 2551)

2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มเป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วยสำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าข้อมูลแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมาก หรือ กระจายน้อยค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน (พลวริน พลยั้ง, 2551)

2.8 แบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่ คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (2β) มีค่าน้อยที่สุดซึ่งบางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (พลวริน พลยั้ง, 2551) โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

- 1) สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดโดยการคงค่าผลตอบสนอง
- 2) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
- 3) นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง

2.8.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง

เนื่องจากการออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) มีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ (ปารเมศ ชุตินา, 2545) ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยจึงมีทั้งหมด 3 แบบดังนี้

1) Linear Model ดังสมการที่ (2.3)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i \quad (2.3)$$

เมื่อ $E(y)$ คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นของผลตอบสนองของการศึกษา
 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ คือ ค่าพารามิเตอร์
 x_1, x_2, \dots, x_p คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษา

2) 2FI (two-factor interaction) Model ดังสมการที่ (2.4)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.4)$$

เมื่อ $E(y)$ คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นของผลตอบสนองของการศึกษา
 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ คือ ค่าพารามิเตอร์
 x_1, x_2, \dots, x_p คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษา

3) Quadratic Model ดังสมการที่ (2.5)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ $E(y)$ คือ การแจกแจงความน่าจะเป็นของผลตอบสนองของการศึกษา
 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ คือ ค่าพารามิเตอร์
 x_1, x_2, \dots, x_p คือ ปัจจัยที่ทำการศึกษา

2.8.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

2.8.2.1 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบซึ่งพิจารณาจากค่า P-value ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แบบจำลองการถดถอยและสมมติฐานที่ใช้สำหรับการออกแบบส่วนประสมกลาง

แบบจำลองการถดถอย	สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ
Linear	$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ $H_1 : \text{At least one equality is false}$
2FI (Two-Factor Interaction Terms)	$H_0 : \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = 0$ $H_1 : \text{At least one equality is false}$
Quadratic	$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta, \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = 0$ $H_1 : \text{At least one equality is false}$

พิจารณาจากค่า P-value

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

ถ้า $P\text{-value} < 0.05$: จะปฏิเสธ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบสนอง

2.8.2.2 ทดสอบ Lack of Fit

เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบ คือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

พิจารณาจากค่า P-value

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

ถ้า $P\text{-value} < 0.05$: จะปฏิเสธ H_0 หมายความว่า แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

2.8.2.3 วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองพิจารณาค่าดังต่อไปนี้

1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนอง (Y) รอบเส้นถดถอย (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.6)

$$\text{Std.Dev.} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\text{SSE}}{n-2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	Std. Dev.	คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า
	MSE	คือ ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
	SSE	คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความคลาดเคลื่อน
	n	คือ จำนวนข้อมูล

2) R-Squared (R^2) หรือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือ ค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนอง หรืออีกนัยหนึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้นั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไรกล่าว คือ ถ้า R^2 มีค่ามากแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้นั้น มีความเหมาะสมกับข้อมูลมาก (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.7)

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}} ; 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ	R^2	คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
	SSE	คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน
	SST	คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมดของผลตอบสนอง

3) Adjusted R-Squared ($Adj-R^2$) หรือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า เนื่องจากข้อเสียของ R^2 คือ เมื่อจำนวนปัจจัยในแบบจำลองการถดถอยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มของจำนวนปัจจัยในแบบจำลองการถดถอยนั้นไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้จะมีความเหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว นักสถิติจึงปรับค่า R^2 สำหรับปัจจัยหลายๆ ปัจจัยด้วยการนำ Degree of freedom มาร่วมพิจารณาและเรียกค่า R^2 ที่มีการปรับค่าใหม่ว่า $Adj-R^2$ (วิรัชชพานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.8)

$$Adj-R^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{SST / (n - 1)}; 0 \leq Adj-R^2 \leq 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ	$Adj-R^2$	คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับค่า
	SSE	คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน
	SST	คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมดของผลตอบสนอง
	n	คือ จำนวนข้อมูล

4) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้ มีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ โดยที่แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น (วิรัชชพานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.9)

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1 - h_{ii}} \right)^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ	PRESS	คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก
	e_i	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสังเกต
	h_{ii}	คือ ค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i (คำนวณจากข้อมูล n ค่า)

5) Predicted R-Squared (Pred-R²) หรือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จากการทำนาย คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (วิรัช พานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.10)

$$\text{Pred-R}^2 = 1 - \frac{\text{PRESS}}{\text{SS}_{\text{total}}} \quad (2.10)$$

เมื่อ	Pred-R ²	คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้จากการทำนาย
	PRESS	คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก
	SS _{total}	คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมดของผลตอบสนอง

2.8.3 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก

เป็นการตรวจสอบว่าปัจจัยที่ศึกษาปัจจัยใดบ้างที่อยู่ในรูปแบบจำลองถดถอยที่เลือกไว้ และมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

พิจารณาค่า P-value

ถ้า P-value ≥ 0.05 : ยอมรับ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง

ถ้า P-value < 0.05 : ปฏิเสธ H_0 หมายความว่าปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง

กรณีที่ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองให้ตัดปัจจัยที่ศึกษานั้นออกจากแบบจำลองการถดถอย แล้วทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองการถดถอยใหม่แต่ทั้งนี้ ต้องพิจารณาค่า P-value ร่วมกับค่า VIF (Variance Inflation Factor) ด้วย

กล่าวคือ ถ้า $P\text{-value} \geq \alpha$ ขณะที่ ค่า $VIF \leq 5$ ไม่จำเป็นต้องตัดปัจจัยที่ศึกษานั้นๆ ออกจากแบบจำลองการถดถอย แต่ถ้า $VIF \geq 5$ แสดงว่าปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยอื่นจนไม่นำมาพิจารณา (ผ่องศรี เกียรติเลิศนภา, 2553)

2.8.4 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย(Diagnostics)

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาจากข้อมูลต่อไปนี้

2.8.4.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยโดยอาศัยค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกต Y_i และค่าประมาณ \hat{Y}_i บนเส้นถดถอย (Fitted or Predicted value) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546) ดังสมการที่ (2.11)

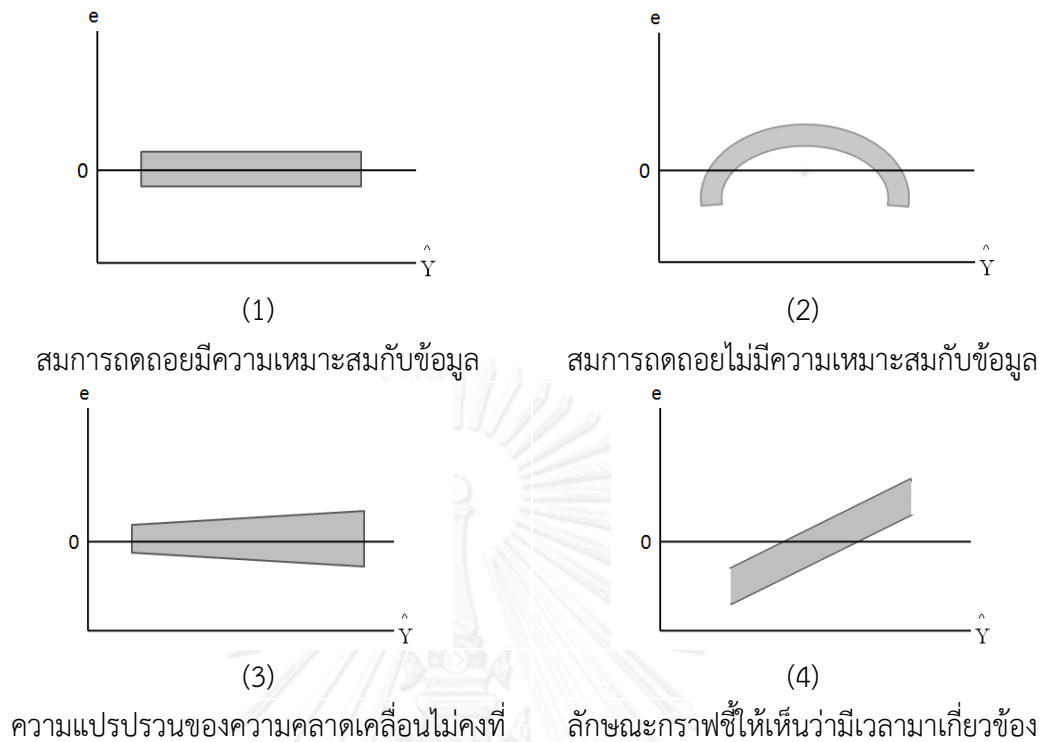
$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

เมื่อ	e_i	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสังเกต
	Y_i	คือ ค่าสังเกต
	\hat{Y}_i	คือ ค่าประมาณ Y_i บนเส้นถดถอย

โดยที่การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย มีสองวิธีคือ

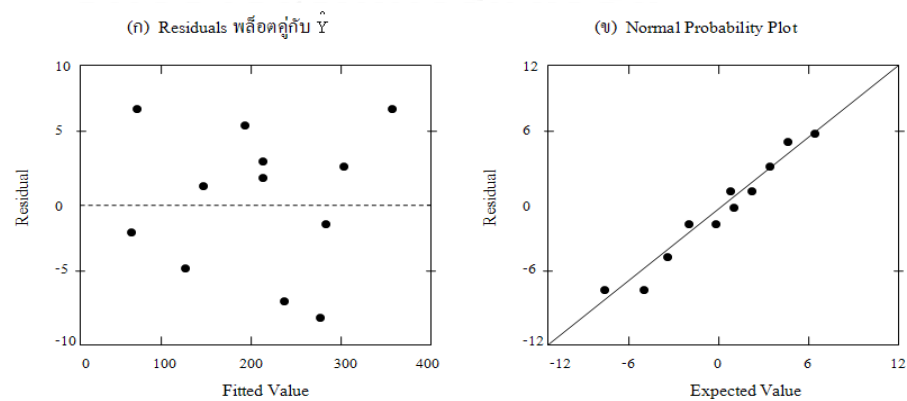
1) วิเคราะห์กราฟของส่วนตกค้าง ดังภาพที่ 2.10 ได้แก่ Residual Plots ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงภาพกระจายของ Residuals คู่กับ

- 1.1) ค่าประมาณบนเส้นถดถอย (fitted value) \hat{Y}_i
- 1.2) ปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ X)
- 1.3) เวลาที่เกิดค่าสังเกต



ภาพที่ 2.10 รูปร่างของ Residual Plots (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546)

2) วิธีวิเคราะห์กราฟของความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plots) เป็นการพล็อตแผนภาพกระจายของ Residuals ที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected values) ถ้าแผนภาพกระจาย ที่ได้มีรูปร่างใกล้เคียงเส้นตรงแสดงว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 Residual Plots และ Normal Probability Plots ที่แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546)

2.8.4.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

เป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพล (Influential observation) ที่มีผลกระทบต่อการประมาณสมการถดถอยโดยค่าสังเกตที่เป็นค่าสุดขีด (extreme value) สำหรับปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ X) เรียกว่าจุด high leverage เมื่อค่า h_{ii} หรือค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i (วิรัช พานิชวงค์, 2546) ดังสมการที่ (2.12)

$$h_{ii} = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.12)$$

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

จากสมการถ้า x_i มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ย (\bar{x}) มากจะทำให้ ค่า h_{ii} มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ถ้าค่า $h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$ เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอย ($p = k + 1$ เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย) และ n คือ จำนวนการทดลองสามารถพิจารณาได้ว่าค่า h_{ii} ดังกล่าวเป็นค่า ผิดปกติสำหรับปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ X) และเป็นจุด high leverage

2.8.4.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริง เบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าไร เพื่อหาส่วนตกค้างที่มีค่ามากกว่าค่าอื่น (Outlier) จะพิจารณาค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองได้จากค่าสถิติดังนี้

1) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ i (Standardized residual), d_i หรือเรียกว่า Outlier (วิรัช พานิชวงค์, 2546) ดังสมการที่ (2.13)

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\text{MSE}}} \quad (2.13)$$

เมื่อ	d_i	คือ ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ i
	e_i	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสังเกต
	MSE	คือ ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

2) ความคลาดเคลื่อนปรับแล้วที่ i (Studentized residual), r_i (วีรัชช พานิชวงค์, 2546) ดังสมการที่ (2.14)

$$r_i = \frac{e_i}{\sqrt{\sigma^2 (1-h_{ii})}} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

เมื่อ	r_i	คือ ความคลาดเคลื่อนปรับแล้วที่ i
	e_i	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าสังเกต
	σ	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	h_{ii}	คือ ค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i (คำนวณจากข้อมูล n ค่า)

ค่าสถิติ d_i และ r_i ต่างมีการแจกแจงแบบ t ที่องศาแห่งความอิสระ $n-k-1$ ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาว่าค่าสังเกตที่สงสัยเป็นค่าที่ผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองหรือไม่ พิจารณาจากช่วงกำหนดควบคุม $|d_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ หรือ $|r_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ หากค่า d_i มากกว่าช่วงกำหนดควบคุมจะถือว่าข้อมูลนั้นๆ เป็นค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

2.8.4.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

ค่าที่มีอิทธิพลเป็นค่าผิดปกติที่มีผลทำให้เส้นการถดถอยเบี่ยงเบนไปจากกรณีปกติ หรือกรณีที่ไม่มีค่าที่มีอิทธิพล ค่าที่มีอิทธิพลที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่คำนวณได้เปลี่ยนไปดังนั้นหากทราบว่าค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา หรือค่าจากผลตอบสนองควรพิจารณาต่อไปว่าค่าผิดปกตินั้นเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่ อย่างไรก็ตามค่าผิดปกติอาจจะเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่ก็ได้เพื่อให้การตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพลถูกต้องยิ่งขึ้นพิจารณาจากค่า Cook's Distance D_i (วีรัชช พานิชวงค์, 2546) ดังสมการที่ (2.15)

$$D_i = \frac{e_i^2}{(k+1)\text{MSE}} \left(\frac{h_{ii}}{(1-h_{ii})^2} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ	k	คือ จำนวนตัวแปรอิสระ
	MSE	คือ ความแปรปรวนของการประมาณค่า
	h_{ii}	คือค่า leverage ของค่าสังเกตที่ i (คำนวณจากข้อมูล n ค่า)

ถ้า $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอยพิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพลหรืออาจพิจารณาจากถ้า $D_i > 1$ แสดงว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล

2.9 พิจารณาพื้นผิวตอบสนอง และทดสอบเพื่อยืนยันผล

เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม โดยนำสมการถดถอยมาหาค่าหรือสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวตอบสนอง ภายใต้เงื่อนไขหรือขอบเขตที่กำหนดไว้ซึ่งจะได้แผนในการกำหนดปัจจัยสำหรับทำการทดลอง (Run) จากนั้นนำแผนที่ได้มาทำการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะได้คำตอบจากการทดลองหรือค่าตัวแปรอิสระ (Response Variable) และทำการพิสูจน์สมการถดถอยโดยใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของคำตอบเพื่อนำไปทดลองอีกครั้ง แล้วทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อหาค่าความแตกต่างของคำตอบที่ได้จากการทดสอบจริง และคำตอบที่ได้จากการทำนาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการแบบใหม่

2.10 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

วิธีการคำนวณราคาต้นทุนในการผลิต ประกอบด้วย

- 1) ต้นทุนคงที่หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น

2) ต้นทุนแปรผันหมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่นค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์การผลิตและค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

ทั้งนี้จะประเมินเป็นราคาต้นทุนต่อกิโลกรัมของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จุฑามาศ บุชราคัมวดี (2547) ศึกษาสมบัติถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังโดยอ้างอิงถึงแหล่งวัตถุดิบ ขนาดผง และอัตราส่วนตัวประสาน โดยมีแหล่งวัตถุดิบ 3 แหล่ง คือ โรงงานมันเส้น โรงงานแป้งมันสำปะหลัง และแปลงปลูก อัตราส่วนตัวประสานระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำ 3 อัตราส่วน คือ 0.1:0.9 0.2:0.8 และ 0.3:0.7 ขนาดผงผ่านตะแกรง 3 ขนาด คือ 5 10 และ 15 มิลลิเมตร พบว่า ถ่านเหง้ามันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม จากโรงงานมันเส้น ขนาดผง 10 มิลลิเมตร เมื่อผสมตัวประสานอัตราส่วน 0.1:0.9 มีสมบัติดีที่สุด โดยมีค่าความร้อน 6,281.08 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ 417 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ศิรินุช จินดารักษ์ และคณะ (2548) ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเขียวจากฟางข้าวและซังข้าวโพดโดยการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างฟางข้าวกับซังข้าวโพดที่ใช้กาวแป้งมันเป็นตัวเชื่อมประสานมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงเขียวในอัตราส่วน 10:0 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 พบว่ามีค่าความร้อนเฉลี่ยคือ 4,216 4,444 4,753 4,953 5,252 และ 5,802 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมตามลำดับค่าความร้อนเชื้อเพลิงเขียวตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 6:4 และ 5:5

ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก คือ อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดเป็น 1:1.5 อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 68 นาที ให้ค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 1331.82 m²/g ค่าการดูดซับไอโอดีน 580.32 mg/g ร้อยละผลได้เท่ากับ 52.29 และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ คือ เวลาในการคาร์บอน 45 นาที อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 68 นาที สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้พื้นที่ผิว 978.03 m²/g ค่าการดูดซับไอโอดีน 645.73 mg/g ร้อยละผลได้เท่ากับ 44.88

วานิช โสภาสพ และคณะ (2550) ศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งด้วยเศษวัสดุเหลือใช้เพื่อเป็นพลังงานทดแทน โดยผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกถั่วลิสง เปลือกเมล็ดทานตะวัน และเปลือกถั่วลิสงผสมเปลือกเมล็ดทานตะวัน อัดแท่งด้วยเครื่องอัดขดลวดแบบเกลียวความร้อน พบว่า คุณสมบัติของเปลือกถั่วลิสงอัดแท่งมีปริมาณสารระเหยน้อยที่สุดคือร้อยละ 69 และเปลือกเมล็ดทานตะวันอัดแท่งมีปริมาณถ่านน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 2.6 และพบว่าเปลือกเมล็ดทานตะวันอัดแท่งมีค่าความร้อนมากที่สุดคือ 4,730 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ (2551) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมขี้ข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน โดยมีสัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30:70 40:60 และ 50:50 ตามลำดับ สัดส่วนการผสมแป้งมันต่อน้ำหนักวัตถุดิบ เท่ากับ 1:10 พบว่าค่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงกด จะแปรผันตามสัดส่วนการผสมของผงขี้ข้าวโพดและผงกะลามะพร้าว มีค่าความร้อนโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6,000-6,900 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

วันทนา สังข์ชุม และคณะ (2552) ศึกษาการผลิตถ่านจากเปลือกไม้เทียมโดยมีแป้งมันเป็นตัวประสานในอัตราส่วนผงถ่าน 5 กิโลกรัมต่อน้ำ 1.5 ลิตรต่อแป้งมันสำปะหลัง 800 กรัมและอัดโดยการอัดแบบเย็นพบว่าถ่านที่ผลิตได้จากเปลือกไม้เทียมมีความชื้นและปริมาณถ่านมีค่าร้อยละ 7.0 และ 8.1 ตามลำดับซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานชุมชนถ่านอัดแท่งและให้ค่าความร้อน 5,014 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมซึ่งสูงกว่ามาตรฐานชุมชน (5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)

พิลาณี ไวถนอมสัตย์ พิชชาภัทร์ กุลมา และคณะ (2554) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Remazol Brilliant Blue R (RBBR) ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนและถ่านกัมมันต์ทางการค้าด้วยวิธีการหาพื้นผิวการตอบสนอง พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมและความเร็วรอบในการปั่นกวนมีผลต่อการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p น้อยกว่า 0.05) สามารถดูดซับสีย้อม RBBR ได้ร้อยละ 96.42 ในขณะที่ทุกปัจจัยมีผลต่อการดูดซับสีย้อม RBBR ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ สามารถดูดซับสีย้อมได้ร้อยละ 97.33 และพบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีประสิทธิภาพดีกว่าถ่านกัมมันต์จากไม้สน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวมากกว่า และ ตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีสมการการดูดซับเป็นแบบฟรุนดลิช

อัจฉริยะ โชติพันธ์ (2555) ศึกษาอิทธิพลของการปิดเตาผลิตถ่าน ที่อุณหภูมิการผลิตต่างกัน ต่อสมบัติของถ่านที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส โดยเก็บตัวอย่างถ่านแยกเป็น 2 ชั้น คือ ถ่านชั้นบน วัดลึกลงจากกองถ่าน 10 เซนติเมตร และ ถ่านชั้นล่าง วัดจากพื้นล่างกองถ่าน 10 เซนติเมตร โดยถ่านผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสคามาเลกุลเลนซิส พบว่า ในถ่านชั้นบนและถ่านชั้นล่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณถ่านคงตัวและค่าความร้อนจะสูงขึ้นขณะที่ปริมาณสารระเหยและปริมาณเถ้าจะน้อยลง โดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ถ่านชั้นบนและถ่านชั้นล่างจะมีค่าความร้อนสูงสุด คือ 7,314 และ 7,248 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

เกรียงไกร วงศาโรจน์ (2553) ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากต้นสบู่ดำ โดยใช้ลำต้นและกิ่งของสบู่ดำผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด ในอัตราส่วน 70:10 65:20 55:30 45:40 70:10 60:20 50:30 และ 40:40 ใช้ตัวประสาน 2 ชนิด คือ แป้งเปียกและกากน้ำตาล อัตราส่วนการผสมวัตถุดิบต่อตัวประสานคือ 80:15 และ 85:20 พบว่า ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสบู่ดำ ที่อัตราส่วนผสมเดียวกันแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน และสัดส่วนการผสมระหว่างสบู่ดำต่อซังข้าวโพดต่อแป้งเปียกเป็น 75:10:15 เป็นสัดส่วนที่ได้ค่าความร้อนสูงสุด 3,668 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

ชมธิตา ชื่นนิยม (2553) ศึกษาการเพิ่มมูลค่าเพิ่มของเศษซังข้าวโพดโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยนำเศษซังข้าวโพดมาผสมกับตัวประสาน 4 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล กากของเสียจากโรงงานกระดาษ และน้ำมันเครื่องใช้แล้ว ในสัดส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 แล้วนำไปอัดแท่งโดยการอัดเย็นแบบเกลียว พบว่า การอัดแท่งเศษซังข้าวโพดที่มีสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 50 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากอัดง่าย มีความแข็งแรงสูง ใช้เวลาในการจุดติดไฟต่ำ และมีค่าความร้อน 4,215.82 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

น้องกุ้ง จันทสิทธิ์ และคณะ (2553) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา 3 สูตร คือ อัตราส่วนผสมของอ้อย แกลบ และผักตบชวา 4:0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของกะลา แกลบ ผักตบชวา และแป้งมัน 3:0.5:6:0.5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนผสมของกะลา อ้อย แกลบ ผักตบชวา และแป้งมัน 2:2:0.5:5:0.5 โดยใช้การผลิตแบบอัดเย็นและใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน พบว่า อัตราส่วนผสมทั้ง 3 สูตรให้ค่าความร้อนผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งชุมชน 5,397.30 5,332.65 และ 5,278.90 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมตามลำดับ แต่สูตรที่ 2 มีข้อ

ได้เปรียบทางคุณสมบัติความสม่ำเสมอของไฟการแตกปะทุวันกลืนรอยแตกร้าของถ่านอัดแท่งที่ ดีกว่าสูตร 1 และสูตร 3

จุฬารัตน์ ชาวกำแพง (2554) ศึกษาการพัฒนาถ่านอัดแท่งจากวัสดุเกษตรเพื่ออุตสาหกรรม ในครัวเรือนโดยมีอัตราส่วนผสมของผงถ่านคือ ผงถ่านหังน้ำมันสำปะหลัง (ร้อยละ 100) ผงถ่านไม้รวม (ร้อยละ 100) ผงถ่านหังน้ำมันสำปะหลัง: ผงถ่านกะลามะพร้าว (ร้อยละ 75:25) ผงถ่านหังน้ำมัน สำปะหลัง: ผงถ่านกะลามะพร้าว (ร้อยละ 50:50) ผงถ่านไม้รวม: ผงถ่านกะลามะพร้าว (ร้อยละ 75:25) และผงถ่านไม้รวม: ผงถ่านกะลามะพร้าว (ร้อยละ 50:50) พบว่า อัตราส่วนผงถ่านหังน้ำมัน สำปะหลัง: ผงถ่านกะลามะพร้าวร้อยละ 50:50 ผงถ่านไม้รวม: ผงถ่านกะลามะพร้าวร้อยละ 75:25 และผงถ่านไม้รวม: ผงถ่านกะลามะพร้าวร้อยละ 50:50 มีค่าความร้อนมากกว่า 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

บัญญัติ โลจันนท์ และคณะ (2554) ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิง แข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ โดยนำแท่งเชื้อเพลิงจากไมยราบยักษ์มาผ่านการคาร์บอนไนซ์ มีแป้งมัน สำปะหลังเป็นตัวประสาน พบว่า แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้นร้อยละ 15-36 หลังจากผ่านการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดที่ 5,432 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม

พรเทพ หอมผกา (2555) ศึกษาการพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกระดาษสำนักงานและมวลชีวภาพ โดยนำกระดาษเหลือใช้ในสำนักงานและเศษวัชพืชมาผสมในอัตราส่วน 40:60 20:80 50:50 และ 80:20 มีแป้งมันเป็นตัวประสาน และใช้การอัดแบบเย็น พบว่า ถ่านอัดแท่งที่ผสมในอัตราส่วน 40:60 มีค่าความร้อนสูงสุดที่ 5,350 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ (2556) ศึกษาศักยภาพของลำต้นข้าวโพดมาเป็นเชื้อเพลิงเขียว โดยนำลำต้นข้าวโพดมาทำการอัดแบบเปียก ใช้น้ำเป็นตัวประสาน พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากต้นข้าวโพดมีค่าความร้อน 1,724.55 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

Blesa และคณะ (2001) ศึกษาผลของการไพโรไลซิสทางเคมีกายภาพและกระบวนการผลิต ถ่านไร้ควันจากผงถ่านผสมซีลี้อย่าง ฟาง เปลือกผลมะกอก และเปลือกอัลมอนด์ โดยทำการไพโรไลซิสของถ่านเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 500 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่าการทำไพโรไลซิสถ่านไร้ควันจากซีลี้อย่าง ฟาง เปลือกผลมะกอก และเปลือกอัลมอนด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีการปล่อยสารประกอบซัลเฟอร์น้อยที่สุด คือร้อยละ 0 ร้อยละ 0.6 ร้อยละ 0.2 และร้อยละ 0.2 ตามลำดับ

และมีการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยได้น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 9.4 ร้อยละ 8.5 ร้อยละ 12.9 และร้อยละ 9.5 ตามลำดับ ขณะที่มีความพลังงานความร้อนสูงสุด คือ 7,260 6,592 7,643 และ 8,168 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Yaman และคณะ (2001) ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากชีวมวลผสมลิกไนต์โดยศึกษาแท่งเชื้อเพลิงจากชีวมวลของเปลือกต้นสน เปลือกผลมะกอก ขี้เลื่อย เศษวัสดุจากโรงงานกระดาษ และเศษวัสดุจากโรงงานฝ้าย ซึ่งใช้แรงอัดขนาด 50 และ 250 เมกะปาสคาล มีสัดส่วนของการผสมลิกไนต์ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก พบว่า สัดส่วนระหว่างชีวมวลต่อลิกไนต์และแรงอัดที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อความคงทนของแท่งเชื้อเพลิง และแท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความพลังงานความร้อน คือ 4,323 5,111 3,988 3,104 และ 4,179 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมตามลำดับ

Husain และคณะ (2002) ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากเม็ดปาล์มที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยแท่งเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 50 และ 60 มิลลิเมตร ใช้แรงอัด 5-13.5 เมกะปาสคาลจากเครื่องอัดไฮดรอลิก พบว่า เมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้นแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ขนาดจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงอัด โดยที่ขนาดของแท่งเชื้อเพลิงเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 50 และ 60 มิลลิเมตรมีความหนาแน่นลดลงตามลำดับ เมื่อมีขนาดแรงอัดที่เท่ากัน

Oladeji (2010) ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งระหว่างซังข้าวโพดและแกลบ พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากซังข้าวโพดมีความร้อน 4,992.83 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีความทนแรงอัด 0.234 เมกะปาสคาล ขณะที่เชื้อเพลิงอัดแท่งจากแกลบมีความร้อน 3,200.05 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีความทนแรงอัด 0.107 เมกะปาสคาล

Yumak และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากsoda weed (*Salsola tragus*) โดยมีความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 7 ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 13อัดแท่งเป็นรูปทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยมภายใต้แรงอัด 3 ระดับ คือ 15.7 19.6 และ 31.4 เมกะปาสคาล พบว่า ค่าความชื้นที่ ร้อยละ 7-10 แรงอัด 31.4 เมกะปาสคาล และรูปทรงกระบอกให้ความคงทนของแท่งเชื้อเพลิงมากที่สุด

Oladeji (2011) ศึกษาการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากข้าวโพดสองสายพันธุ์ (white and yellow maize) พบว่า ค่าความร้อนต่ำและสูงของถ่านจากซังข้าวโพดสายพันธุ์ขาว มีค่า 4,049.95 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมและ 4,626.2กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความ

ร้อนต่ำและสูงของถ่านจากซังข้าวโพดสายพันธุ์เหลือง มีค่า 4,167.78 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และ 4,992.83 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Oladeji (2012) ศึกษาการเปรียบเทียบของคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรบางชนิดในประเทศไนจีเรีย คือ ซังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง แดงโม เปลือกมันสำปะหลัง และเปลือกมันเทศ พบว่าค่าความร้อนคำนวณของถ่านอัดแท่งจาก ซังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง แดงโม เปลือกมันสำปะหลัง และเปลือกมันเทศ เป็น 4,992.83 4,453.63 5,231.12 3,050.91 และ 4,146.27 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมตามลำดับ

Angin (2013) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสของถ่านจากเปลือกเมล็ดดอกคำฝอย พบว่า การไพโรไลซิสถ่านจากเปลือกเมล็ดดอกคำฝอยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด ร้อยละ 80.70 มีค่าความร้อน 7,215.53 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีสารอินทรีย์ระเหยได้ต่ำร้อยละ 9.80

โดยสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	การคาร์บอนไนซ์	ค่าความทนแรงอัด (MPa)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
จุฑามาศ บุษราคัมวดี (2547)	เหง้ามันสำปะหลัง		มีการคาร์บอนไนซ์	0.409	6,281.08
ศิรินุช จินดารักษ์ และคณะ(2548)	ฟางข้าวและซังข้าวโพด	5:5 (ฟางข้าวต่อซังข้าวโพด)	ไม่มีการคาร์บอนไนซ์		5,802
วานิช โสภาสพ และคณะ(2550)	-เปลือกถั่วลิสง - เปลือกเมล็ดทานตะวัน - เปลือกถั่วลิสงผสมเปลือกเมล็ดทานตะวัน	ถ่านจากเปลือกเมล็ดทานตะวัน	มีการคาร์บอนไนซ์		4,730

ตารางที่ 2.9 (ต่อ) สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	การคาร์บอนไนซ์	ค่าความทนแรงอัด (MPa)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ(2551)	-ซีเมนต์แกลบผสมซังข้าวโพด - ซีเมนต์แกลบผสมกะลามะพร้าว		มีการคาร์บอนไนซ์	1.07-1.23	6,000-6,900
วันทนา สังข์ชุม และคณะ(2552)	เปลือกไม้เทียม แบริ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน	5:1.5:0.8 (ผงถ่านต่อน้ำต่อตัวประสาน)	มีการคาร์บอนไนซ์		5,014
อัจฉริยะ โชติพันธ์ (2555)	ไม้ยูคาลิปตัส	ถ่านชั้นบนและถ่านชั้นล่าง	มีการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส		7,314 และ 7,248
เกรียงไกร วงศาโรจน์ (2553)	สับุดำผสมกับแกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด	7.5:10:15 (สับุดำต่อซังข้าวโพดต่อแบริ่งเปียก)	ไม่มีการคาร์บอนไนซ์		3,668
ชมธิตา ชื่นนิยม (2553)	ซังข้าวโพด	5:5 (ซังข้าวโพดต่อแบริ่งมันสำปะหลัง)	ไม่มีการคาร์บอนไนซ์		4,215.82
น้องกุ้ง จันทสิทธิ์ และคณะ(2553)	-ผักตบชวาผสมอ้อยและแกลบ -ผักตบชวาผสมกะลาแกลบ และแบริ่งมัน - ผักตบชวาผสมกะลาอ้อย แกลบและแบริ่งมัน	4:0.5:0.5 3:0.5:6:0.5 2:2:0.5:5:0.5	ไม่มีการคาร์บอนไนซ์		5,397.3 5,332.65 5,278.9

ตารางที่ 2.9 (ต่อ) สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	การคาร์บอน	ค่าความทนแรงอัด (MPa)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
จุฬารัตน์ ชาวกำแพง (2554)	-ผงถ่านหุงต้ม สำหรับผสมผงถ่าน กะลามะพร้าว - ผงถ่านไม้รวมผสมผง ถ่านกะลามะพร้าว - ผงถ่านไม้รวมผสมผง ถ่านกะลามะพร้าว	5:5 7.5:2.5 5:5	มีการคาร์บอน		>5,000
บัญญัติ โลจันนท์ และคณะ(2554)	ไมยราบยักษ์		มีการคาร์บอน		5,432
พรเทพ หอมผกา (2555)	กระดาษสำนักงาน และมวลชีวภาพ	4:6	ไม่มีการคาร์บอน		5,350
พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ(2556)	ลำต้นข้าวโพด น้ำเป็นตัวประสาน		ไม่มีการคาร์บอน		1,724.55
Blesa และคณะ(2001)	ผงถ่านผสมชีวมวล - ชี้อ้อย - ฟาง - เปลือกผลมะกอก - เปลือกอัลมอนต์		มีการคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส		7,260 6,592 7,643 8,168
Yaman และคณะ(2001)	ลิกไนต์ผสมชีวมวล - เปลือกต้นสน - เปลือกผลมะกอก - ชี้อ้อย - เศษวัสดุจากโรงงาน กระดาษ - เศษวัสดุจากโรงงาน ฝ้าย		ไม่มีการคาร์บอน	6 5 9 15 16	4,323 5,111 3,988 3,104 4,179
Oladeji (2010)	- ชั่งข้าวโพด - แกลบ		ไม่มีการคาร์บอน	0.234 0.107	4,992.83 3,200.05

ตารางที่ 2.9 (ต่อ) สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	การคาร์บอน	ค่าความทนแรงอัด (MPa)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
Oladeji (2011)	- ข้าวโพดสายพันธุ์ขาว - ข้าวโพดสายพันธุ์เหลือง		ไม่มีการคาร์บอน		4,626.2 4,992.83
Oladeji (2012)	- ชั่งข้าวโพด - เปลือกถั่วลิสง - แดงโม - เปลือกมันสำปะหลัง - เปลือกมันเทศ		ไม่มีการคาร์บอน		4,992.83 4,453.63 5,231.12 3,050.91 4,146.27
Angin (2013)	เปลือกเมล็ดดอกคำฝอย		มีการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส		7,215.53

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ทำการทดลองที่ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และคณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

3.2 แผนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้เมื่อศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนของเทคนิคทางสถิติแล้วจึงทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ได้แก่

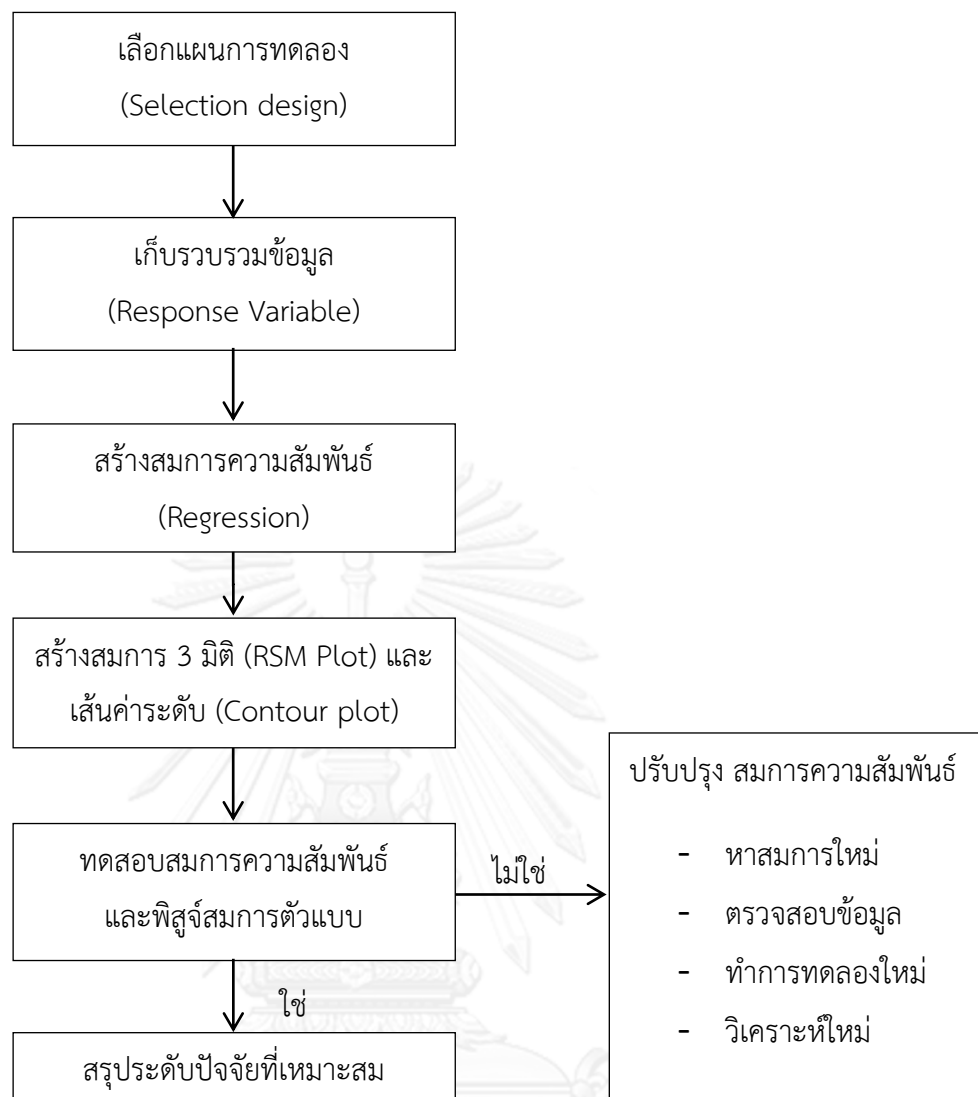
ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

หลังจากศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแล้วจึงทำการประเมินราคาต้นทุนการผลิตของแท่งเชื้อเพลิง

3.2.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ดังนี้

- 1) เลือกแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)
- 2) ทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง และรวบรวมข้อมูล (Response Variable)
- 3) สร้างสมการตัวแบบ (Model) จากวิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression)
- 4) สร้างแบบจำลองแผนภาพ 3 มิติ (RSM Plot) และเส้นค่าระดับ (Contour plot)
- 5) ตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสม (Optimization) จากแผนภาพ 3 มิติ (RSM Plot) และเส้นค่าระดับ (Contour Plot)
- 6) พิสูจน์สมการตัวแบบ (recheck)
- 7) เปรียบเทียบค่าที่สังเกตจากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการตัวแบบ
- 8) สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง (ดังภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวិธีการพื้นผิวตอบสนอง
(Response surface methodology; RSM)

3.2.2 ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงดังนี้

1) ศึกษาสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสาน ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) สูง ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

2) การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)

3) วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบหาค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) และค่าความหนาแน่น (Density) แล้วเลือกสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยค่าความทนแรงอัดเป็นเกณฑ์การตัดสินใจ

4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (recheck) โดยการทดลองซ้ำและกำหนดช่วงสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระหว่างค่าความทนแรงอัดจากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย

5) สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

3.2.3 ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

1) นำแท่งเชื้อเพลิงจากผลการวิจัยในข้อ 3.2.2 มาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ คือ อุณหภูมิ และเวลา ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน (Heating Value) และร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) สูงด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

2) กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงตามผลการศึกษาข้อ 1)

3) วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี คือ ค่าความร้อน (Heating Value) ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids) และปริมาณคาร์บอน (Carbon)

4) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (recheck) และทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

5) สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องอัดรีด
- 2) เครื่องบดย่อย
- 3) เครื่องวัดค่าความร้อน (Automatic Bomb Calorimeter)
- 4) เครื่อง Universal Testing Machine Dartec รุ่น M1000/RF-2
- 5) ตู้อบ (Drying oven)
- 6) เตาเผา (Muffle furnace)
- 7) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 8) เครื่องให้ความร้อน (Hotplate)
- 9) เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง
- 10) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 11) ถ้วยกระเบื้อง (Crucible) พร้อมฝาปิด
- 12) หม้อดินเผา พร้อมฝาปิด
- 13) อุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น เช่น ไฟแช็ค กรรไกร เป็นต้น

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ดังนี้

1) ศึกษาช่วงปัจจัยที่เหมาะสมในการนำมาศึกษาด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) คือ ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสาน

2) เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม การศึกษานี้เลือกแผนการทดลองแบบ Factorial design ด้วยวิธี Central Composite Designs (CCD) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้จำนวนแบบการทดลอง (Run) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

3) ทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ได้จาก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง และรวบรวมข้อมูล (Response Variable)

4) สร้างสมการตัวแบบ (Model) จากวิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression)

5) สร้างแบบจำลองแผนภาพ 3 มิติ (RSM Plot) และเส้นระดับ (Contour Plot)

6) ตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสม (Optimization) จากแผนภาพ 3 มิติ (RSM Plot) และเส้นระดับ (Contour Plot)

7) พิสูจน์สมการตัวแบบ โดยการใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ (Response Variable) เพื่อนำไปทดลองอีกครั้ง และวัดค่าตัวแปรตามเพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการ

8) เปรียบเทียบค่าที่สังเกตจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการตัวแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการแบบใหม่

9) สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

3.4.2 ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อความความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

3.4.2.1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิง จากต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสาน ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) สูงซึ่งมีจำนวนแบบการทดลอง (Run) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ทั้งสิ้น 20 การทดลอง โดยมีสัดส่วนของปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) สัดส่วนของต้นข้าวโพดโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 5 ถึง 10 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

2) สัดส่วนของซังข้าวโพดโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 0 ถึง 4 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง

3) สัดส่วนตัวประสานโดยน้ำหนักต่อสัดส่วนโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือ 1 ถึง 3 ส่วนโดยน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง (ส่วนผสมแป้งมันสำปะหลัง:น้ำร้อน คือ 10:90 โดยน้ำหนัก)

3.4.2.2 การขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion)
ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1) ทำการบดต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดเพื่อลดขนาดด้วยเครื่องบดย่อย และกรองด้วยตะแกรงร่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ดังภาคผนวก ก.1

2) นำต้นข้าวโพด ซังข้าวโพด และตัวประสาน มาผสมตามสัดส่วนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM

3) ทำการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง ด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) โดยนำส่วนผสมเข้าเครื่องอัดรีด และทำการตัดแท่งเชื้อเพลิงให้มีความยาว 5 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร

4) นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ ตากแดดประมาณ 1-2 วัน เพื่อลดความชื้นเบื้องต้น

3.4.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง โดยทดสอบหาค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) และค่าความหนาแน่น (Density) ดังภาคผนวก ค.1 และ ภาคผนวก ค.2

3.4.2.4 การทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (recheck) นำผลการทดสอบที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของแบบจำลอง มาทดลองและวัดผลตอบสนอง เพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการ และเปรียบเทียบค่าที่สังเกตจากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการตัวแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการแบบใหม่

3.4.2.5 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

3.4.3 ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังนี้

3.4.3.1 นำแท่งเชื้อเพลิงจากผลการวิจัยในข้อ 3.4.2 มาศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) คือ อุณหภูมิ และเวลา ที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อน (Heating Value) และร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) สูง ซึ่งมีจำนวนแบบการทดลอง (Run) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM ทั้งสิ้น 13 การทดลอง โดยมีสัดส่วนของปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) อุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิง คือ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส

2) เวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) แท่งเชื้อเพลิง คือ 1 ถึง 3 ชั่วโมง

3.4.3.2 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ (สุพรชัย มั่งมีสิทธิ, 2555)

1) นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการขึ้นรูปและตากไล่ความชื้นเบื้องต้นแล้วมาเรียงในหม้อดินเผา โดยเรียงให้มีช่องว่างระหว่างแท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนกระจายได้ดี และนำไปใส่ในเตาเผา โดยเผาแบบจำกัดอากาศภายในเตา

2) เพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผา จนอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นขั้นตอนการไล่ความชื้นที่หลงเหลือในแท่งเชื้อเพลิงและภายในเตา ระวังอย่าให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเร็วเพราะจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงเกิดการรุกรานไหม้กลายเป็นเถ้า

3) เพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผา และระยะเวลาที่ใช้ ตามสัดส่วนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ปลอ่ยแท่งเชื้อเพลิงทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

3.4.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

โดยศึกษาคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง คือ ค่าความร้อน (Heating Value) ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids) และปริมาณคาร์บอน (Carbon) ดังภาคผนวก ค.3 ถึง ภาคผนวก ค.8

3.4.2.4 การทดสอบยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (recheck) นำผลการทดสอบที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของแบบจำลองมาทดลองและวัดค่าตัวแปรตามเพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการ และเปรียบเทียบค่าที่สังเกตจากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการตัวแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองเพื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการแบบใหม่

3.4.2.5 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

โดยพิจารณาจากอุณหภูมิและเวลาที่ต่ำที่สุดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุด ดังภาพที่ 3.2

3.5 การประเมินราคาต้นทุนการผลิต

การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง แบ่งเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน ดังนี้

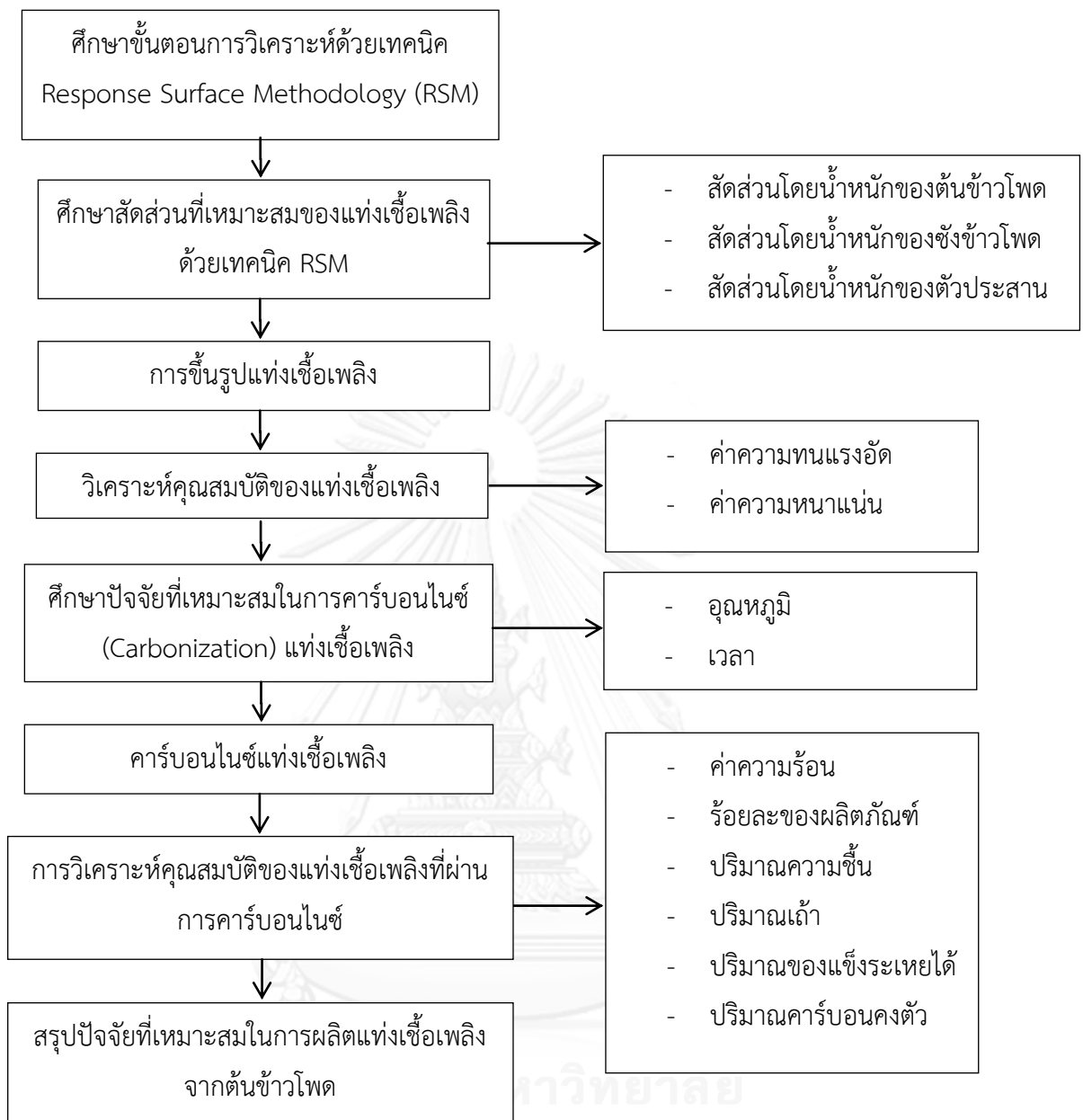
- 1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง
- 2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่น ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์การผลิตและค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดังภาคผนวก ค.9

3.6 รวบรวมและวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.7 สรุปผลการศึกษา

สรุปปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด เพื่อสามารถผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ให้ค่าความหนาแน่นอัด ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง





ภาพที่ 3.2 ผังวิธีการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

การวิจัยครั้งนี้เมื่อศึกษาขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นการศึกษาในส่วนของเทคนิคทางสถิติแล้วจึงทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอนได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

ตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์(Carbonization) แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

หลังจากศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแล้วจึงทำการประเมินราคาต้นทุนการผลิตของแท่งเชื้อเพลิง

4.1 การวิจัยตอนที่ 1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

4.1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมโดยน้ำหนักในกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ให้ค่าความทนแรงอัดสูง

ผลการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง คือ ต้นข้าวโพด ซึ่งข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง นำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) และเลือกแบบจำลอง Quadratic ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง สัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 เนื่องจากต้องการให้มีสัดส่วนของต้นข้าวโพดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 ของสัดส่วนปัจจัยที่นำมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง ขณะที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของซึ่งข้าวโพดจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 4 และสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวประสานจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 เป็นการศึกษาสัดส่วนที่ต่ำที่สุดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถคงรูปและมีค่าความทนแรงอัดสูง ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขของการออกแบบสัดส่วนการผสม ดังนั้น การทดสอบคุณสมบัติจะวัดค่าความทนแรงอัดของ

แห่งเชื้อเพลิง และค่าความหนาแน่น โดยใช้ค่าความทนแรงอัดเป็นเกณฑ์ในการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยที่สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดต้องมีค่าความทนแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.350 MPa (Richards, 1990) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรและระดับของการออกแบบการทดลอง

ตัวแปร	ระดับ		หน่วย
	ต่ำ	สูง	
ต้นข้าวโพด	5	10	ส่วน (โดยน้ำหนัก)
ซังข้าวโพด	0	4	ส่วน (โดยน้ำหนัก)
ตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง	1	3	ส่วน (โดยน้ำหนัก)

จากการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อออกแบบการทดลองตามช่วงสัดส่วนที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 4.2 หลังจากนั้นนำสัดส่วนที่ผสมตามแต่ละการทดลองไปขึ้นรูปและทำวิเคราะห์คุณสมบัติแห่งเชื้อเพลิงในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.2 จำนวนชุดการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)		
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน
1	3.3	2	2
2	5	0	1
3	5	0	2
4	5	0	3
5	5	4	1
6	5	4	2
7	5	4	3
8	7.5	0	2

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) จำนวนชุดการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)		
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน
9	7.5	0	2
10	7.5	2	0.32
11	7.5	2	2
12	7.5	2	2
13	7.5	2	3.68
14	7.5	5.36	2
15	10	0	1
16	10	0	3
17	10	4	1
18	10	4	2
19	10	4	3
20	11.7	2	2

4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงและผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

เมื่อออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงคือต้นข้าวโพด ซังข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง คือ ค่าความทนแรงอัด และค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้ผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดเป็นเกณฑ์ในการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งต้องสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.350 MPa ซึ่งวิธีการพื้นผิวตอบสนองจะคำนวณค่าทำนายเพื่อพยากรณ์ผลตอบสนองในแต่ละการทดลอง ดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ข.1

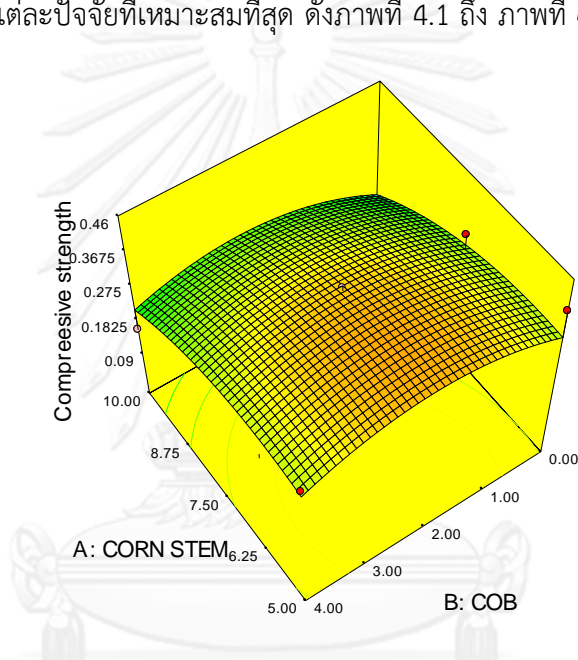
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความทนแรงอัด ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			ค่าความทนแรงอัด (MPa)		ความหนาแน่น (Kg/m ³)
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	ค่าทดลอง	ค่าทำนาย	
1	3.3	2	2	0.458	0.332	383.16
2	5	0	1	0.146	0.218	337.54
3	5	0	2	0.380	0.310	365.75
4	5	0	3	0.064	0.155	365.81
5	5	4	1	0.056	0.138	308.53
6	5	4	2	0.323	0.308	380.27
7	5	4	3	0.140	0.231	389.08
8	7.5	0	2	0.313	0.287	361.17
9	7.5	0	2	0.307	0.287	362.66
10	7.5	2	0.32	0	-0.025	0
11	7.5	2	2	0.350	0.363	360.41
12	7.5	2	2	0.357	0.363	368.90
13	7.5	2	3.68	0.111	0.052	385.27
14	7.5	5.36	2	0.268	0.193	383.15
15	10	0	1	0.085	0.053	310.94
16	10	0	3	0.073	0.051	350.00
17	10	4	1	0.048	0.015	360.13
18	10	4	2	0.161	0.217	322.52
19	10	4	3	0.184	0.170	398.26
20	11.7	2	2	0.090	0.142	329.87

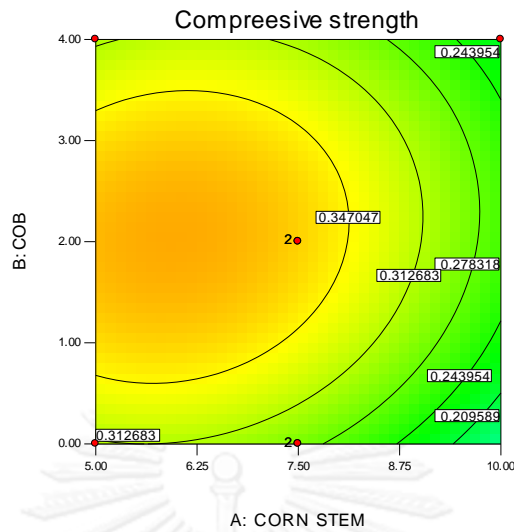
จากตารางที่ 4.3 พบว่า การทดลองที่ 1 3 11 และ 12 แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความทนแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.350 MPa โดยในการทดลองที่ 11 และ 12 มีการนำต้นข้าวโพดมาใช้มากกว่าในการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยนำซังข้าวโพดและตัวประสานมาใช้ให้น้อยที่สุด และคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองต้องมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

ขณะที่ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละสัดส่วนที่ทำการทดลอง โดยมีค่าความหนาแน่นประมาณ $300-380 \text{ Kg/m}^3$ โดยการทดลองที่ 19 ซึ่งมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของ ต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาน คือ 10:4:3 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด 398.26 Kg/m^3 ขณะที่การทดลองที่ 5 ซึ่งมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาน คือ 5:4:1 มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด 308.53 Kg/m^3 ตามลำดับ

ดังนั้น เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงแล้วจึงนำมาพิจารณาร่วมกับกราฟทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบแทน (ค่าความทนแรงอัด) เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกสัดส่วนของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพที่ 4.1 ถึง ภาพที่ 4.6

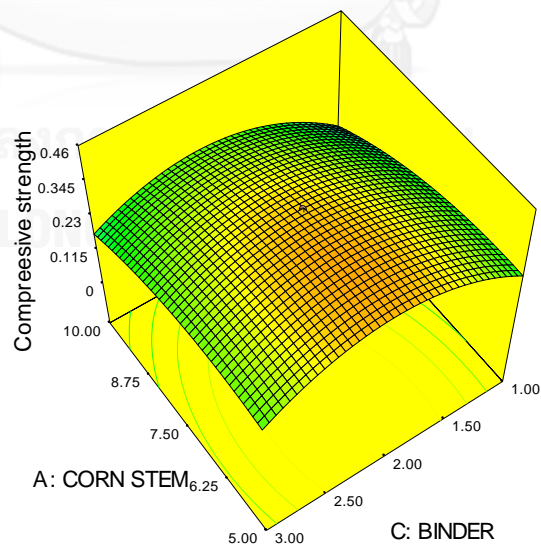


ภาพที่ 4.1 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

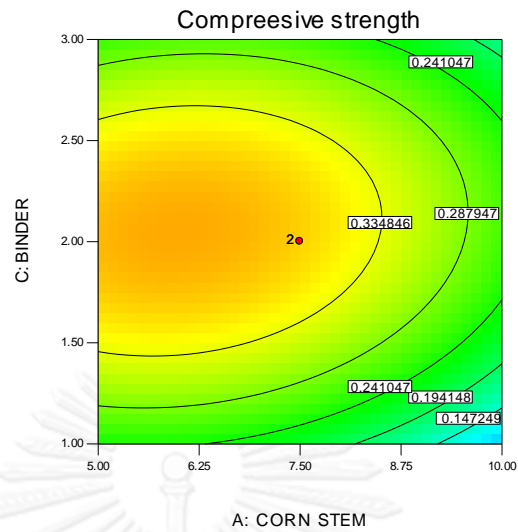


ภาพที่ 4.2 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดและซังข้าวโพดต่อผลตอบสนองคือค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดมีค่าอยู่ระหว่าง 5-7.5 ส่วนและซังข้าวโพดมีค่าอยู่ระหว่าง 1-3 ส่วน เป็นช่วงของสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดมีผลทำให้ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงมากกว่า 0.347 MPa

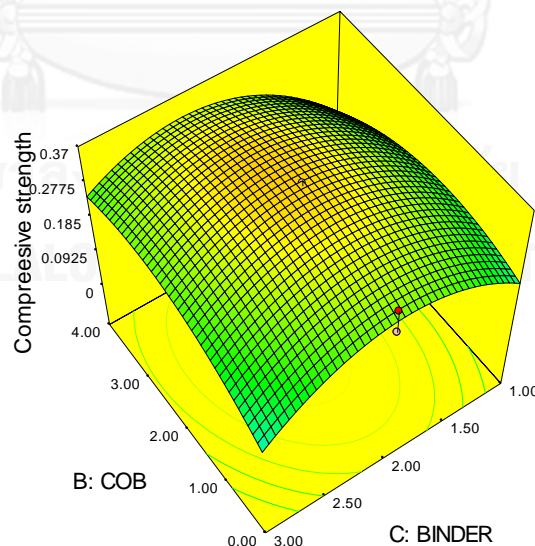


ภาพที่ 4.3 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

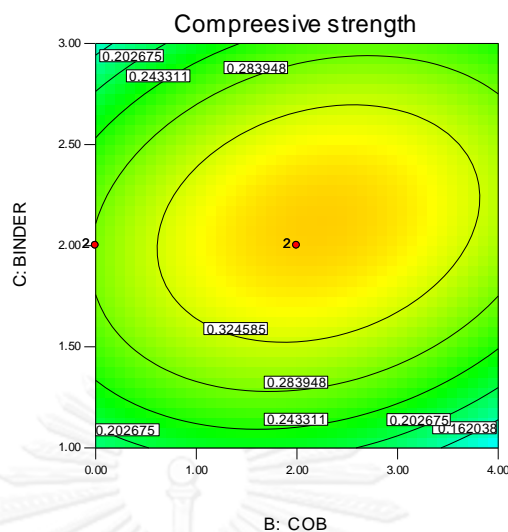


ภาพที่ 4.4 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างต้นข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดและตัวประสานต่อผลตอบสนองคือค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดมีค่าอยู่ระหว่าง 5-8 ส่วน และตัวประสานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.5 ส่วน เป็นช่วงของสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดมีผลทำให้ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงมากกว่า 0.335 MPa



ภาพที่ 4.5 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างซังข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความทนแรงอัดสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4.6 การทำนายสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างซังข้าวโพดและตัวประสานที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยน้ำหนักของซังข้าวโพดและตัวประสานต่อผลตอบแทนคือค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของซังข้าวโพดมีค่าอยู่ระหว่าง 1-3.5 ส่วน และตัวประสานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.5 ส่วน เป็นช่วงของสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดมีผลทำให้ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงมากกว่า 0.325 MPa

ดังนั้น เมื่อพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมจากผลการทำนายของความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัยพบว่า ช่วงสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของต้นข้าวโพด คือ 5-7.5 ซังข้าวโพด คือ 1-3 และตัวประสาน คือ 1.5-2.5 ซึ่งเป็นช่วงสัดส่วนที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมของความสัมพันธ์แต่ละปัจจัย

ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย	ช่วงสัดส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสม		
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน
ต้นข้าวโพดกับซังข้าวโพด	5-7.5	1-3	
ต้นข้าวโพดกับตัวประสาน	5-8		1.5-2.5
ซังข้าวโพดกับตัวประสาน		1-3.5	1.5-2.5
สรุปสัดส่วนที่เหมาะสม	5-7.5	1-3	1.5-2.5

เมื่อทราบผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจากตารางที่ 4.3 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมจากการทำนายด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ในตารางที่ 4.4 พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง คือ สัดส่วนในการทดลองที่ 11 และ 12 ซึ่งมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาน คือ 7.5:2:2 และมีค่าความทนแรงอัด 0.350 และ 0.357 MPa ตามลำดับ

4.1.3 การทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาสัดส่วนที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้จากการหาสัดส่วนที่เหมาะสมมาทำการทดลองซ้ำ และกำหนดช่วงสัดส่วนจากผลการทดลองให้ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย

จากการทดลองยืนยันผลที่ได้จากการหาสัดส่วนที่เหมาะสม โดยสัดส่วนที่เหมาะสมนั้นต้องนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ในขณะที่นำซังข้าวโพดและตัวประสานมาใช้ให้น้อยที่สุด และคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองต้องมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด จึงนำมากำหนดช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ข.2

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			ค่าความทนแรงอัด (MPa)			ความหนาแน่น (Kg/m ³)
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	ค่าทดลอง	ค่าทำนาย	P-Value	
1	7.5	2	2	0.3580	0.363	0.997	365.82
2	7.5	2	1.75	0.3506	0.350	0.992	364.01
3	7.5	1.5	2	0.3556	0.357	0.996	365.15
4	7.5	1.5	1.75	0.3516	0.357	0.998	364.67

จากการกำหนดช่วงสัดส่วนเพื่อทดสอบยืนยันผลการศึกษา พบว่า ทั้ง 4 การทดลองมีค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงสูงกว่าค่าที่กำหนด คือ 0.350 MPa โดยการทดลองที่ 1 มีค่าความทนแรงอัดสูงสุด คือ 0.358 MPa ขณะที่การทดลองที่ 2 มีค่าความทนแรงอัดน้อยที่สุด คือ 0.3506 MPa ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายจากวิธีการพื้นผิวตอบสนองและค่าความทนแรงอัดที่

ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าจากการทำนายและการทดลองนั้น มีค่า $P\text{-value} \geq 0.05$ หมายถึง ค่าจากการทำนายและการทดลองไม่แตกต่างกัน

เมื่อทดสอบค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 365 Kg/m^3

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกสัดส่วนตามการทดลองที่ 3 จากตารางที่ 4.5 ซึ่งมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาธน์ คือ 7.5:1.5:2 มาทำการศึกษาผลของการคาร์บอนซีในการวิจัยตอนที่ 2 เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่ใช้ซังข้าวโพดน้อยเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 1 และ 2 นอกจากนี้สัดส่วนตามการทดลองที่ 3 สามารถคงรูปได้ดีกว่าการทดลองที่ 4 เพราะมีตัวประสาธน์ช่วยในการคงรูปมากกว่า และยังมีค่าความทนแรงอัดสูงเมื่อเทียบกับสัดส่วนในการทดลองที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของชมธิตา ชื่นนิยม (2553) ซึ่งศึกษาการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงจากเศษซังข้าวโพด มีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาธน์ที่ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาธน์ ค่าความทนแรงอัดและค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ กิตติ ยิงโยชน์ และไพลิน โลโท (2548) ศึกษาการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงก้อนโดยใช้ถ่านขี้เลื่อย มีแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาธน์ ในสัดส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่เป็นตัวประสาธน์ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีความหนืดค่อนข้างสูง จึงทำให้อนุภาคของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวกันได้ดีกว่าในสัดส่วนที่มีแป้งมันสำปะหลังน้อย

4.1.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

4.1.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0158 ($P\text{-value} < 0.05$) แสดงว่า มีปัจจัยที่ทำการศึกษาอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง หรืออาจกล่าวได้ว่า สมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.6

2) การทดสอบว่าแบบจำลองการถดถอยของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0896 ($P\text{-value} > 0.05$) แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง

Source	df	SS	MS	F-value	P-value
Model	9	0.27	0.030	4.34	0.0158
Lack-of-Fit	8	0.068	8.482E-003	10.53	0.0896
Pure error	2	1.611E-003	8.054E-004		
Residual	10	0.069	6.946E-003		
Total	19	0.34			

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับข้อมูล

โดยพิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นมีเกณฑ์ในการเลือกดังนี้

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

3.2) ควรเลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และ Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย พบว่าแบบจำลอง Cubic ให้ค่า Std. Dev. ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่น จึงควรเลือก แบบจำลอง Cubic เป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ แต่เนื่องจากแบบจำลอง Cubic มีความเป็นคู่แฝดแฝง (Aliased) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบการทดลองแบบ CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลอง Cubic ได้ ดังนั้นจะไม่นำแบบจำลอง Cubic มาพิจารณา

โดยเมื่อไม่พิจารณาแบบจำลอง Cubic แล้ว พบว่าแบบจำลอง Quadratic เป็นแบบจำลองที่ให้เกณฑ์รองลงมา คือให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลือ อีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลืออีกด้วย ดังนั้น แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

Source	Std. Dev.	R^2	Adj- R^2	PRESS	
Linear	0.13	0.1917	0.0401	0.43	
2FI	0.14	0.2413	-0.1089	0.76	
Quadratic	0.083	0.7961	0.6125	0.38	Suggested
Cubic	0.041	0.9852	0.9066	+	Aliased

4.1.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก

เมื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมตามข้อ 4.1.4.1 หรือแบบจำลอง Quadratic แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง (ค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง) โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

$$H_0 : \beta_j = 0 \text{ (ปัจจัยที่ศึกษา ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง)}$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ (ปัจจัยที่ศึกษา มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง)}$$

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลองการถดถอยหรือปัจจัยที่มีค่า P-value ≥ 0.05 ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสาน) เอาไว้ และเมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าว พบว่า ต้นข้าวโพด (A) และตัวประสาน (C^2) มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองหรือค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.8

ดังนั้น สมการการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษามาสร้างสมการ ดังตารางที่ 4.9 จะได้สมการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าความทนแรงอัด} &= 0.36 - 0.057A + 9.894E-003B + 0.023C + 0.011AB + 0.015AC \\ &+ 0.039BC - 0.045A^2 - 0.066B^2 - 0.12C^2 \end{aligned}$$

ทั้งนี้สมการการทำนายค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง สามารถนำไปใช้คาดการณ์สัดส่วน โดยน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสาน) เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความทนแรงอัดสูง

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

Analysis of variance table [Partial of square]						
Source	df	SS	MS	F-value	P-value	VIF
Model	9	0.27	0.030	4.34	0.0158	
A	1	0.053	0.053	7.56	0.0205	1.01
B	1	1.388E-003	1.388E-003	0.20	0.6644	1.11
C	1	7.134E-003	7.134E-003	1.03	0.3348	1.00
AB	1	1.243E-003	1.243E-003	0.18	0.6812	1.02
AC	1	1.891E-003	1.891E-003	0.27	0.6132	1.00
BC	1	0.012	0.012	1.77	0.2128	1.00
A ²	1	0.022	0.022	3.21	0.1033	1.17
B ²	1	0.029	0.029	4.19	0.0678	1.28
C ²	1	0.19	0.19	27.05	0.0004	1.19
Residual	10	0.069	6.946E-003			
Corrected Total	19	0.340				

หมายเหตุ A = ต้นข้าวโพด (STEM) , B = ชั่งข้าวโพด (CORN) , C = ตัวประสาน (BINDER)

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High
Intercept	0.36	1	0.050	0.25	0.47
A-STEM	-0.057	1	0.021	-0.10	-0.011
B-CORN	9.894E-003	1	0.022	-0.039	0.059
C-BINDER	0.023	1	0.023	-0.027	0.073
AB	0.011	1	0.025	-0.046	0.067
AC	0.015	1	0.029	-0.050	0.081
BC	0.039	1	0.029	-0.026	0.10
A ²	-0.045	1	0.025	-0.10	0.011
B ²	-0.066	1	0.032	-0.14	5.864E-003
C ²	-0.12	1	0.024	-0.18	-0.071

ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.10 พบว่า

1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 0.083 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความทนแรงอัดมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงอัด (Mean) (Tarpey, 2000)

2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 0.38 แสดงว่า แบบจำลองการถดถอย มีความเหมาะสม เนื่องจากมีค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น (Tarpey, 2000)

3) ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.7961 แสดงว่า ปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลตอบสนองได้ 79.61 เปอร์เซ็นต์

4) ค่า Adj- R^2 มีค่าเท่ากับ 0.6125 ซึ่งเป็นค่าการปรับค่าใหม่ แสดงว่า ถ้านำสมการนี้ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกลดลง 61.25 เปอร์เซ็นต์

5) ค่า $Pred-R^2$ มีค่าเท่ากับ -0.1256 แสดงว่า สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (Bajai and Singhal, 2009)

6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 6.853 แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้น เป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 4 (Bajai and Singhal, 2009)

ตารางที่ 4.10 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

Std. Dev.	0.083	R^2	0.7961
Mean	0.19	Adj- R^2	0.6125
C.V.	43.16	Pred- R^2	-0.1256
PRESS	0.38	Adeq Precision	6.583

4.1.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

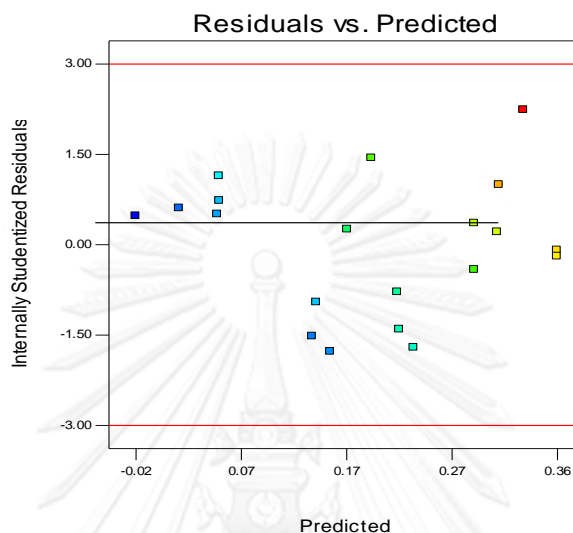
การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบส่วนตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก จ.1

4.1.4.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบส่วนตกค้างสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plots)

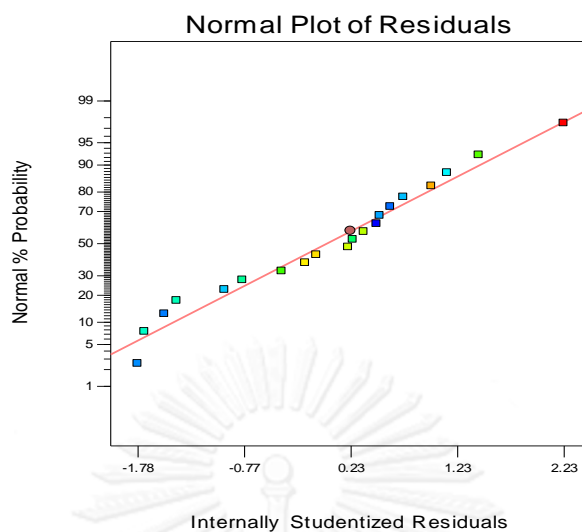
การพล็อตส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบการขาดคุณสมบัติที่สำคัญอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย อันได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน มีข้อมูลผิดปกติเกิดขึ้น และความคาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยการพล็อต

แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (Predicted) ถ้าส่วนตกค้าง อยู่ภายในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด ± 3 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วีรัช พานิชวงค์, 2546) ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย

การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ เป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับ คู่กับค่าคาดหวัง (Expected values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย โดยพิจารณาจากพล็อตแผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าพล็อตแผนภาพการกระจายเข้าใกล้เส้นสมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วีรัช พานิชวงค์, 2546) ดังภาพที่ 4.8

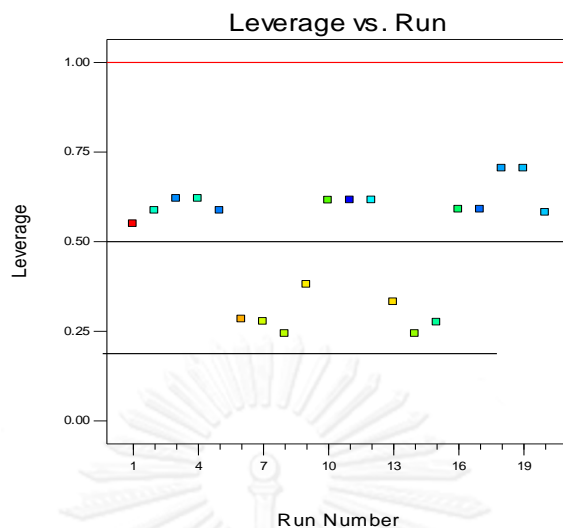


ภาพที่ 4.8 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

4.1.4.3.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณแบบจำลองการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii}) โดย $h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$ เมื่อ $p = k+1$ และ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย k คือจำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง และ n คือ จำนวนการทดลอง (วีรัช พานิชวงค์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า มีจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด 10 ตัว (p) จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง 9 ตัว (k) และจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง (n) ดังนั้น จะได้ค่า $h_{ii} \geq 1.0000$ แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษา เนื่องจากแผนภาพพล็อตการกระจายมีค่าไม่เกินค่า h_{ii} ดังภาพที่ 4.9

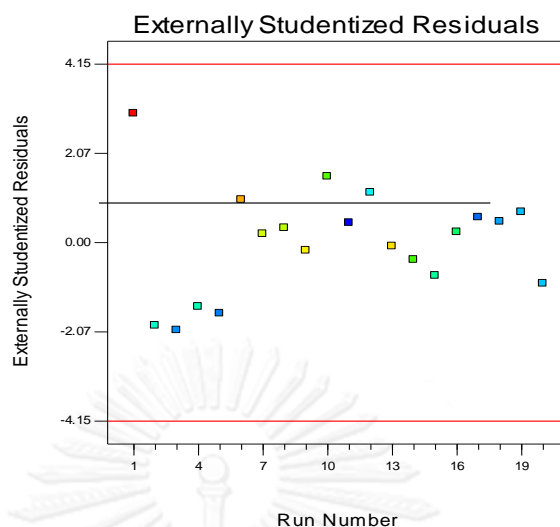


ภาพที่ 4.9 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

4.1.4.3.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริงเบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าใด โดยพิจารณาค่า Outlier (d_i) หรือ Externally Studentized Residuals และ ค่า Studentized Residuals (r_i) หากมากกว่าช่วงกำหนดควบคุม $|d_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ หรือ $|r_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ จะถือว่าข้อมูลนั้นๆ เป็นค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง จึงควรนำมาตรวจสอบด้วยว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่ เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวต่อไป (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองตาม ในแต่ละลำดับการทดลองนั้นอยู่ในช่วงกำหนดควบคุมไม่เกิน ± 4.15 แสดงว่าไม่พบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง ดังภาพที่ 4.10

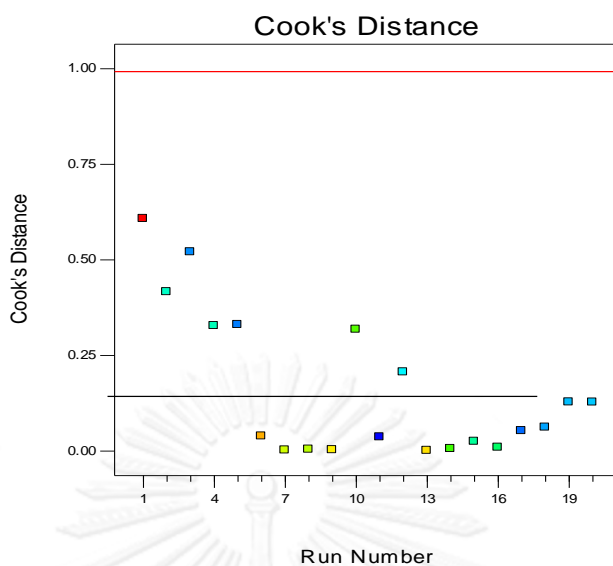


ภาพที่ 4.10 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4.1.4.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

พิจารณา Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่างและสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i ดังนั้นถ้า $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า Cook's Distance (D_i) มีค่าไม่เกิน 1 สามารถสรุปได้ว่า ไม่พบค่าที่มีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.2 ผลการวิจัยตอนที่ 2 ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

4.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

ผลการศึกษาของปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงคือ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง ซึ่งได้นำทั้ง 2 ปัจจัย มาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพินผิวตอบสนอง โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางและเลือกแบบจำลอง Quadratic ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง โดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเวลาจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 ชั่วโมง ซึ่งการคาร์บอนไนซ์จะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 400 ถึง ประมาณ 600 องศาเซลเซียส ขณะที่ใช้เวลาประมาณ 60 ถึง 180 นาที โดยขึ้นกับชนิด และปริมาณความชื้นในแท่งเชื้อเพลิง (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ตัวแปรและระดับของการออกแบบการทดลอง

ตัวแปร	ระดับ		หน่วย
	ต่ำ	สูง	
อุณหภูมิ ในการคาร์บอนไนซ์	400	600	องศาเซลเซียส
เวลา ในการคาร์บอนไนซ์	60	180	นาที

จากการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อออกแบบการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 4.12 หลังจากนั้นนำอุณหภูมิและเวลาตามแต่ละการทดลอง ไปทำการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง และวิเคราะห์คุณสมบัติแท่งเชื้อเพลิงต่อไป

ตารางที่ 4.12 จำนวนชุดการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง แบบส่วนประสมกลาง

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	358.58	120
2	400	60
3	400	120
4	400	180
5	500	35.15
6	500	120
7	500	120
8	500	180
9	500	204.85
10	600	60
11	600	120
12	600	180
13	641.42	120

4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงและผลตอบแทนของค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง

เมื่อออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง คือ อุณหภูมิ และเวลา ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และเลือกการออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง จึงนำมาทดสอบคุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิง คือ ค่าพลังงานความร้อน ร้อยละของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอน โดยใช้ผลตอบแทนของค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็นเกณฑ์ในการเลือกอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการพื้นผิวตอบสนองจะคำนวณค่าทำนายเพื่อพยากรณ์ผลตอบแทนในแต่ละการทดลอง ดังตารางที่ 4.13 ตารางที่ 4.14 และภาคผนวก ข.3

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)		ร้อยละของผลิตภัณฑ์ แห้งเชื้อเพลิง	
			ค่าทดลอง	ค่าทำนาย	ค่าทดลอง	ค่าทำนาย
1	358.58	120	4327.3	4379.2	36.51	35.98
2	400	60	4346.4	4299.4	36.65	36.21
3	400	120	4571.1	4585.2	37.18	38.66
4	400	180	4594.7	4546.0	37.49	37.54
5	500	35.15	4352.4	4396.3	36.70	37.12
6	500	120	4797.8	4766.8	40.87	40.53
7	500	120	4804.7	4766.8	41.16	40.53
8	500	180	4612.7	4636.5	39.76	38.63
9	500	204.85	4457.9	4487.4	36.28	36.80
10	600	60	4435.1	4398.5	35.46	35.03
11	600	120	4401.9	4502.0	34.33	35.92
12	600	180	4318.9	4280.6	33.16	33.24
13	641.42	120	4285.2	4261.6	32.75	32.11

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณเถ้า ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณความชื้น (%)	ปริมาณของแข็งรวม (%)	ปริมาณเถ้า (%)	ปริมาณของแข็งระเหย (%)	ปริมาณคาร์บอน (%)
1	358.58	120	6.02	93.98	8.83	85.15	47.30
2	400	60	6.03	93.97	8.47	85.50	47.50
3	400	120	5.85	94.15	7.96	86.19	47.89
4	400	180	5.84	94.16	7.91	86.25	47.92
5	500	35.15	6.02	93.98	8.48	85.50	47.50
6	500	120	5.50	94.50	7.23	87.26	48.48
7	500	120	5.50	94.50	7.24	87.26	48.48
8	500	180	5.53	94.47	7.51	86.96	48.31
9	500	204.85	5.90	94.10	8.21	85.89	47.71
10	600	60	5.86	94.14	8.23	85.91	47.73
11	600	120	5.92	94.08	8.75	85.33	47.41
12	600	180	6.01	93.99	8.84	85.15	47.31
13	641.42	120	6.14	93.86	9.52	84.34	46.86

*หมายเหตุ ปริมาณคาร์บอน เป็นการประมาณค่า เทียบจากปริมาณของแข็งระเหย

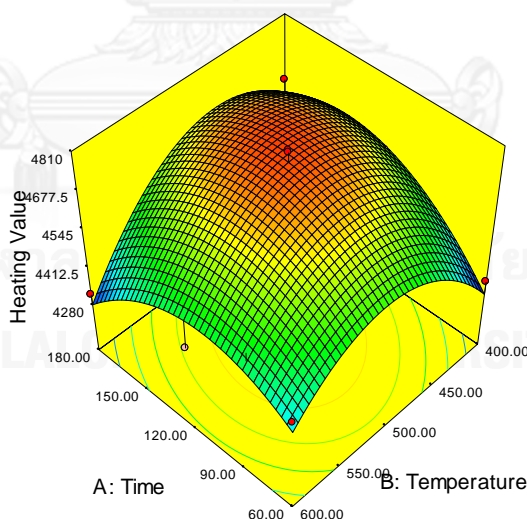
จากตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 7 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที มีค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุด 4,804.7 Kcal/Kg และในการทดลองที่ 6 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที มีค่าพลังงานความร้อนสูงรองลงมา 4,797.8 Kcal/Kg ขณะที่การทดลองที่ 13 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 641.42 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที มีค่าพลังงานความร้อนต่ำที่สุด 4,261.6 Kcal/Kg ตามลำดับ

ขณะที่ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 7 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที มีค่าสูงที่สุด คือ ร้อยละ 41.16 ซึ่งใกล้เคียงกับการ

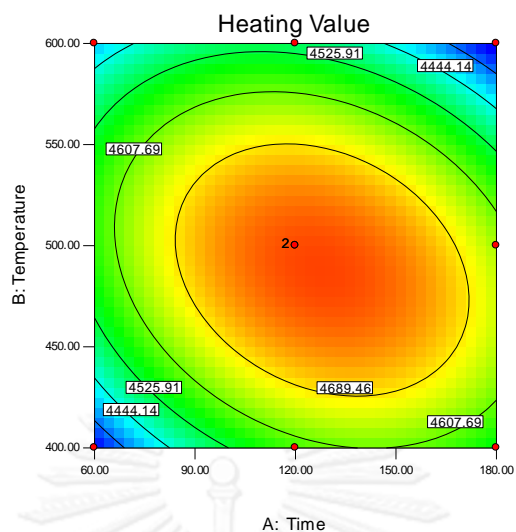
ทดลองที่ 6 มีร้อยละของผลิตภัณฑ์ คือ ร้อยละ 40.87 ขณะที่การทดลองที่ 13 ทำการคาร์บอนไนซ์ที่ อุณหภูมิ 641.42 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที มีค่าต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 32.75 ตามลำดับ

และจากตารางที่ 4.14 พบว่า ในการทดลองที่แห้งเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้น และ ปริมาณเถ้าต่ำ จะมีปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูง โดยการ ทดลองที่ 6 และ 7 มีปริมาณความชื้น และที่มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ร้อยละ 5.5 และร้อยละ 7.24 ตามลำดับ ขณะที่ที่มีปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด ร้อยละ 94.50 ร้อยละ 87.26 และร้อยละ 48.48 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ บัญจรัตน์ โล จานันท์ และคณะ (2554) ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแห้งไมยราบยักษ์ พบว่า เชื้อเพลิงอัดแห้งที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่มีปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้าต่ำ จะมีปริมาณ ของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูง

ดังนั้น เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงแล้วจึงพิจารณารูปทำนายความสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนอง (ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์) เพื่อ ประกอบการตัดสินใจในการเลือกสัดส่วนของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพที่ 4.12 ถึง ภาพที่ 4.15

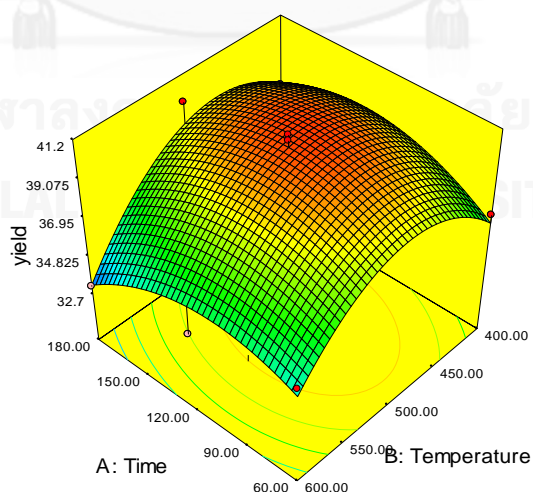


ภาพที่ 4.12 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีค่า พลังงานความร้อนสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

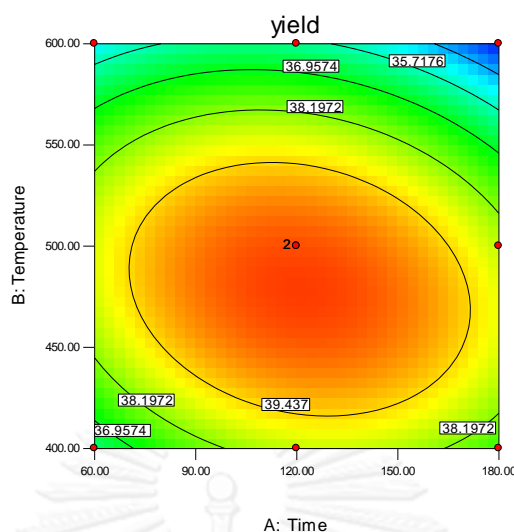


ภาพที่ 4.13 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนสูง

จากภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงต่อผลตอบแทนคือค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง พบว่า อุณหภูมิประมาณระหว่าง 430-550 องศาเซลเซียส และเวลาประมาณระหว่าง 90-170 นาที เป็นช่วงของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุด มีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูงกว่า 4,689.46 Kcal/Kg



ภาพที่ 4.14 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิงสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 4.15 การทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีร้อยละของผลิตภัณฑ์แห้งเชื้อเพลิงสูงแบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

จากภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิงต่อผลตอบสนอง คือร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง พบว่า อุณหภูมิประมาณระหว่าง 430-550 องศาเซลเซียส และเวลาประมาณระหว่าง 70-170 นาที เป็นช่วงของอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดมีผลทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์แห้งเชื้อเพลิงสูงกว่าร้อยละ 39.44

ดังนั้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจากผลการทำนายของความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัย พบว่า ช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แห้งเชื้อเพลิง คือ 430-550 และ 90-170 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมของความสัมพันธ์แต่ละปัจจัย

ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย	ช่วงที่เหมาะสม	
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
ค่าพลังงานความร้อน	430-550	90-170
ร้อยละของผลิตภัณฑ์	430-550	70-170
สรุปช่วงที่เหมาะสม	430-550	90-170

เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.13 ถึง ตารางที่ 4.15 และวัตถุประสงค์งานวิจัยที่ต้องการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิงสูง โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง คือ อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที เพื่อให้ช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เลือกนี้ มีความสัมพันธ์ของผลตอบสนองทั้งค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการพิจารณาภาพการทำนายอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงแบบเส้นค่าระดับประกอบการตัดสินใจดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 ภาพที่ 4.14 ถึง ภาพที่ 4.17

4.2.3 การทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมมาทำการทดลองซ้ำ และกำหนดช่วงอุณหภูมิและเวลาจากผลการทดลองให้ช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย

จากการทดลองยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งสัดส่วนนั้นต้องนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง และคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองต้องมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงสูง แล้วนำมากำหนดช่วงสัดส่วนที่เหมาะสมให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 4.16 และภาคผนวก ข.4

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)			ร้อยละของผลิตภัณฑ์		
			ค่าทดลอง	ค่าทำนาย	P-Value	ค่าทดลอง	ค่าทำนาย	P-Value
1	475	90	4689.43	4695.11	0.9723	40.20	40.1854	0.8883
2	475	100	4728.21	4726.84	0.9891	40.30	40.447	0.7792
3	500	90	4709.14	4710.06	0.9935	40.12	40.1437	0.7792
4	500	100	4738.36	4737.99	0.9733	40.35	40.3726	0.7792

จากการกำหนดช่วงอุณหภูมิและเวลาเพื่อทดสอบยืนยันผลการศึกษา พบว่า ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการทดลองที่ 4 มีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุด คือ 4,738.36 Kcal/Kg และร้อยละ 40.35 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายจากวิธีการพื้นผิวดตอบสนองและค่าพลังงานความร้อนกับร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าจากการทำนายและการทดลองนั้นมีค่า $P\text{-value} \geq 0.05$ หมายถึง ค่าจากการทำนายและการทดลองไม่แตกต่างกัน

หลังจากศึกษาการทดลองยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม นำแห้งเชื้อเพลิงที่ได้จากการยืนยันผลการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จากตารางที่ 4.16 มาทดสอบเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแห้งเชื้อเพลิงจากการยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณความชื้น (%)	ปริมาณของแข็งรวม (%)	ปริมาณเถ้า (%)	ปริมาณของแข็งระเหย (%)	ปริมาณคาร์บอน (%)
1	475	90	5.54	94.46	7.45	87.01	48.34
2	475	100	5.52	94.48	7.31	87.18	48.43
3	500	90	5.53	94.47	7.43	87.04	48.35
4	500	100	5.50	94.50	7.12	87.37	48.54

จากตารางที่ 4.17 พบว่า ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณเถ้า ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการทดลองที่ 4 มีปริมาณความชื้น และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ร้อยละ 5.50 และร้อยละ 7.12 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูงสุด ร้อยละ 94.50 ร้อยละ 87.37 และร้อยละ 48.54 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการทดลองจากตารางที่ 4.16 พบว่า การทดลองที่ 4 มีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุด คือ 4,738.85 Kcal/Kg และร้อยละ 40.35 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบัญญัติ โลจันันท์ และคณะ (2554) ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานทดแทนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแห้งไมยราบยักษ์พบว่า เชื้อเพลิงอัดแห้งที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์

ที่มีค่าพลังงานความร้อนสูง จะมีปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้าต่ำ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณคาร์บอนสูง

จากผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมพบว่า แ่งเชื้อเพลิง ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 475-500 องศาเซลเซียส และเวลา 90-100 นาที จะมีค่าพลังงานความร้อนสูงใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 4,690-4,740 Kcal/Kg และร้อยละของผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 40 ขณะที่ปริมาณความชื้นประมาณ ร้อยละ 5.5 มีปริมาณเถ้าประมาณร้อยละ 7.5 มีปริมาณของแข็งรวมประมาณร้อยละ 94.4 มีปริมาณของแข็งระเหยประมาณร้อยละ 87 และปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 48 และเมื่อทำการทดสอบผลทางสถิติ ด้วยวิธี ANOVA พบว่า ทั้ง 4 การทดลองไม่มีความแตกต่างของค่าพลังงานความร้อน ร้อยละของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงในภาคผนวก จ.4 ถึง จ.7

ดังนั้น ในการคาร์บอนไนซ์แ่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที มีความเหมาะสมที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง คือ 4,650.25 Kcal/Kg และร้อยละ 39.74 ตามลำดับ โดยมีปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำ ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหยและปริมาณคาร์บอนสูงคือ ร้อยละ 5.58 ร้อยละ 7.51 ร้อยละ 94.41 ร้อยละ 86.91 และร้อยละ 48.28 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แ่งเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแ่งเชื้อเพลิง

4.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าพลังงานความร้อนของแ่งเชื้อเพลิง

4.2.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแ่งเชื้อเพลิง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแ่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแ่งเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0007 ($P\text{-value} < 0.05$) แสดงว่า มีปัจจัยที่ทำการศึกษาน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง หรืออาจกล่าวได้ว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.18

2) การทดสอบว่าแบบจำลองการถดถอยของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0560 ($P\text{-value} > 0.05$) แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูล ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง

Source	df	SS	MS	F-value	P-value
Model	5	3.485E+005	69696.96	18.33	0.0007
Lack-of-Fit	6	26599.09	4433.18	186.23	0.0560
Pure error	1	23.80	23.80		
Residual	7	26622.90	3803.27		
Total	12	3.751E+005			

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับข้อมูล

โดยพิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นมีเกณฑ์ในการเลือกดังนี้

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

3.2) ควรเลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และ Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย พบว่าแบบจำลอง Cubic ให้ค่า Std. Dev. ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่น จึงควรเลือก แบบจำลอง Cubic เป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ แต่เนื่องจากแบบจำลอง Cubic มีความเป็นคู่แฝดแฝง (Aliased) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบการทดลองแบบ CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลอง Cubic ได้ ดังนั้นจะไม่นำแบบจำลอง Cubic มาพิจารณา

โดยเมื่อไม่พิจารณาแบบจำลอง Cubic แล้ว พบว่าแบบจำลอง Quadratic แบบจำลองที่ให้เกณฑ์รองลงมา คือให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลืออีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลืออีกด้วย ดังนั้น แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

Source	Std. Dev.	R^2	Adj- R^2	PRESS	
Linear	184.14	0.0961	-0.0847	4.968E+005	
2FI	184.35	0.1846	-0.0872	4.686E+005	
Quadratic	61.67	0.9290	0.8783	98476.30	Suggested
Cubic	79.94	0.9489	0.7956	+	Aliased

4.2.4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก

เมื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมตามข้อ 4.2.4.1 หรือแบบจำลอง Quadratic แล้วนำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง (ค่าพลังงานความร้อนของแห้งเชื้อเพลิง) โดยสมมติฐานการทดสอบ คือ

$H_0 : \beta_j = 0$ (ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง)

$H_1 : \beta_j \neq 0$ (ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง)

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลองการถดถอยหรือปัจจัยที่มีค่า P-value ≥ 0.05 ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (อุณหภูมิ และเวลา) เอาไว้ และเมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าว พบว่า เวลากับอุณหภูมิ (AB) เวลา (A^2) และอุณหภูมิ (B^2) มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองหรือค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

Analysis of variance table [Partial of square]						
Source	df	SS	MS	F-value	P-value	VIF
Model	5	3.485E+005	69696.96	18.33	0.0007	
A	1	9146.98	9146.98	2.41	0.1649	1.01
B	1	17292.16	17292.16	4.55	0.0704	1.00
AB	1	33215.06	33215.06	8.73	0.0212	1.00
A^2	1	1.429E+005	1.429E+005	37.57	0.0005	1.25
B^2	1	2.491E+005	2.491E+005	65.49	< 0.0001	1.26
Residual	7	26622.90	3803.27			
Corrected Total	12	3.751E+005				

หมายเหตุ A = เวลา (Time) , B = อุณหภูมิ (Temperature)

ดังนั้น สมการการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรมาสร้างสมการ ดังตารางที่ 4.21 จะได้สมการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าพลังงานความร้อน} = 4766.77 + 32.19A - 41.58B - 91.13AB - 162.45A^2 - 223.20B^2$$

ทั้งนี้สมการการทำนายค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงนี้ สามารถนำไปใช้ คำนวณการแผ่รังสีของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (อุณหภูมิ และเวลาในการคาร์บอนซ์แท่งเชื้อเพลิง) เพื่อให้ แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าพลังงานความร้อนสูง

ตารางที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

Factor	Coefficient	df	Standard Error	95% CI	
	Estimate			Low	High
Intercept	4766.77	1	37.89	4677.16	4856.37
A	32.19	1	20.76	-16.89	81.27
B	-41.58	1	19.50	-87.70	4.53
AB	-91.13	1	30.84	-164.04	-18.21
A ²	-162.45	1	26.50	-225.12	-99.78
B ²	-223.20	1	27.58	-288.41	-157.98

ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.21 พบว่า

1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 61.67 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพลังงานความร้อนมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงอัด (Mean) (Tarpey, 2000)

2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 98476.30 แสดงว่า แบบจำลองการถดถอย มีความเหมาะสมเนื่องจากมีค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น (Tarpey, 2000)

3) ค่า R² มีค่าเท่ากับ 0.9290 แสดงว่า ปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลตอบสนองได้ 92.90 เปอร์เซ็นต์

4) ค่า Adj-R² มีค่าเท่ากับ 0.8783 ซึ่งเป็นค่าการปรับค่าใหม่ แสดงว่า ถ้านำสมการนี้ ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกลดลง 87.83 เปอร์เซ็นต์

5) ค่า $Pred-R^2$ มีค่าเท่ากับ 0.7375 แสดงว่า สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (Bajai and Singhal, 2009)

6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 12.058 แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้น เป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 4 (Bajai and Singhal, 2009)

ตารางที่ 4.22 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

Std. Dev.	61.67	R^2	0.9290
Mean	4485.08	Adj- R^2	0.8783
C.V.	1.38	Pred- R^2	0.7375
PRESS	98476.30	Adeq Precision	12.058

4.2.4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

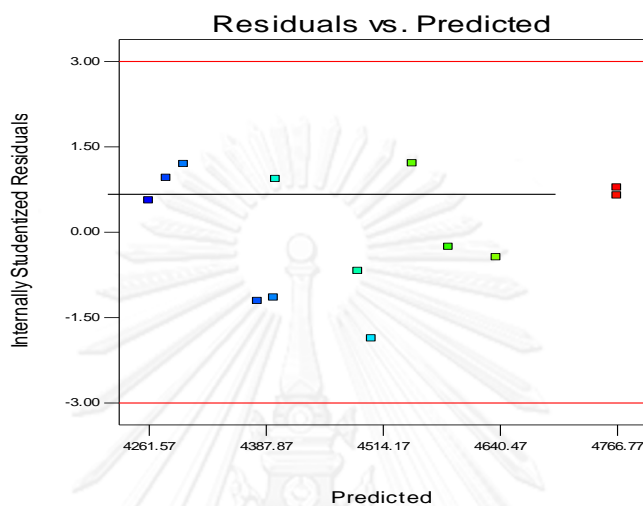
การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบส่วนตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก จ.2

4.2.4.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบส่วนตกค้างสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plots)

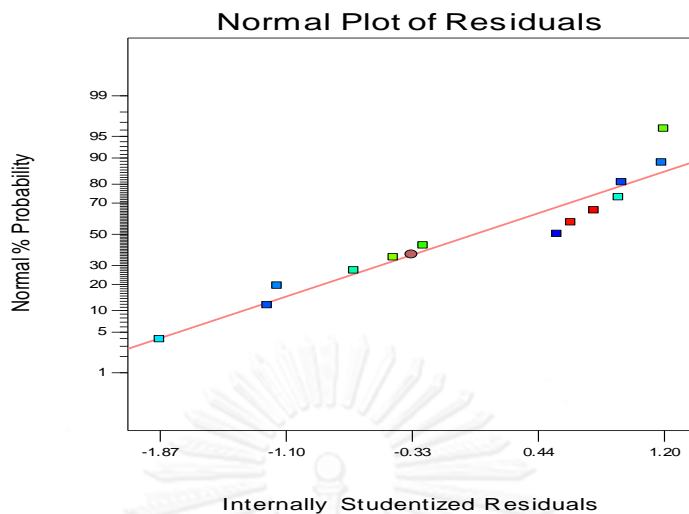
1) การพล็อตส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบการขาดคุณสมบัติที่สำคัญอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย อันได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน มีข้อมูลผิดปกติเกิดขึ้น และความคาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยการพล็อต

แผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (Predicted) ถ้าส่วนตกค้าง อยู่ภายในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด ± 3 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วีรัช พานิชวงค์, 2546) ดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย

2) การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ เป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย โดยพิจารณาจากพล็อตแผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าพล็อตแผนภาพการกระจายเข้าใกล้เส้นสมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วีรัช พานิชวงค์, 2546) ดังภาพที่ 4.17

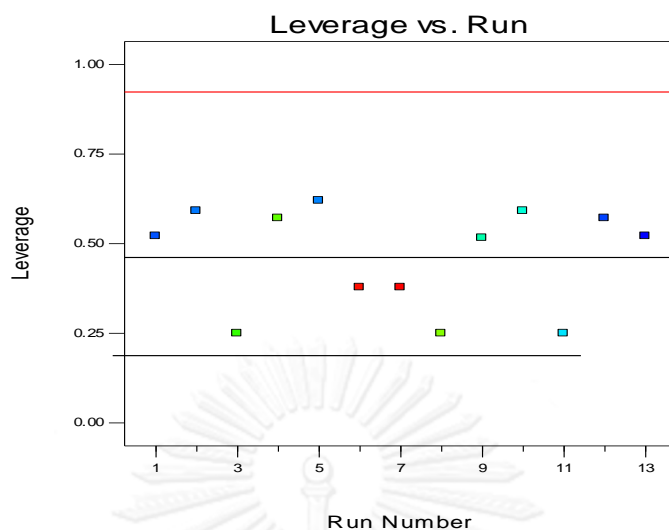


ภาพที่ 4.17 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

4.2.4.3.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณแบบจำลองการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii}) โดย $h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$ เมื่อ $p = k+1$ และ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย k คือจำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง และ n คือ จำนวนการทดลอง (วีรัชช พานิชวงศ์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า มีจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว (p) จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง 5 ตัว (k) และจำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง (n) ดังนั้น จะได้ค่า $h_{ii} \geq 0.9230$ แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษา เนื่องจากแผนภาพลือตการกระจายมีค่าไม่เกินค่า h_{ii} ดังภาพที่ 4.18

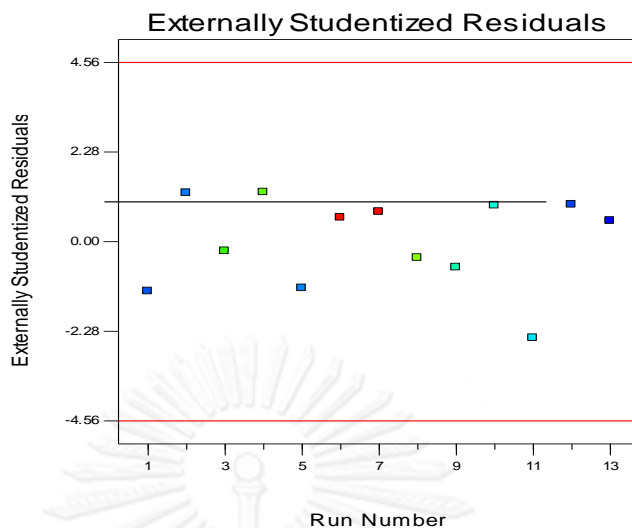


ภาพที่ 4.18 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

4.2.4.3.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริงเบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าใด โดยพิจารณาค่า Outlier (d_i) หรือ Externally Studentized Residuals และ ค่า Studentized Residuals (r_i) หากมากกว่าช่วงกำหนดควบคุม $|d_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ หรือ $|r_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ จะถือว่าข้อมูลนั้นๆ เป็นค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง จึงควรนำมาตรวจสอบด้วยว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่ เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าว (วิรัช พานิชวงศ์, 2546)

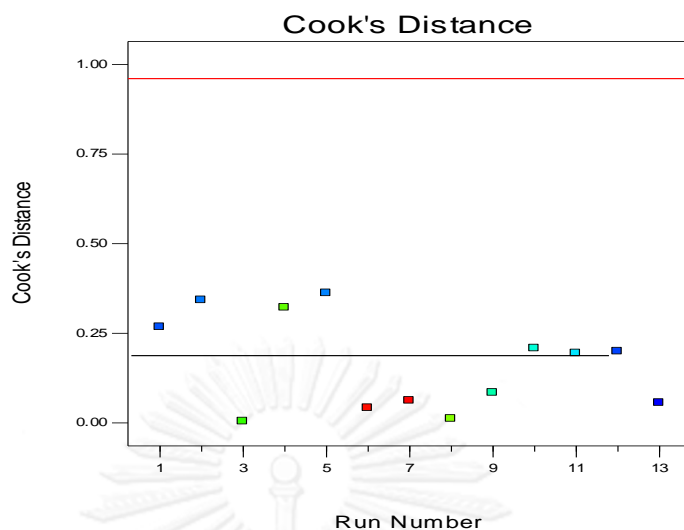
จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง ตามในแต่ละลำดับการทดลองนั้นอยู่ในช่วงกำหนดควบคุมไม่เกิน ± 4.56 แสดงว่าไม่พบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4.2.4.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

พิจารณา Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่างและสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i ดังนั้น ถ้า $D_i > F_{0.5,p,n-p}$ เมื่อ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546) จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า Cook's Distance (D_i) มีค่าไม่เกิน 1 สามารถสรุปได้ว่าไม่พบค่าที่มีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.2.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

4.2.5.1 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1) ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาและผลตอบสนองของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

H_1 : มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษากับผลตอบสนองของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองถดถอย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0020 ($P\text{-value} < 0.05$) แสดงว่า มีปัจจัยที่ทำการศึกษาน้อยหนึ่งตัว ที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง หรืออาจกล่าวได้ว่า สมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.23

2) การทดสอบว่าแบบจำลองการถดถอยของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากผลการศึกษาเมื่อพิจารณา Lack of fit ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.1369 ($P\text{-value} > 0.05$) แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนอง

Source	df	SS	MS	F-value	P-value
Model	5	74.90	14.98	13.05	0.0020
Lack-of-Fit	6	7.99	1.33	30.85	0.1369
Pure error	1	0.043	0.043		
Residual	7	8.03	1.15		
Total	12	82.93			

3) การเลือกแบบจำลองการถดถอยของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับข้อมูล

โดยพิจารณาจากผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นมีเกณฑ์ในการเลือกดังนี้

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

3.2) ควรเลือกแบบจำลองการถดถอยที่ให้ค่า R-Squared (R^2) และ Adjusted R-Squared (Adj- R^2) สูงกว่าแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองการถดถอย พบว่าแบบจำลอง Cubic ให้ค่า Std. Dev. ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นอีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj- R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่น จึง

ควรเลือก แบบจำลอง Cubic เป็นแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ แต่เนื่องจากแบบจำลอง Cubic มีความเป็นคู่แฝดแฝง (Aliased) ซึ่งแสดงว่าการออกแบบการทดลองแบบ CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลอง Cubic ได้ ดังนั้นจะไม่นำแบบจำลอง Cubic มาพิจารณา

โดยเมื่อไม่พิจารณาแบบจำลอง Cubic แล้ว พบว่าแบบจำลอง Quadratic แบบจำลองที่ให้เกณฑ์รองลงมา คือให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลือ อีกทั้งให้ค่า R^2 และ Adj-R^2 สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่เหลืออีกด้วย ดังนั้น แบบจำลอง Quadratic จึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลองการถดถอย

Source	Std. Dev.	R^2	Adj-R^2	PRESS	
Linear	2.53	0.2271	0.0725	91.72	
2FI	2.62	0.2566	0.0088	101.46	
Quadratic	1.07	0.9031	0.8340	19.61	Suggested
Cubic	1.44	0.9250	0.7001	+	Aliased

4.2.5.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก

เมื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมตามข้อ 4.3.5.1 หรือแบบจำลอง Quadratic แล้ว นำมาทดสอบเพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง (ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแห้งเชื้อเพลิง) โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

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

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

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เป็นการวิเคราะห์แบบจำลองที่ตัดปัจจัยที่ไม่มี ความสัมพันธ์กับผลตอบสนองออกจากแบบจำลองการถดถอย หรือปัจจัยที่มีค่า P-value ≥ 0.05 ทั้งนี้ยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลัก (อุณหภูมิ และเวลา) เอาไว้ และเมื่อวิเคราะห์

แบบจำลองการถดถอยดังกล่าว พบว่า เวลา กับ อุณหภูมิ (AB) เวลา (A^2) และอุณหภูมิ (B^2) มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองหรือร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง Quadratic

Analysis of variance table [Partial of square]						
Source	df	SS	MS	F-value	P-value	VIF
Model	5	74.90	14.98	13.05	0.0020	
A	1	0.12	0.12	0.10	0.7591	1.01
B	1	18.74	18.74	16.33	0.0049	1.00
AB	1	2.45	2.45	2.14	0.1873	1.00
A^2	1	17.27	17.27	15.05	0.0061	1.25
B^2	1	52.55	52.55	45.80	0.0003	1.26
Residual	7	8.03	1.15			
Corrected Total	12	82.93				

หมายเหตุ A =เวลา (Time) , B = อุณหภูมิ (Temperature)

ดังนั้น สมการการทำนายร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรมาสร้างสมการ ดังตารางที่ 4.26 จะได้สมการทำนายร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิง ดังต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิง} = 40.53 - 0.11A - 1.37B - 0.78AB - 1.79A^2 - 24B^2$$

ทั้งนี้สมการการทำนายร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิงนี้ สามารถนำไปใช้คาดการณ์สัดส่วนของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา (อุณหภูมิ และเวลาในการคาร์บอนแท่งเชื้อเพลิง) เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีร้อยละของผลิตภัณฑ์แท่งเชื้อเพลิงสูง

ตารางที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาในสมการแบบจำลองการถดถอย

Factor	Coefficient	df	Standard Error	95% CI	
	Estimate			Low	High
Intercept	40.53	1	0.66	38.98	42.09
A	-0.11	1	0.36	-0.97	0.74
B	-1.37	1	0.34	-2.17	-0.57
AB	-0.78	1	0.54	-2.05	0.48
A ²	-1.79	1	0.46	-2.87	-0.70
B ²	-3.24	1	0.48	-4.37	-2.11

ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic จากตารางที่ 4.27 พบว่า

1) ค่า Std. Dev. มีค่าเท่ากับ 1.07 แสดงว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าความทนแรงอัด (Mean) (Tarpey, 2000)

2) ค่า PRESS มีค่าเท่ากับ 19.61 แสดงว่า แบบจำลองการถดถอย มีความเหมาะสม เนื่องจากมีค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น (Tarpey, 2000)

3) ค่า R² มีค่าเท่ากับ 0.9031 แสดงว่า ปัจจัยที่ศึกษาสามารถอธิบายผลตอบสนองได้ 90.31 เปอร์เซ็นต์

4) ค่า Adj-R² มีค่าเท่ากับ 0.8340 ซึ่งเป็นค่าการปรับค่าใหม่ แสดงว่า ถ้านำสมการนี้ไปใช้อ้างอิงกับกลุ่มตัวอย่างอื่นจะทำให้ค่าอำนาจการจำแนกผลลด 83.40 เปอร์เซ็นต์

5) ค่า Pred-R² มีค่าเท่ากับ 0.7636 แสดงว่า สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่ศึกษามีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของผลตอบสนองที่ได้จากการทำนาย (Bajai and Singhal, 2009)

6) ค่า Adeq Precision มีค่าเท่ากับ 11.570 แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่เลือกมานั้น เป็นที่ยอมรับได้ ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 4 (Bajai and Singhal, 2009)

ตารางที่ 4.27 ผลทางสถิติของแบบจำลอง Quadratic และสมการถดถอยสำหรับค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

Std. Dev.	1.07	R ²	0.9031
Mean	36.79	Adj-R ²	0.8340
C.V.	2.91	Pred-R ²	0.7636
PRESS	19.61	Adeq Precision	11.570

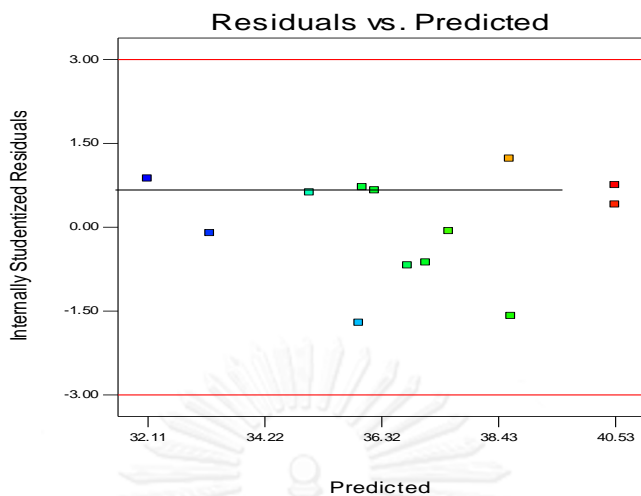
4.2.5.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอย (Diagnostics)

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่างๆได้แก่ การตรวจสอบส่วนตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก จ.3

4.2.5.3.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

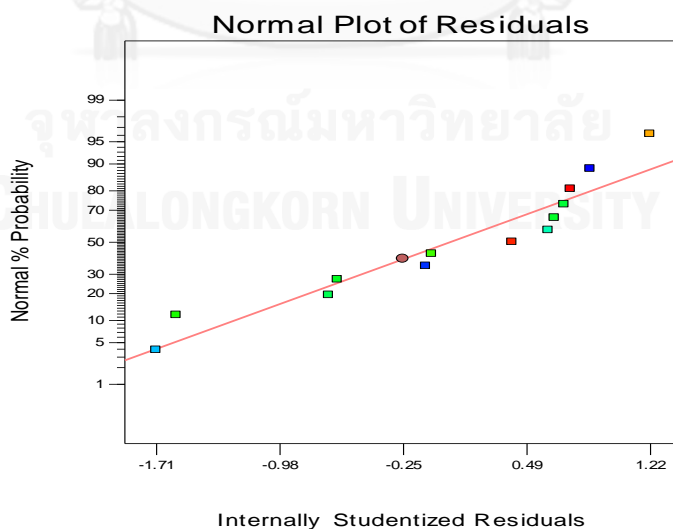
การตรวจสอบส่วนตกค้างสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plots)

การพล็อตส่วนตกค้างเป็นการตรวจสอบการขาดคุณสมบัติที่สำคัญอย่างใดอย่างหนึ่งของรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย อันได้แก่ ฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ความแปรปรวนของค่าความคาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ ความคาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน มีข้อมูลผิดปกติเกิดขึ้น และความคาดเคลื่อนมีการแจกแจงไม่เป็นแบบปกติ ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยการพล็อตแผนภาพการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (Predicted) ถ้าส่วนตกค้างอยู่ภายในแถบแนวนอน (Horizontal Band) และไม่เกินขีดจำกัด ± 3 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วิรัช พานิชวงศ์, 2546) ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอย

การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ เป็นการพล็อตส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง (Expected values) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย โดยพิจารณาจากพล็อตแผนภาพการกระจายกับสมการถดถอยที่ประมาณได้ ถ้าพล็อตแผนภาพการกระจายเข้าใกล้เส้นสมการถดถอยที่ประมาณได้ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยเชิงเส้นที่สร้างนั้นเหมาะสมกับข้อมูล (วิรัชช พานิชวงศ์, 2546) ดังภาพที่ 4.22

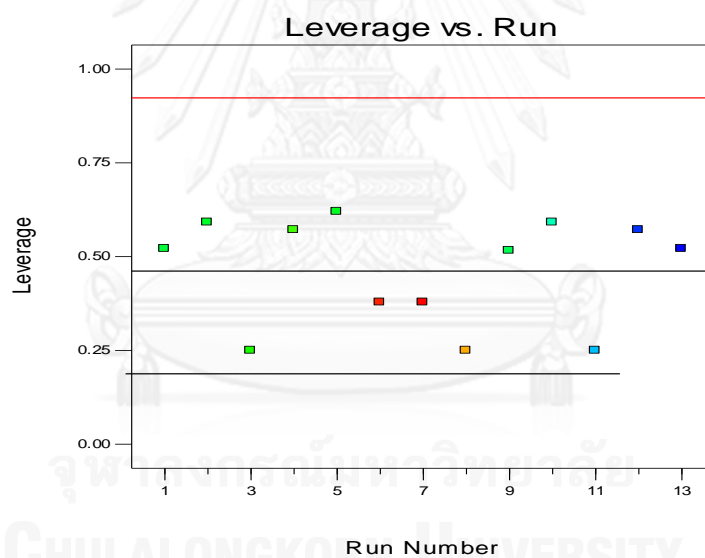


ภาพที่ 4.22 ความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอยระหว่างส่วนตกค้างที่เรียงลำดับคู่กับค่าคาดหวัง

4.2.5.3.2 การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษาเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อการประมาณแบบจำลองการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า leverage (h_{ii}) โดย $h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$ เมื่อ $p = k+1$ และ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอย k คือจำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง และ n คือ จำนวนการทดลอง (วีริชช พานิชวงศ์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า มีจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ตัว (p) จำนวนตัวแปรอิสระในแบบจำลอง 5 ตัว (k) และจำนวนการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง (n) ดังนั้น จะได้ค่า $h_{ii} \geq 0.9230$ แสดงว่า แบบจำลองการถดถอยไม่มีค่าผิดปกติจากปัจจัยที่ศึกษา เนื่องจากแผนภาพพล็อตการกระจายมีค่าไม่เกินค่า h_{ii} ดังภาพที่ 4.23



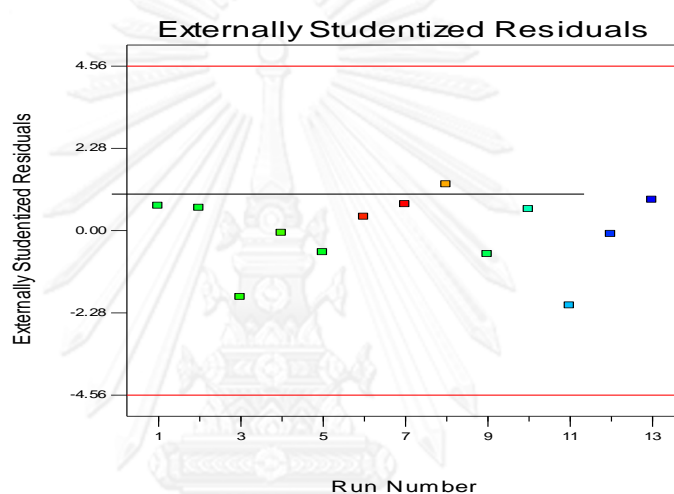
ภาพที่ 4.23 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของปัจจัยที่ศึกษา

4.2.5.3.3 การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง

การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริงเบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าใด โดยพิจารณาค่า Outlier (d_i) หรือ Externally Studentized Residuals และ ค่า Studentized Residuals (r_i) หากมากกว่าช่วง

กำหนดควบคุมจำกัด $|d_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ หรือ $|r_i| \geq t_{\alpha/2, n-k-1}$ จะถือว่าข้อมูลนั้นๆ เป็นค่าผิดปกติ เนื่องจากผลตอบสนอง จึงควรนำมาตรวจสอบด้วยว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่ เพื่อดำเนินการแก้ไข ปัญหาต่อไป(วีริชช พานิชวงค์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง ตาม ในแต่ละลำดับการทดลองนั้นอยู่ในช่วงกำหนดควบคุมจำกัดไม่เกิน ± 4.56 แสดงว่าไม่พบค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนอง ดังภาพที่ 4.24

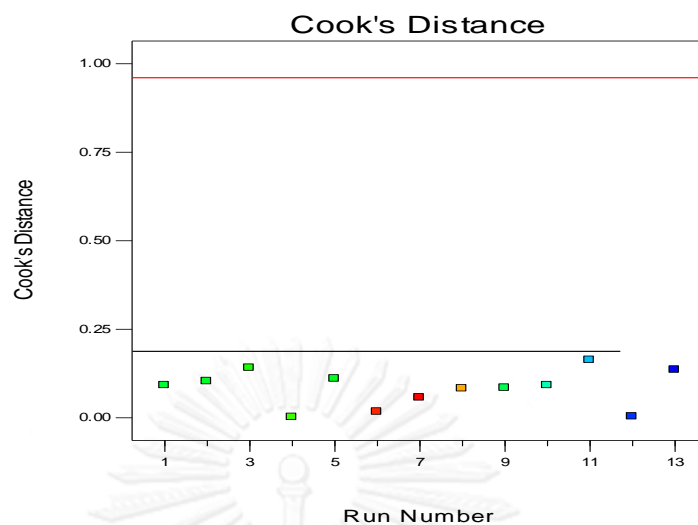


ภาพที่ 4.24 ค่าผิดปกติเนื่องจากผลตอบสนองกับลำดับการทดลอง

4.2.5.3.4 การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

พิจารณา Cook's Distance (D_i) เป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่างและสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i ดังนั้น ถ้า $D_i > F_{0.5, p, n-p}$ เมื่อ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองหรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล (วีริชช พานิชวงค์, 2546)

จากแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษา พบว่า Cook's Distance (D_i) มีค่าไม่เกิน 1 สามารถสรุปได้ว่าไม่พบค่ามีอิทธิพลหลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 Cook's Distance กับลำดับการทดลอง

4.2.6 การตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนทางทฤษฎี

4.2.6.1 การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์

การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ นั้นจะทำการตรวจสอบค่าพลังงานความร้อนทางทฤษฎีจากการคำนวณและเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนจากทฤษฎีกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาน ที่ 7.5 : 1.5 : 2 ก่อนทำการคาร์บอนไนซ์จะมีค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎีซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี

วัตถุดิบ	ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี ¹ (Kcal/Kg)	สัดส่วนโดยน้ำหนัก ² (Kg)	ค่าพลังงานความร้อนจากการคำนวณ (Kcal/Kg)
ต้นข้าวโพด	4,309.81	0.68	2,930.67
ซังข้าวโพด	4,309.81	0.14	6,03.37
แป้งมันสำปะหลัง	4,100.59	0.18	738.11
รวม		1	4,272.15

*หมายเหตุ ค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎี¹ นำมาจาก ตารางที่ 2.5 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552 และสัดส่วนโดยน้ำหนัก² คำนวณโดยกำหนดให้น้ำหนักโดยรวมของแท่งเชื้อเพลิงคือ 1 กิโลกรัม

2) เปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยจะเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนตามทฤษฎีจากข้อ 1) กับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยซึ่งไม่ได้ทำการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
แท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดก่อนทำการคาร์บอนไนซ์	ต้นข้าวโพด ซังข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง	7.5:1.5:2 (ต้นข้าวโพดต่อซังข้าวโพดต่อตัวประสาน)	4,272.15
ศิริสุข จินดารักษ์ และคณะ(2548)	ฟางข้าวและซังข้าวโพด	5:5 (ฟางข้าวต่อซังข้าวโพด)	5,802
เกรียงไกร วงศาโรจน์ (2553)	สับุดำผสม แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลังและซังข้าวโพด	7.5:10:15 (สับุดำต่อซังข้าวโพดต่อแป้งเปียก)	3,668
ชมธิดา ชื่นนิยม (2553)	ซังข้าวโพด	5:5 (ซังข้าวโพดต่อแป้งมันสำปะหลัง)	4,215.82

ตารางที่ 4.29 (ต่อ)การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	สัดส่วนที่เหมาะสม	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
น้องกุ้ง จันทสิทธิ์ และคณะ(2553)	- ผักตบชวาผสมอ้อย และแกลบ	4:0.5:0.5	5,397.3
	- ผักตบชวาผสมกะลา แกลบ และแป้งมัน	3:0.5:6:0.5	5,332.65
	- ผักตบชวาผสมกะลา อ้อย แกลบ และแป้งมัน	2:2:0.5:5:0.5	5,278.9
พรเทพ หอมผกา (2555)	กระดาศสำนักงาน และ มวลชีวภาพ	4:6	5,350
พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ(2556)	ลำต้นข้าวโพด น้ำเป็นตัวประสาน		1,724.55
Yaman และคณะ(2001)	ลิกไนต์ผสมชีวมวล		
	- เปลือกต้นสน		4,323
	- เปลือกผลมะกอก		5,111
	- ชี้อ้อย		3,988
	- เศษวัสดุจากโรงงาน กระดาศ		3,104
	- เศษวัสดุจากโรงงานฝ้าย		4,179
Oladeji (2010)	ซังข้าวโพด		4,992.83
	แกลบ		3,200.05
Oladeji (2011)	- ข้าวโพดสายพันธุ์ขาว		4,626.2
	- ข้าวโพดสายพันธุ์เหลือง		4,992.83
Oladeji (2012)	ซังข้าวโพด		4,992.83
	เปลือกถั่วลิสง		4,453.63
	แตงโม		5,231.12
	เปลือกมันสำปะหลัง		3,050.91
	เปลือกมันเทศ		4,146.27

จากตารางที่ 4.29 พบว่า ค่าพลังงานความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์จะมีค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 3,000 – 5,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงของค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว ซึ่งมีค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี คือ 4,272.15 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

4.2.6.2 การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอนไนซ์

ในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 90 นาที แท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าพลังงานความร้อน 4,689.43 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยนำมาจากตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม

จากนั้นนำค่าพลังงานความร้อนจากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนจากผลการทดลองกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยซึ่งได้ทำการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนหลังการคาร์บอนไนซ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	การคาร์บอนไนซ์	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
แท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพด	ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และ แป้งมันสำปะหลัง	มีการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที	4,689
จุฑามาศ บุษราคัมวดี (2547)	เหง้ำมันสำปะหลัง	มีการคาร์บอนไนซ์	6,281
วานิช ไสภาสพ และคณะ(2550)	- เปลือกถั่วลิสง - เปลือกเมล็ดทานตะวัน - เปลือกถั่วลิสงผสมเปลือกเมล็ดทานตะวัน	มีการคาร์บอนไนซ์	4,730 (ถ่านจากเปลือกเมล็ดทานตะวัน)
อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ(2551)	- ชี้เถ้าแกลบผสมชั่งข้าวโพด - ชี้เถ้าแกลบผสมกะลามะพร้าว	มีการคาร์บอนไนซ์	6,000-6,900
วันทนา สังข์ชุม และคณะ(2552)	เปลือกไม้เทียม แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน	มีการคาร์บอนไนซ์	5,014
อัจฉริยะ โชติจันทร์ (2555)	ไม้ยูคาลิปตัส	มีการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	7,314

ตารางที่ 4.30 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนหลังการคาร์บอนซ์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	การคาร์บอนซ์	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)
จุฬารัตน์ ชาวกำแพง (2554)	- ผงถ่านเหน้ามันสำปะหลังผสม ผงถ่านกะลามะพร้าว - ผงถ่านไม้รวมผสมผงถ่าน กะลามะพร้าว - ผงถ่านไม้รวมผสมผงถ่าน กะลามะพร้าว	มีการคาร์บอนซ์	>5,000
บัญญัติร์ โลจันนท์ และคณะ(2554)	ไมยราบยักษ์	มีการคาร์บอนซ์	5,432
Blesa และคณะ(2001)	ผงถ่านผสมซีเมนต์ - ซีเมนต์ - ฟาง - เปลือกผลมะกอก - เปลือกอัลมอนต์	มีการคาร์บอนซ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส	7,260 6,592 7,643 8,168
Angin (2013)	เปลือกเมล็ดดอกคำฝอย	มีการคาร์บอนซ์ ที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส	7,216

จากตารางที่ 4.30 พบว่า ค่าพลังงานความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงจากการทดลองที่ผ่านการคาร์บอนซ์จะมีค่าพลังงานความร้อน 4,689 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากเปลือกเมล็ดทานตะวัน แต่มีค่าน้อยกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น แท่งเชื้อเพลิงจากเหน้ามันสำปะหลัง แท่งเชื้อเพลิงจากเปลือกเมล็ดดอกคำฝอย เป็นต้น

ดังนั้น จากตารางที่ 4.29 และตารางที่ 4.30 พบว่า แท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ผ่านการคาร์บอนซ์จะให้ค่าพลังงานความร้อนที่มากกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนซ์ แต่มีค่าพลังงานความร้อนน้อยกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดอื่นจากผลการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิง

4.3.1 ต้นทุนในการผลิตแห่งเชื้อเพลิง แบ่งเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันดังนี้

1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาคงที่ ประกอบด้วย ค่าวัตถุดิบในการผลิต เช่น ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และมันสำปะหลัง

2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง ต้นทุนที่มีราคาแปรผันตามหน่วยที่ใช้ เช่นค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า โดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์การผลิตและค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ รายละเอียด ดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 ราคาต้นทุนแปรผันในการผลิตแห่งเชื้อเพลิง

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	หมายเหตุ
ต้นข้าวโพด	650 กิโลกรัม	1.3	บาทต่อกิโลกรัม
ชั่งข้าวโพด	175 กิโลกรัม	2	บาทต่อกิโลกรัม
แบ่งมันสำปะหลัง	175 กิโลกรัม	10	บาทต่อกิโลกรัม
ค่าไฟฟ้า	-	1.3576	อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 สำหรับ ส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร

4.3.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตแห่งเชื้อเพลิง

4.3.2.1 ต้นทุนคงที่ โดยแห่งเชื้อเพลิงก่อนผ่านการคาร์บอนไนซ์ มีน้ำหนักโดยรวมประมาณ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว จะได้แห่งเชื้อเพลิง น้ำหนักประมาณ 400 กิโลกรัม (ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อชั่งข้าวโพดต่อตัวประสาน ที่ 7.5:2:2 หรือ ประมาณ 650:175:175 กิโลกรัม ตามลำดับ) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ต้นข้าวโพด ราคา 1.3 บาท/กิโลกรัม จำนวน 680 กิโลกรัม
 ดังนั้น ราคารวมของต้นข้าวโพด คือ $680 \times 1.3 = 884$ บาท

2) ชั่งข้าวโพด ราคา 2 บาท/กิโลกรัม จำนวน 135 กิโลกรัม
 ดังนั้น ราคารวมของชั่งข้าวโพด คือ $135 \times 2 = 270$ บาท

3) แป้งมันสำปะหลัง ราคา 10 บาท/กิโลกรัม จำนวน 185 กิโลกรัม
 ดังนั้น ราคารวมของแป้งมันสำปะหลัง คือ $185 \times 10 = 1,850$ บาท

ราคารวมค่าวัตถุดิบในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านการคาร์บอนไนซ์ จะมีน้ำหนักประมาณ 400 กิโลกรัม คือ $884 + 270 + 1,850 = 3,004$ บาท หรือ 3 บาทต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.32 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตเชื้อเพลิง

รายการ	ราคา/หน่วย	จำนวนการใช้งาน	ราคารวม (บาท)	หมายเหตุ
ต้นข้าวโพด	1.3 บาท/กก.	680 กก.	884	
ซังข้าวโพด	2 บาท/กก.	135 กก.	270	
แป้งมันสำปะหลัง	10 บาท/กก.	185 กก.	1,850	
รวม		1,000 กก.	3,004	3 บาท/กก.

จากตารางที่ 4.31 ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงก่อนการคาร์บอนไนซ์ คือ 3 บาทต่อกิโลกรัม โดยแท่งเชื้อเพลิงก่อนการคาร์บอนไนซ์ 1,000 กิโลกรัม เมื่อผ่านการคาร์บอนไนซ์จะได้แท่งเชื้อเพลิงประมาณ 400 กิโลกรัม ดังนั้น ราคาต้นทุนคงที่ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว คือ $3,004 / 400 = 7.51$ บาทต่อกิโลกรัม

4.3.2.2 ต้นทุนแปรผัน คือ ค่าไฟฟ้าในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ต่อการคาร์บอนไนซ์ 1 ครั้ง ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 400 กิโลกรัม มีการคาร์บอนไนซ์ประมาณ 10 ครั้ง โดยคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงครั้งละประมาณ 40 กิโลกรัม ใช้เวลาครั้งละ 90 นาที โดยไม่รวมระยะเวลาที่เตาใช้ในการคลายความร้อน 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)

ค่าไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) เครื่องตัดและบด กำลังไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 8 ชั่วโมง/วัน

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $2.2 \times 8 \times 1.3576 = 23.9$ บาท/วัน

2) เครื่องอัดแท่ง กำลังไฟฟ้า 1.5 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 4 ชั่วโมง/วัน

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $1.5 \times 4 \times 1.3576 = 8.15$ บาท/วัน

3) เต้าเผา กำลังไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์ ระยะเวลาที่ใช้ 1.5 ชั่วโมง/วัน

จำนวนวันที่ใช้ 10 วัน (คาร์บอนไนซ์วันละ 1 ครั้ง)

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $15 \times 1.5 \times 1.3576 = 30.55$ บาท/วัน

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 400 กิโลกรัม

$30.55 \times 10 = 305.5$ บาท/400 กิโลกรัม

4) ตู้อบ กำลังไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ จำนวนชั่วโมงที่ใช้ในหนึ่งวัน 6 ชั่วโมง

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในหนึ่งวัน $2 \times 6 \times 1.3576 = 16.3$ บาท/วัน

ราคารวมค่าไฟฟ้าโดยประมาณในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมในหนึ่งวัน คือ

$23.9 + 8.15 + 305.5 + 16.3 = 353.85$ บาท/400 กิโลกรัม/วัน หรือ 0.88 บาท/กิโลกรัม/วัน ซึ่งมี

รายละเอียดการคำนวณค่าไฟฟ้างดตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.33 รายละเอียดการคำนวณค่าไฟฟ้า

รายการ	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	จำนวน เครื่อง	จำนวน ชั่วโมงที่ใช้ ในหนึ่งวัน (ชั่วโมง)	อัตราค่า ไฟฟ้า (บาท)	ค่าไฟฟ้า ที่ใช้ใน หนึ่งวัน (บาท)	หมายเหตุ
เครื่องตัดและบด	2.2	1	8	1.3576	23.9	ใช้เตาเผา 10 วัน
เครื่องอัดแท่ง	1.5	1	4	1.3576	8.15	ในการคาร์บอน
เตาเผา	15	1	1.5 (X 10)	1.3576	305.5	แท่งเชื้อเพลิง 400
ตู้อบ	2	1	6	1.3576	16.3	กิโลกรัม
รวม						353.85 บาท/400 กิโลกรัม หรือ 0.88 บาท/กิโลกรัม

หมายเหตุ อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 6 สำหรับ ส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร หน่วย
ละ 1.3576 บาท (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2543)

4.3.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (4.2)

$$A = \Sigma B + \Sigma Z \quad (4.2)$$

เมื่อ	A	คือ ต้นทุนในการผลิตในหนึ่งวัน (บาท/วัน/กิโลกรัม)
	B	คือ ค่าต้นทุนคงที่ในการผลิตหนึ่งวัน (บาท/วัน/กิโลกรัม)
	Z	คือ ค่าต้นทุนแปรผันในการผลิตหนึ่งวัน (บาท) ดังตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.34 ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม

รายการ	ราคา
ค่าต้นทุนคงที่ (วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต)	7.51บาท/กิโลกรัม
ค่าต้นทุนแปรผัน (ค่าไฟฟ้า)	0.88 บาท/วัน/กิโลกรัม
รวม	8.39 บาท/กิโลกรัม

จากตารางที่ 4.34 ต้นทุนในการผลิตในหนึ่งวันต่อน้ำหนักแท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านการคาร์บอน
ไนซ์ประมาณ 400 กิโลกรัม คือ $7.51 + 0.88 = 8.39$ บาท/กิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงทั้งสัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพดและตัวประสานที่เหมาะสมเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง รวมถึงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแท่งเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง คือ ต้นข้าวโพด ชั่งข้าวโพด และตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง นำปัจจัยทั้ง 3 มาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางและเลือกแบบจำลอง Quadratic พบว่า สัดส่วนโดยน้ำหนักของต้นข้าวโพดต่อชั่งข้าวโพดต่อตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าความทนแรงอัดสูง คือ 7.5:1.5:2 ซึ่งมีค่าความทนแรงอัดอยู่ที่ 0.356MPa และมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 365.15Kg/m³ ซึ่งสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต้องการนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยนำชั่งข้าวโพดและตัวประสานมาใช้ให้น้อยที่สุด และคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดลองต้องมีค่าความทนแรงอัดผ่านเกณฑ์ที่กำหนด คือ 0.350 MPa

5.1.2 การศึกษาอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน และร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิงนำปัจจัยทั้ง 2 มาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยเลือกการออกแบบส่วนประสมกลางและเลือกแบบจำลอง Quadratic พบว่า ในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 475 และเวลา 90 นาที มีความเหมาะสมที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง (4,689 Kcal/Kg และร้อยละ40.20

ตามลำดับ)โดยมีปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำ(ร้อยละ 7.45 และร้อยละ 5.54 ตามลำดับ) ขณะที่ปริมาณของแข็งรวม ปริมาณของแข็งระเหยและปริมาณคาร์บอนสูง (ร้อยละ 94.46 ร้อยละ 87.01 และร้อยละ 48.34 ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องตามวัตถุประสงค์งานวิจัยที่ต้องการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากต้นข้าวโพดที่ให้ค่าพลังงานความร้อนและร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง โดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่ำที่สุดในการคาร์บอนไนซ์แท่งเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการประหยัดเวลาและลดการใช้ทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

5.1.3 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง

ต้นทุนในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมโดยไม่คิดค่าลงทุนในอุปกรณ์การผลิตและค่าจ้างแรงงาน เนื่องจากเป็นการวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ คือ 8.39 บาท/กิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

5.2.1 ควรมีการศึกษาวิธีการบดย่อยวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงให้มีความละเอียดมากกว่า 2 มิลลิเมตร ทั้งในด้านความกว้างและความยาวของวัตถุดิบ เพื่อให้วัตถุดิบในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงสามารถผสมและยึดเกาะกันได้เพิ่มมากขึ้น และยังเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้กับแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการผลิต

5.2.2 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มวัตถุดิบชนิดอื่นที่มีค่าพลังงานความร้อนสูง เช่น กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว ซึ่งเกี่ยวข้องในการการผลิตแท่งเชื้อเพลิง เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีค่าพลังงานความร้อนที่สูงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน คือ 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.), 2547)

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 and Coke 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).
- Bajaj Ishwar และSinghal S. Rekha. (2009). Flocculation Properties of Poly(γ -Glutamic Acid) Produced from *Bacillus subtilis* Isolate. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 745-752.
- Blesa Jesus Maria Fierro Vanessa Miranda J.L. และMoliner Rafael. (2001). Effect of the pyrolysis process on the physicochemical and mechanical properties of smokeless fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 74(1), 1-17. doi: DOI: 10.1016/S0378-3820(01)00209-0
- Dilek Angin. (2013). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*, 128, 593-597.
- Husain Z Zainac Z และAbdullah Z. (2002). Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass and Bioenergy*, 22(6), 505-509.
- Meng Tao Gao Xia Zhang Jun Yuan Jinying Zhang Yuzhu และHe Jiasong. (2009). Graft copolymers prepared by atom transfer radical polymerization (ATRP) from cellulose. *Polymer*. In Susheel Kalia & M.W. Sabaa (Eds.), *Polysaccharide Based Graft Copolymers* (Vol. 50, pp. 447-454).
- Montgomery Douglas. (1991). *Design and Analysis of Experiments*.
- Oladeji J.T. (2010). Fuel Characterization of Briquettes Produced from Corncob and Rice Husk Residues. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1), 101-106.
- Oladeji J.T. (2011). Comparative Fuel Characterisation of Briquettes produced from Two Species of Corncob *Researcher*, 3(4), 1-4.

- Oladeji J.T. (2012). The Effects of Some Processing Parameters on Physical and Densification Characteristics of Corncob Briquettes. *International Journal of Energy Engineering*, 2(1), 22-27.
- Richards S.R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25, 89-100.
- Tarpey Thaddeus. (2000). A Note on the Prediction Sum of Squares Statistic for Restricted Least Squares. *The American Statistician* 54(2), 116-118.
- Yaman S Haykiri-Acma H Sesen K และKucukbayrak S. (2001). Fuel briquettes from biomass–lignite blends. *Food and Processing Technology*, 72(1), 1-8.
- Yumak HUcar T และSeyidbekiroglu N. (2010). Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source. *Journal of Biomass and Bioenergy*, 34, 630-636.
- เกรียงไกร วงศาโรจน์. (2553). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากลำต้นสับุดำ. (ปริญญาโท), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2555a). ดัชนีคุณภาพอากาศ. [Online]. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/air_aqi.htm [25 ธันวาคม 2555]
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2555b). รายงานสถานการณ์และการจัดการคุณภาพอากาศและเสียงปี 2554. กรุงเทพมหานคร:
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2552a). การใช้ชีวมวลในประเทศไทยระหว่างปี 2547-2552. [Online]. Available from: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=140%3A-2546-2551-&catid=58&Itemid=68&lang=th [23 กันยายน 2556]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2552b). ระบบรายงานศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [Online]. Available from: <http://biomass.dede.go.th/Symfony/web/map/district?year=2552> [25 ธันวาคม 2556]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2552c). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [Online]. Available from: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58&Itemid=68&lang=th [23 กันยายน 2556]
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2555). คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. กรุงเทพมหานคร.

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2543). อัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. [Online]. Available from: <http://www.meo.or.th/profile/index.php?l=th&tid=3&mid=259&pid=109> [15 พฤษภาคม 2557]
- กิตติ ยิ่งโยชน์ และไพลิน โลโท. (2548). การผลิตเชื้อเพลิงอัดก้อนจากขี้เลื่อยโดยการอัดรีดแบบไม่ใช้ความร้อน: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เจียมใจ เครือสุวรรณ ชาศริต โชติอมรศักดิ์ ภาคภูมิ รัตน์จิราณกุล และอรรพรรณ วิรัชท์เวษยันต์. (2551). รายงานฉบับสมบูรณ์: "โครงการการวิเคราะห์สภาพอากาศ และการเฝ้าระวังการเกิดมลภาวะอากาศ": ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- จุฑามาศ บุษราคัมวดี. (2547). สมบัติของถ่านอัดแท่งจากเห้งน้ำมันสำปะหลังโดยอ้างอิงถึงแหล่งวัตถุดิบขนาดผงและอัตราส่วนตัวประสาน.(ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จุฬารัตน์ ชวากำแพง. (2554). การศึกษาและพัฒนาถ่านอัดแท่งจากวัสดุการเกษตรเพื่ออุตสาหกรรมในครัวเรือน. (ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- โชคชัย เอกทัศนาวรรณ. (2547). การปลูกข้าวโพด. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชมธิดา ชื่นนิยม. (2553). การศึกษาการเพิ่มมูลค่าของเศษขี้ข้าวโพดโดยการทำให้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง. (ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ทวีศักดิ์ ใจคำสืบ. (2550). สถานการณ์หมอกควันในภาคเหนือตอนบน (Vol. 3, pp. 1-7): รายงานภาวะเศรษฐกิจการเงินภาคเหนือธนาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคเหนือ.
- ทัศนวิภา พัดเกาะ พัชรียา อัมพฤษ สุจิตรา กล้วยหอมไทย และชูลี โจนส์. (2556). ผลของหมอกควันไฟป่าต่อปริมาตรปอดและสมรรถภาพปอดในคนปกติสุขภาพดี. การประชุมทางวิชาการระดับชาติ พะเยาวิจัย ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยพะเยา.
- ธเรศ ศรีสถิตย์. (2553). วิศวกรรมการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพพร สายัมพล เรวัต เลิศฤทัยโยธิน รังสฤษดิ์ กาวีตะ และสนธิชัย จันท์เปรม. (2542). พืชเศรษฐกิจ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นรงค์ ฉิมพาลี. (2557). มวลสารสัมพันธ์. [Online]. Available from: <http://www.plan.lib.su.ac.th/chem/files/narong/Slide101/stoi56.pdf> [28 มกราคม 2557]
- น้องกุ้ง จันทสิทธิ์ พิสิษฐ์ สมจรรยา และวิภาวรรณ เอี่ยมอ่อง. (2553). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา. (ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นิคม แหลมสัก. (2551). การใช้ประโยชน์จากไม้โตเร็วเพื่อการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้เพื่อใช้ในครัวเรือน. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัญญัติ โลจามันท์อาทิตย์ พุทธิรักชาติ และจันสุดา คำตุ้ย. (2554). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 16(1), 20-31.
- เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป, เล่ม 112 C.F.R. (2538).

- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผ่องศรี เกียรติเลิศนภา. (2553). การสร้างและพัฒนาเครื่องมือวิจัย: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- พรเทพ หอมผกา. (2555). การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกระดาษสำนักงานและมวลชีวภาพ. (ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- พลวริน พลยัง. (2551). การพัฒนาเทียนหอมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. (ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พัฒนา มูลพฤกษ์. (2545). การป้องกันและควบคุมมลพิษ. กรุงเทพมหานคร: ชิกม่าดีไซน์กราฟฟิก.
- พิเชษฐ์ กรุดลอยมา และสุรพงษ์ ประสิทธิ์วิวัฒน์เสรี. (2550). พีชเศรษฐกิจ. [Online]. Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/north/plant/fcorn.html> [25 ธันวาคม 2556]
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. (2555). Extrusion. [Online]. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0311/extrusion-%E0> [28 มกราคม 2557]
- พิลาณี ไวถนอมสัจด์ย์ พิชาภัทร์ กุลมา วราภรณ์ อภิวัดนาภิวัด นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิดา ตังคณานุรักษ์. (2554). ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Remazol Brilliant Blue R (RBBR) ด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้สนและถ่านกัมมันต์ทางการค้าด้วยวิธีการหาพื้นผิวการตอบสนอง: วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิสิษฐ์ มณีโชติ บงกช ประสิทธิ์ ศรายุทธ วัชวุฒิ สมานชัย นุกุลเสาวลักษณ์ และวิกรานต์ วันสูงเนิน. (2556). ศักยภาพของลำต้นข้าวโพดมาเป็นเชื้อเพลิงชีว: วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- มงคล رایะนาคร. (2553). หมอกควันและมลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่: สถาบันศึกษานโยบายสาธารณะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. (2549). ชีวมวล *biomass*. กรุงเทพมหานคร: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. (2555). เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.
- รังสรรค์ อาภาคัพพะกุล. (2547). อดุณิยมหาวิทยาลัยเบ็องตัน. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รังสฤษดิ์ กาวีตะ ชูศักดิ์ จอมพุก จุฑามาต ร่มแก้ว และเรวัต เลิศฤทัยโยธิน. (2541). พฤกษศาสตร์พีชเศรษฐกิจ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วันทนา สังข์ชุม อุไรวรรณ วันทอง และสุธรรม ชุมพร้อมญาติ. (2552). รายงานการวิจัยการศึกษาถ่านอัดแท่งจากเปลือกไม้เทียม: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- วานิช โสภาสพ บุญยั้ง อินทรบุตร และสมพล พวงดอกไม้. (2550). การผลิตถ่านอัดแท่งด้วยเศษวัสดุเหลือใช้เพื่อเป็นพลังงานทดแทน. (ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยนเรศวร.

- วิจารณ์ สิมานายา. (2554). มลพิษจากหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือ: ปัญหาและแนวทางแก้ไข. การประชุมวิชาการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- วินัย ศรวัต. (2550). ข้าวโพด. [Online]. Available from: <http://oard3.doa.go.th/agriculture/pdfdata/dUrcNETTue111255.pdf> [27 พฤศจิกายน 2556]
- วิรัช พานิชวงค์. (2546). การวิเคราะห์การถดถอย. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ศิรินุช จินดาร์ักษ์ พร หมอนแพร ลอย ใจจูน และไพฑูริย์ ถาวรวงค์. (2548). แท่งเชื้อเพลิงเขียวจากฟางข้าวและซังข้าวโพด. วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ, 2(2), 78-90.
- ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ. (2549). สภาพที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา. (ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เสาวนีย์ นิลลักษณ์. (2551). การศึกษาองค์ประกอบอาหารที่เหมาะสมต่อการผลิตโปรตีนและซาเยสจาก *Bacillus sp.* ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติ. (ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย. (2555). สินค้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. วารสารธุรกิจอาหารสัตว์, 146 (กันยายน-ตุลาคม 2555), 13-18.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2556). ปริมาณพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. [Online]. Available from: <http://www.oae.go.th/download/prcai/DryCrop/maize.pdf> [25 ธันวาคม 2556]
- สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงใหม่. (2556). สถานการณ์ไฟป่าและหมอกควัน จังหวัดเชียงใหม่. [Online]. Available from: http://chiangmai.mnre.go.th/ewt_dl_link.php?nid=115 [25 ธันวาคม 2556]
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2544). ถ่าน: การผลิตที่ถูกต้องวิธีและประโยชน์. กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง (Vol. มผช.238/2547).
- สุพรชัย มั่งมีสิทธิ. (2555). เตาเผาถ่านอิฐดินดิบ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อนุวัตร แจ่มชัด. (2549). สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ ทีปกร คุณาพรวิวัฒน์ พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์ จักรพันธ์ กัณหา และวรพจน์ พันธุ์คง. (2551). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมซังข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- อัจฉริยะ โชติจันทร์. (2555). อิทธิพลของการปิดเตาผลิตถ่านที่อุณหภูมิการผลิตต่างกันต่อสมบัติของถ่าน. (ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(1)



(2)



(3)



(4)

ภาพที่ ก.1 ต้นข้าวโพด (1) ชั่งข้าวโพด (2) ต้นข้าวโพดบด (3)และชั่งข้าวโพดบด (4)



ภาพที่ ก.2 เครื่องตัดและบดย่อย



ภาพที่ ก.3 เครื่องอัดแท่งแบบเอ็กทรูชั่น (Extrusion)



ภาพที่ ก.4 เตาเผา



ภาพที่ ก.5 ตู้อบ







ภาคผนวก ข
ลักษณะแห่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY






ตารางที่ ข.1 แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	
1	3.3	2	2	
2	5	0	1	
3	5	0	2	
4	5	0	3	
5	5	4	1	


ตารางที่ ข.1 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	
6	5	4	2	
7	5	4	3	
8	7.5	0	2	
9	7.5	0	2	
10	7.5	2	0	ไม่สามารถขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงได้


ตารางที่ ข.1 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	
11	7.5	2	2	
12	7.5	2	2	
13	7.5	2	3.7	
14	7.5	5.4	2	
15	10	0	1	






ตารางที่ ข.1 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	
16	10	0	3	
17	10	4	1	
18	10	4	2	
19	10	4	3	
20	11.7	2	2	






ตารางที่ ข.2 แท่งเชื้อเพลิงหลังการขึ้นรูปในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 1 (การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วน)			แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
	ต้นข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ตัวประสาน	
1	7.5	2	2	
2	7.5	2	1.75	
3	7.5	1.5	2	
4	7.5	1.5	1.75	




ตารางที่ ข.3 แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
1	358.58	120	
2	400	60	
3	400	120	
4	400	180	
5	500	35.15	

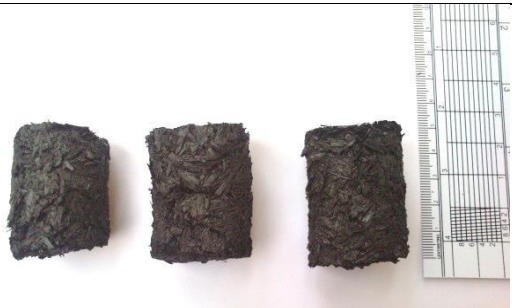



ตารางที่ ข.3 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
6	500	120	
7	500	120	
8	500	180	
9	500	204.85	
10	600	60	

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาท)	แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
11	600	120	
12	600	180	
13	641.42	120	

ตารางที่ ข.4 แท่งเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันในแต่ละการทดลอง ตอนที่ 2 (การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	แท่งเชื้อเพลิงในแต่ละการทดลอง
1	475	90	
2	475	100	
3	500	90	
4	500	100	



ภาคผนวก ค
วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค.1 การทดสอบค่าความทนแรงอัด (Compressive strength) ASTM D1621

มีวิธีการทดสอบ ดังนี้

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

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

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

ภาคผนวก ค.2 การทดสอบค่าความหนาแน่น (Density) มีวิธีการทดสอบ ดังนี้

- 1) วัดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิง
- 2) ชั่งน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง
- 3) คำนวณหาค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่ได้เป็นรูปทรงกระบอก จึงหาปริมาตรของรูปทรงกระบอก ได้จากสมการที่ (ค.2)

$$\rho = \frac{m}{\pi r^2 h} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	m	คือ น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิง (กรัม)
	r	คือ รัศมีของรูปทรงกระบอก ทางด้านหน้าตัดของแท่งเชื้อเพลิง (เซนติเมตร)
	h	คือ ความสูงของแท่งเชื้อเพลิง (เซนติเมตร)

ภาคผนวก ค.3 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

- 1) การหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์
 - 1.1) ชั่งน้ำหนักถ้วยเผาไหม้ (Combustion Capsule) แล้วใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดน้ำหนักประมาณ 1 กรัมลงในถ้วยเผาไหม้ชั่งน้ำหนักให้แยกธาตุถึง 1 มิลลิกรัม
 - 1.2) ตัดลวดยาวประมาณ 10 เซนติเมตร และวัดความยาวผูกที่ปลายทั้งสองของแท่งอิเล็กโทรดของฟาบอมบ์
 - 1.3) วางถ้วยเผาไหม้ที่ใส่กรดเบนโซอิกอัดเม็ดบนห่วงอิเล็กโทรดที่ติดอยู่ด้านในของฟาบอมบ์ จัดลวดให้อยู่ที่บริเวณผิวหน้าของกรดเบนโซอิกอัดเม็ด (ระวังอย่าให้ลวดแตะกับถ้วยเผาไหม้)

1.4) ชั่งน้ำหนักน้ำให้ได้ปริมาณ 2,000 มิลลิลิตรให้แยกธาตุถึง ± 0.01 กรัมใส่ลงในถังบรรจุบอมบ์ (Bucket)

1.5) ใส่ น้ำกลั่นลงในตัวบอมบ์ 1 มิลลิลิตรจากนั้นประกอบฝาบอมบ์เข้ากับตัวบอมบ์นำไปอัดก๊าซออกซิเจนที่ความดัน 450 ปอนด์/ตารางนิ้วนำไปวางในถังบรรจุบอมบ์เสียบสายอิเล็กทรอนิกส์โทรดเข้ากับขั้วทั้งสองของตัวบอมบ์และปิดฝาเครื่อง

1.6) เปิดสวิทช์แล้วกดปุ่ม F1 รอประมาณ 15 นาทีจนกระทั่งหน้าจอขึ้นคำว่า “stand by”

1.7) กดปุ่ม Start และเมื่อหน้าจอขึ้นคำว่า “sample ID” ให้พิมพ์ sample ID ที่ต้องการลงไปกดปุ่ม Enter เมื่อหน้าจอขึ้นคำว่า “sample wt.” ให้ใส่น้ำหนักของกรดเบนโซอิกอัดเม็ด (ตามที่ได้ชั่งมา) แล้วกดปุ่ม Enter จากนั้นเครื่องจะเริ่มทำงานโดยเครื่องจะมีเสียงสัญญาณสั้นๆหลายครั้งเมื่อมีการจุดระเบิด

1.8) รอจนกระทั่งมีเสียงสัญญาณครั้งที่สอง (ซึ่งเป็นเสียงยาว) กดปุ่ม done เครื่องจะพิมพ์ผลการทดลองออกมา

1.9) เปิดฝาเครื่องนำบอมบ์ออกจากถังบรรจุบอมบ์ปล่อยก๊าซออกจากตัวบอมบ์อย่างช้าๆจนกระทั่งหมด

1.10) ล้างฝาและตัวบอมบ์พร้อมด้วยถ้วยเผาไหม้ด้วยสารละลาย Methyl Orange (ซึ่งจะได้สารละลายสีแดง) จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองจึงหยุดล้างนำน้ำล้างที่ได้มาไตเตรตกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.0709 โมล/ลิตรสังเกตจุดยุติจากการที่สารละลายเปลี่ยนสีจากสีแดงไปเป็นสีเหลืองบันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ไป

1.11) วัดความยาวหลอดที่เหลือบันทึกค่า

โดยที่ค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ คำนวณได้จากสมการที่ (ค.3)

$$W = \frac{[(H)g + e_1 + e_2]}{t} \quad (\text{ค.3})$$

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 ของสารละลายไฮเดียมคาร์บอเนต 0.0709 โมล/ลิตร)
	e ₂	คือ การแก้ค่าความร้อนของลวด (แคลอรี) (มีค่าเท่ากับ 2.3 X ความยาว ของลวดที่ใช้เป็นเซนติเมตร)
	t	คือ อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งได้แก้ค่าเทอร์มิเตอร์แล้ว (องศาเซลเซียส)

2) การหาค่าความร้อนของตัวอย่าง

2.1) ชั่งน้ำหนักถ้วยเผาไหม้ (Combustion Capsule) แล้วเติมตัวอย่างประมาณ 1 กรัมลงในถ้วยเผาไหม้ชั่งน้ำหนักให้แยกธาตุถึง 1 มิลลิกรัม

2.2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับการหาค่ามาตรฐานของเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ตามข้อ 1.1) - 1.11)

ภาคผนวก ค.4 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ASTM D3173 มีวิธีทดสอบ ดังนี้

1) อบถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง นำเข้าโถดูดความชื้น

2) ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก

3) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้อง ชั่งน้ำหนัก

- 4) นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
- 5) นำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก

โดยที่ร้อยละของปริมาณความชื้น คำนวณได้จากสมการที่ (ค.4)

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W} \times 100 \quad (\text{ค.4})$$

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

ภาคผนวก ค.5 ปริมาณเถ้า (Ash Content) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553) 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 ชั่งน้ำหนักโดยที่ร้อยละของปริมาณเถ้า คำนวณได้จากสมการที่ (ค.5)

$$A = \frac{W_6 - W_5}{W} \times 100 \quad (\text{ค.5})$$

เมื่อ	A	คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)
	W_5	คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (Crucible) ก่อนเผา (กรัม)

W_6 คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้อง (Crucible) และตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ภาคผนวก ค.6 ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids) กรณี Dry basis คำนวณได้จากสมการที่ (ค.6) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)

วิธีการคำนวณ

$$V = 100 - A \quad (\text{ค.6})$$

โดย ในสภาวะ Wet basis จะต้องทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ เพื่อให้ได้ $T = A + V$ และ $W + A + V = 100\%$

เมื่อ V คือ ร้อยละของปริมาณของแข็งระเหยได้

T คือ ปริมาณของแข็งรวม

A คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

ภาคผนวก ค.7 ปริมาณคาร์บอน (Carbon) กรณี Dry basis คำนวณได้จากสมการที่ (ค.7) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)

วิธีการคำนวณ

$$C = \frac{V}{1.8} \quad (\text{ค.7})$$

เมื่อ V คือ ร้อยละของปริมาณของแข็งระเหยได้

C คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ภาคผนวก ค.8 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (Percent yield) คำนวณได้จากสมการที่ (ค.8) (นรงค์ ฉิมพาลี, 2557)

วิธีการคำนวณ

$$Y = \frac{Y_2}{Y_1} \times 100 \quad (\text{ค.8})$$

เมื่อ	Y	คือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์
	Y1	คือ น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)
	Y2	คือ น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงหลังทำการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)

ภาคผนวก ค.9 วิธีการประเมินราคาต้นทุนการผลิตแท่งเชื้อเพลิง มีวิธีการคำนวณ ดังนี้

$$A = \Sigma B + \Sigma Z \quad (\text{ค.9})$$

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

ซึ่งคำนวณ Z จากสมการที่ (ค.10)

$$Z = KW \times H \times 1.3576 \quad (\text{ค.10})$$

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



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ค่าความทนแรงอัด (MPa)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	0.455	0.454	0.465	0.458
2	0.149	0.145	0.144	0.146
3	0.383	0.379	0.378	0.380
4	0.068	0.066	0.058	0.064
5	0.052	0.055	0.061	0.056
6	0.327	0.324	0.318	0.323
7	0.146	0.142	0.132	0.140
8	0.315	0.311	0.313	0.313
9	0.305	0.309	0.307	0.307
10	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.354	0.352	0.344	0.350
12	0.352	0.355	0.364	0.357
13	0.117	0.113	0.103	0.111
14	0.264	0.262	0.278	0.268
15	0.088	0.087	0.080	0.085
16	0.076	0.076	0.067	0.073
17	0.043	0.044	0.057	0.048
18	0.165	0.163	0.155	0.161
19	0.187	0.188	0.177	0.184
20	0.096	0.096	0.078	0.090

ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความทนแรงอัดของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	ค่าความทนแรงอัด (MPa)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	0.356	0.359	0.359	0.358
2	0.355	0.353	0.344	0.351
3	0.354	0.354	0.359	0.356
4	0.354	0.352	0.349	0.352

ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ค่าความหนาแน่น (Kg/m ³)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	383.19	383.12	383.17	383.16
2	337.51	337.57	337.54	337.54
3	365.76	365.74	365.75	365.75
4	365.85	365.89	365.69	365.81
5	308.57	308.54	308.48	308.53
6	380.24	380.25	380.32	380.27
7	389.02	389.07	389.15	389.08
8	361.11	361.14	361.26	361.17
9	362.69	362.63	362.66	362.66
10	0.00	0.00	0.00	0.00
11	360.45	360.47	360.31	360.41
12	368.94	368.92	368.84	368.90
13	385.25	385.28	385.28	385.27
14	383.19	383.16	383.10	383.15
15	310.92	310.91	310.99	310.94
16	350.04	350.09	349.87	350.00
17	360.18	360.15	360.06	360.13
18	322.56	322.57	322.43	322.52
19	398.21	398.24	398.33	398.26
20	329.84	329.83	329.94	329.87

ตารางที่ ง.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบเย็นเย็นผล)

การทดลอง	ค่าความหนาแน่น (Kg/m ³)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	365.88	365.85	365.73	365.82
2	364.04	364.06	363.93	364.01
3	365.12	365.18	365.15	365.15
4	364.61	364.66	364.74	364.67

ตารางที่ ง.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	4327.2	4328.0	4327.5	4326.5	4327.3
2	4347.1	4346.7	4346.3	4345.5	4346.4
3	4570.2	4571.6	4571.8	4570.8	4571.1
4	4595.1	4593.7	4595.7	4594.3	4594.7
5	4352.8	4351.4	4353.2	4352.2	4352.4
6	4797.1	4797.9	4797.7	4798.5	4797.8
7	4804.3	4805.5	4804.1	4804.9	4804.7
8	4612.7	4611.5	4612.9	4613.7	4612.7
9	4458.1	4457.1	4458.8	4457.6	4457.9
10	4434.5	4435.1	4434.7	4436.1	4435.1
11	4402.8	4402.2	4401.6	4401.0	4401.9
12	4318.6	4318.8	4319.5	4318.7	4318.9
13	4285.9	4284.9	4285.4	4284.6	4285.2

ตารางที่ ง.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	ค่าพลังงานความร้อน (Kcal/Kg)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	4688.3	4689.5	4689.5	4690.4	4689.4
2	4728.5	4727.5	4728.9	4727.9	4728.2
3	4709.6	4708.4	4709.7	4708.8	4709.1
4	4737.3	4738.5	4738.4	4739.3	4738.4

ตารางที่ ง.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	36.28	36.14	36.88	36.74	36.51
2	36.07	35.95	37.23	37.36	36.65
3	37.59	37.49	36.85	36.79	37.18
4	37.68	37.56	37.39	37.32	37.49
5	36.67	36.77	36.62	36.72	36.70
6	40.24	40.30	41.41	41.53	40.87
7	40.81	40.91	41.43	41.51	41.16
8	39.94	40.00	39.58	39.53	39.76
9	36.53	36.59	36.05	35.97	36.28
10	35.06	34.98	35.86	35.92	35.46
11	33.91	34.05	34.62	34.74	34.33
12	33.65	33.61	32.62	32.76	33.16
13	32.57	32.45	32.40	33.60	32.75

ตารางที่ ง.8 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	40.27	40.11	40.29	40.13	40.20
2	40.23	40.41	40.19	40.37	40.30
3	40.06	40.22	40.17	40.03	40.12
4	40.42	40.24	40.28	40.46	40.35

ตารางที่ ง.9 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)				เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
1	6.06	6.02	6.07	5.93	6.02
2	6.09	6.05	5.94	6.04	6.03
3	5.80	5.84	5.83	5.93	5.85
4	5.81	5.87	5.87	5.81	5.84
5	6.05	5.97	6.08	5.98	6.02
6	5.56	5.48	5.43	5.53	5.50
7	5.57	5.49	5.42	5.52	5.50
8	5.54	5.46	5.59	5.53	5.53
9	5.94	5.98	5.87	5.81	5.90
10	5.81	5.91	5.85	5.87	5.86
11	5.92	5.98	5.82	5.96	5.92
12	5.96	6.00	6.06	6.02	6.01
13	6.17	6.05	6.14	6.20	6.14

ตารางที่ ง.10 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

การทดลอง	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)				เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
1	5.61	5.45	5.63	5.47	5.54
2	5.41	5.59	5.45	5.62	5.52
3	5.59	5.45	5.47	5.63	5.53
4	5.40	5.58	5.60	5.44	5.50

ตารางที่ ง.11 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง

การทดลอง	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	9.49	9.41	9.31	9.39	9.40
2	8.91	8.99	9.04	9.10	9.01
3	8.46	8.38	8.45	8.51	8.45
4	8.32	8.44	8.48	8.36	8.40
5	9.03	8.97	9.09	8.99	9.02
6	7.64	7.60	7.61	7.75	7.65
7	7.66	7.58	7.75	7.65	7.66
8	7.97	7.85	7.93	8.05	7.95
9	8.50	8.90	8.74	8.78	8.73
10	8.79	8.71	8.76	8.70	8.74
11	9.24	9.30	9.37	9.29	9.30
12	9.46	9.40	9.32	9.42	9.40
13	10.18	10.04	10.13	10.21	10.14

ตารางที่ ง.12 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง (การทดสอบบดบดบด)

การทดลอง	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
1	7.91	7.79	7.82	8.01	7.88
2	7.67	7.85	7.79	7.63	7.73
3	7.89	7.77	7.81	7.99	7.86
4	7.43	7.59	7.66	7.47	7.54



ภาคผนวก จ
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ จ.1 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าความทนแรงอัด

Diagnostics Case Statistics							
Run	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Studentized Residual	Cook's Distance	Outlier t
1	0.458	0.332	0.125	0.549	2.234	0.607	2.995
2	0.146	0.218	-0.072	0.622	-1.409	0.327	-1.493
3	0.380	0.310	0.070	0.282	0.989	0.038	0.988
4	0.064	0.155	-0.091	0.622	-1.777	0.520	-2.039
5	0.056	0.138	-0.082	0.586	-1.525	0.330	-1.652
6	0.323	0.308	0.015	0.282	0.206	0.002	0.196
7	0.140	0.231	-0.092	0.586	-1.712	0.415	-1.932
8	0.313	0.287	0.026	0.233	0.352	0.004	0.336
9	0.257	0.287	-0.031	0.233	-0.420	0.005	-0.402
10	0.000	-0.025	0.025	0.614	0.474	0.036	0.455
11	0.350	0.363	-0.013	0.358	-0.198	0.002	-0.188
12	0.357	0.363	-0.006	0.358	-0.094	0.000	-0.089
13	0.111	0.052	0.059	0.614	1.137	0.206	1.156
14	0.268	0.193	0.075	0.606	1.435	0.318	1.528
15	0.085	0.053	0.033	0.708	0.725	0.127	0.707
16	0.073	0.051	0.023	0.708	0.502	0.061	0.483
17	0.048	0.015	0.032	0.589	0.603	0.052	0.583
18	0.161	0.217	-0.056	0.280	-0.789	0.024	-0.773
19	0.184	0.170	0.013	0.589	0.250	0.009	0.238
20	0.090	0.142	-0.052	0.580	-0.959	0.127	-0.955

ตารางที่ จ.2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าพลังงานความร้อน

Diagnostics Case Statistics							
Run	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Studentized Residual	Cook's Distance	Outlier t
1	4327.30	4379.18	-51.882	0.520	-1.215	0.267	-1.266
2	4346.40	4299.39	47.012	0.591	1.192	0.342	1.236
3	4571.10	4585.15	-14.053	0.249	-0.263	0.004	-0.245
4	4594.70	4546.01	48.687	0.570	1.205	0.321	1.252
5	4352.40	4396.34	-43.939	0.619	-1.155	0.362	-1.188
6	4797.80	4766.77	31.035	0.378	0.638	0.041	0.608
7	4804.70	4766.77	37.935	0.378	0.780	0.061	0.755
8	4612.70	4636.50	-23.800	0.249	-0.445	0.011	-0.418
9	4457.90	4487.38	-29.479	0.515	-0.687	0.084	-0.658
10	4435.10	4398.47	36.630	0.591	0.929	0.207	0.918
11	4401.90	4501.99	-100.086	0.249	-1.873	0.194	-2.454
12	4318.90	4280.59	38.305	0.570	0.948	0.199	0.940
13	4285.20	4261.57	23.635	0.520	0.553	0.055	0.524

ตารางที่ จ.3 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของร้อยละของผลิตภัณฑ์

Diagnostics Case Statistics							
Run	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Studentized Residual	Cook's Distance	Outlier t
1	36.51	35.98	0.526	0.520	0.710	0.091	0.682
2	36.65	36.21	0.447	0.591	0.652	0.102	0.623
3	37.18	38.66	-1.480	0.249	-1.594	0.140	-1.849
4	37.49	37.54	-0.054	0.570	-0.076	0.001	-0.071
5	36.70	37.12	-0.421	0.619	-0.636	0.110	-0.607
6	40.87	40.53	0.338	0.378	0.400	0.016	0.375
7	41.16	40.53	0.632	0.378	0.748	0.056	0.721
8	39.76	38.63	1.132	0.249	1.219	0.082	1.272
9	36.28	36.80	-0.513	0.515	-0.689	0.084	-0.660
10	35.46	35.03	0.422	0.591	0.615	0.091	0.586
11	34.33	35.92	-1.592	0.249	-1.715	0.162	-2.084
12	33.16	33.24	-0.079	0.570	-0.112	0.003	-0.104
13	32.75	32.11	0.641	0.520	0.864	0.135	0.847

ตารางที่ จ.4 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

Test of Homogeneity of Variances			
Levene Statistic	df ₁	df ₂	Sig.
0.016	3	12	0.997

การทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูล (ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5606.572	3	1868.857	3.323	0.057
Within Groups	6748.812	12	562.401		
Total	12,355.384	15			

ตารางที่ จ.5 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยืนยันผล)

Test of Homogeneity of Variances			
Levene Statistic	df ₁	df ₂	Sig.
0.509	3	12	0.683

การทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูล (ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.127	3	0.042	3.230	0.061
Within Groups	0.156	12	2.013		
Total	0.283	15			

ตารางที่ จ.6 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของปริมาณความชื้นของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยี่นยี่นผล)

Test of Homogeneity of Variances			
Levene Statistic	df ₁	df ₂	Sig.
0.404	3	12	0.753

การทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูล(ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.003	3	0.001	3.333	0.056
Within Groups	0.004	12	0.0003		
Total	0.007	15			

ตารางที่ จ.7 ผลการวิเคราะห์ One-way ANOVA ของปริมาณเถ้าของแท่งเชื้อเพลิง
(การทดสอบยี่นยี่นผล)

Test of Homogeneity of Variances			
Levene Statistic	df ₁	df ₂	Sig.
0.099	3	12	0.959

การทดสอบความสัมพันธ์ของข้อมูล(ANOVA)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.304	3	0.101	3.156	0.064
Within Groups	0.384	12	0.032		
Total	0.688	15			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศกลธน ราโชกาญจน์ เกิดวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบญจมเทพอุทิศจังหวัดเพชรบุรี และระดับปริญญาวิทยา ศาสตร์บัณฑิต (ชีววิทยา) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเข้าศึกษาต่อใน ระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY