ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246778

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากลำต้นสบู่ดำ

นายเกรียงไกร วงศาโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

b00251760

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246778

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากลำต้นสบู่ดำ

นายเกรียงไกร วงศาโรจน์ วท.บ. (ฟิสิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธาน วงศ์ศริเวช ..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร. ประธาน วงศ์ศริเวช)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ. ดร. นริส ประทินทอง)

..... กรรมการ
(รศ. ดร. มานะ อมรกิจบำรุง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลจากลำต้นสบู่ดำ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเกรียงไกร วงศาโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี
	ผศ. ดร. นริส ประทินทอง
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สายวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

246778

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน โดยที่วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการทดลอง คือ ลำต้นและกิ่งของสบู่ดำนำไปผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ อันได้แก่ แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด ตัวประสานที่ใช้มี 2 ชนิด คือ แป้งเปียก และกากน้ำตาล เพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะวัตถุดิบให้ติดเป็นแท่งเชื้อเพลิงซึ่งสัดส่วนการผสมวัตถุดิบต่อตัวประสาน คือ 80 : 15 และ 85 : 20 ซึ่งก่อนทำการผสมตัวประสานลงไป วัตถุดิบจะถูกบดด้วยเครื่องบดจนมีขนาดเล็กกว่า 3 mm สัดส่วนในการผสมสบู่ดำต่อวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ คือ 75 : 10, 65 : 20, 55 : 30, 45 : 40, 70 : 10, 60 : 20, 50 : 30 และ 40 : 40 ขึ้นกับเงื่อนไขของการทดลอง การวิจัยเริ่มจากการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันตามสัดส่วนที่กำหนด หลังจากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานแรงกด จากผลการทดลองพบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสบู่ดำ และที่อัตราส่วนผสมเดียวกันแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน ค่าความหนาแน่น และค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานจะมีค่าต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน โดยที่ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 11.54 - 15.36 MJ/kg ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1142 – 1565 kg/m^3 และมีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ระหว่าง 0.46 -2.46 MPa สัดส่วนการผสมที่ทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือการผสมสบู่ดำต่อซังข้าวโพดต่อแป้งเปียกเป็น 75 : 10 : 15 สำหรับสัดส่วนที่ทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดคือการผสมสบู่ดำต่อซังข้าวโพดต่อกากน้ำตาลเป็น 40 : 40 : 20 นอกจากนี้ในงานวิจัยขั้นต่อมาได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้ขนาดของตัวส่งกำลังเป็นครึ่งหนึ่งของเครื่องอัดแท่งชีวมวลที่ใช้ในการ

246778

ทดลองตอนแรก แล้วทำการทดลองผลิตแท่งชีวมวลโดยใช้สัดส่วนการผสมระหว่างสบู่ดำต่อซัง-ข้าวโพดต่อแป้งเปียกเป็น 75 : 10 : 15 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ได้ค่าความร้อนสูงที่สุด พบว่าค่าความร้อน ค่า-ความหนาแน่น และค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตโดยเครื่องอัดแท่งชีวมวลที่ใช้ในการทดลองตอนแรกซึ่งช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้ อีกทั้งยังทำการศึกษาถึงรูปร่างลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบค่า Gasification Efficiency ของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละรูปร่างลักษณะ จากผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีรูกลวงตรงกลางเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด

คำสำคัญ: กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน/ตัวประสาน/แท่งเชื้อเพลิงชีวมวล/สบู่ดำ

Thesis Title	Study of Biomass Production from a Trunk of Jatropha
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Kriengkrai Wongsaroj
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Thanit Swasdisevi
	Asst. Prof. Dr. Naris Pratinthong
Program	Master of Science
Field of Study	Energy Technology
Department	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2553

Abstract

246778

The objectives of this research was to study the production of biomass briquette by extrusion technique. Raw materials used in this work were the trunk and the branch of jatropha mixed with the waste product from postharvest such as rice husk, bagasse, cassava shell and corncob. Two type of glutinous mass used as the binder was made from powder and molasses. They are throughly mixed to fuel particles with the mass ratio of fuel particles to binder as 80 : 15 and 85 : 20. Before mix with the binder, the raw materials was reduced the dimension by the grinder until they were smaller than 3 mm. The mass ratios between the jatropha and the waste product from postharvest that used in this experiment were 75 : 10, 65 : 20, 55 : 30, 45 : 40, 70 : 10, 60 : 20, 50 : 30 and 40 : 40 depend on each testing condition. After produce biomass briquettes were carried out under various coditions, its properties in terms of heating value, density and compressive strength were investigated and found that heating value increased with an increase in the jatropha particles. At the same mixture ratio, the heating value of the briquette used powder as the binder was slightly higher than that one used the molasses. The density and compressive strength of the briquette used powder as binder was lower than that one used the molasses. The heating value of the briquette were in the range of 11.54 - 15.36 MJ/kg. The density and the compressive strength of the briquette were in the range of 1142 – 1565 kg/m^3 and 0.46-2.46 MPa respectively. The highest heating value of the briquette was produced at mass ratios of the jatropha to the corncob to powder binder as 75 : 10 : 15 while the highest compressive strength briquette was produced at the mass ratios of the jatropha to corncob to molasses binder as 40:40:20. In the second part of this research, the extrusion machine

246778

design and constructed with power of motor 5 kW which is less than the power of the extrusion machine that used in the first part 5 kW. It was found that the suitable ratio of jatropha : concob : powder binder were 75 : 10 : 15. The heating value obtained from this ratio was highest. It should be noted that the heating value, density and compressive strength of the briquette were close to those properties obtain from the extrusion machine with the motor power of 10 kW used in the first part of experiment. For energy consumption, it was found that the extrusion machine constructed with power of motor 5 kW has energy consumption rate less than the extrusion machine constructed with power of motor 10 kW. Finally part, the shape of biomass briquette that suitable for using in gasification process was investigated. It found that the briquettes in cylindrical shape that has the hole through its center was the most proper for gasification process.

Keywords: Binder/ Biomass briquette/ Extrusion/Jatropha

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต สวัสดิ์เสวี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำวิจัยนี้ รวมถึงขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นริส ประทินทอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และนอกจากนี้อยากจะขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ประธาน วงศ์ศริเวช ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัยตลอดจนตรวจแก้ไขโครงการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณวัดพยัคฆาราม จังหวัดสุพรรณบุรีในการเอื้อเฟื้อให้ใช้งานเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงผู้อำนวยการ และเจ้าหน้าที่ของกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตรที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องบดย่อยวัสดุเพื่อใช้ในการบดย่อยวัสดุชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยมาตลอด ขอขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดค่าความร้อน

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณแรงบันดาลใจ กำลังใจ และความห่วงใยจาก นางสาว พรรณนิภา ขุนเที่ยงธรรม

สุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ กลุ่มวิจัยการคำนวณและประยุกต์ทางด้านของไหลและพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัยนี้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ง
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
รายการตาราง		ญ
รายการรูปประกอบ		ฑ
รายการสัญลักษณ์		ด
บทที่		
1. บทนำ		**1**
1.1	ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3	ขอบเขตการวิจัย	1
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		**3**
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล	3
2.2	การผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล	5
2.2.1	การอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล (การอัดเปียก)	5
2.2.2	การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากผักตบชวา	7
2.3	ตัวประสาน	8
2.4	สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง	10
2.4.1	ความต้านทานแรงกด	10
2.4.2	ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง	11
2.4.3	ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง	14
2.5	ส่วนประกอบและค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส	15
2.5.1	Proximate Analysis	16

หน้า

2.5.2 Ultimate Analysis 16

2.6 กระบวนการแกซิฟิเคชัน 18

2.6.1 การเผา 18

2.6.2 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 18

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 21

3.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง 21

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง 21

3.1.2 ตัวประสานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง 23

3.2 อุปกรณ์การทดลอง 24

3.3 ขั้นตอนการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิง 24

3.4 การทดลองที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน 25

3.4.1 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสานแป้งเปียก 25

3.4.2 อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบเมื่อใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน 26

3.5 การทดลองที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน 28

3.5.1 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสานกากน้ำตาล 28

3.5.2 อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบเมื่อใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน 29

3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง 32

3.7 การออกแบบสร้างเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเอ็กซ์ทรูชัน
และทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิง 33

3.7.1 การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็ง 33

3.7.2 การคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย 35

3.7.3 การคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย 51

3.8 การศึกษารูปร่างของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะกับการใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 52

4. ผลการทดลอง 53

4.1 ผลการทดลองการอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล 53

4.1.1 ผลการทดลองที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน
(อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสาน) 53

4.1.2 ผลการทดลองที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน (อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบ) 54

หน้า

4.1.3 ผลการทดลองที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน (อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสาน) 60

4.1.4 ผลการทดลองที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน (อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบ) 61

4.2 ผลการทดลองสมรรถนะเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่สร้างขึ้น 66

4.3 ผลการศึกษารูปร่างของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะกับการใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 71

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 77

5.1 สรุปผลการทดลอง 77

5.1.1 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสานแป้งเปียก 77

5.1.2 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสานกากน้ำตาล 77

5.1.3 อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบ 78

5.1.4 การเปรียบเทียบระหว่างตัวประสานแป้งเปียก และกากน้ำตาล 79

5.2 การทดสอบสมรรถนะเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้น 80

5.3 การศึกษารูปร่างลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะกับการนำไปใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 80

5.4 ข้อเสนอแนะ 80

เอกสารอ้างอิง 82

ภาคผนวก

ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง 84

ข. แผนภูมิขั้นตอนการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 101

ค. รูปแบบของสกรู และเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง 106

ง. ผลงานการตีพิมพ์และนำเสนอผลงาน 118

ประวัติผู้วิจัย 137

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ระยะเวลาของการอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในอัตราส่วนผสมต่างๆ	6
2.2	การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบ Proximate Analysis	16
2.3	การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบ Ultimate Analysis	17
2.4	ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้จากแหล่งผลิตต่างๆ	17
2.5	ส่วนประกอบ (Composition) และค่าความร้อน (Heating Value) จากโปรดิวเซอร์-แก๊สที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นไม้และถ่านไม้	17
3.1	ค่า Proximate Analysis ของวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง	21
3.2	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน	25
3.3	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพด ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	26
3.4	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	26
3.5	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อย ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	26
3.6	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	27
3.7	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพด ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	27
3.8	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	27
3.9	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อย ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	28
3.10	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	28

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

3.11	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน	29
3.12	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	29
3.13	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลังซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	30
3.14	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	30
3.15	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %	30
3.16	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	31
3.17	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลังซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	31
3.18	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	31
3.19	เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %	32
3.20	ผลสรุปของการคำนวณสกรูในช่วงการอัด	50
3.21	ผลการคำนวณกำลังงานที่ใช้ในการขับสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง	51
4.1	เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นกับเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อที่ 3.3	71
4.2	องค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลรูปร่างลักษณะต่างๆ	74
4.3	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลรูปร่างลักษณะต่างๆ	74
4.4	องค์ประกอบของแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นใหม่	75

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

4.5 เปรียบเทียบองค์ประกอบของแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลลักษณะรูปร่างทรงกระบอกกลวงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นใหม่และผลการทดลองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 76

ก.1 ผลค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ระหว่างสบู่ดำกับตัวประสานแป้งเปียก 85

ก.2 ผลค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนการผสมต่างๆ ระหว่างสบู่ดำกับตัวประสานกากน้ำตาล 85

ก.3 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 86

ก.4 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลังซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 86

ก.5 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 87

ก.6 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15% 87

ก.7 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 88

ก.8 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลังซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 88

ก.9 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 89

ก.10 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 89

ก.11 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 90

ก.12 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลังซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 90

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

ก.13 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้กากน้ำตาล เป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 91

ก.14 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้กากน้ำตาล เป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % 91

ก.15 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้ กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 92

ก.16 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 92

ก.17 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและชานอ้อยซึ่งใช้กากน้ำตาล เป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 93

ก.18 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและแกลบซึ่งใช้กากน้ำตาล เป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % 93

ก.19 สมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตจากสบู่ดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้แป้งเปียก เป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 % โดยผลิตด้วยเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นใหม่ 94

ก.20 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกมีรูกลวงตรงกลาง 95

ก.21 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเล็กมีรูกลวงตรงกลาง 96

ก.22 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตัน 97

ก.23 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะแบบอัดเป็นแท่งเกลียว 98

ก.24 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นก้อนทรงสี่เหลี่ยมตัน 99

ก.25 สมบัติและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นชิ้นไม้ที่สับเป็นเหลี่ยม 100

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงเขียวแบบสกรู	5
2.2	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบสกรูชนิดเกลียวตัวหนอน	8
2.3	เครื่องทดสอบ UTM (Universal Testing Machine)	11
2.4	การชั่งบนตาชั่งดิจิตอล	12
2.5	การผูกลวดชนวน	12
2.6	ถังออกซิเจน และการเติมออกซิเจน	12
2.7	การนำบอมบ์ใส่ลงใน Bucket	13
2.8	บอมบ์แคลอรีมิเตอร์	14
2.9	การหาค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง	15
3.1	ลักษณะของเครื่องบดย่อยวัสดุ	22
3.2	ลักษณะของวัตถุดิบที่ผ่านการบด	22
3.3	ลักษณะของกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.4	ลักษณะของตัวประสานแป้งเปียกที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.5	ลักษณะการวางแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบการต้านทานแรงกด	32
3.6	ลักษณะโครงสร้างหลักในการสร้างเครื่องอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน	34
3.7	ลักษณะสกรูที่ใช้ในงานอัดโพลิเมอร์ทั่วไป	35
3.8	ลักษณะสกรูที่ใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงในงานวิจัย	35
3.9	รูปแบบสกรู และตัวแปรที่กำหนด	36
3.10	ลักษณะการลดความสูงของฟันเกลียวในช่วงการอัด	42
3.11	ลักษณะปริมาตรในร่องเกลียวอัด	47
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อตัวประสานแป้งเปียก	53
4.2	ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้	54
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15	54

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15 55

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15 56

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 57

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 58

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 59

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อตัวประสานโมลาส 60

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15 61

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15 62

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 15 62

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 63

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 64

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงกับสัดส่วนการผสมสบู่ดำต่อวัสดุชีวมวลต่างๆ ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 20 65

4.16 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ทดลองในหัวข้อ 3.4-3.5 (ขนาด10 แรงม้า) 66

4.17 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ทำการสร้างขึ้นใหม่ (ขนาด5 แรงม้า) 66

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.18 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล ที่ทำการสร้างขึ้นใหม่ 67

4.19 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง ที่สร้างขึ้นใหม่ (5 แรงม้า) กับเครื่องอัดที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป(10 แรงม้า) 68

4.20 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่ง-เชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นใหม่ (5 แรงม้า) กับเครื่องอัดที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป (10 แรงม้า) 68

4.21 เปรียบเทียบค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง ที่สร้างขึ้นใหม่ (5 แรงม้า) กับเครื่องอัดที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป (10 แรงม้า) 69

4.22 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกมีรูกลวงตรงกลาง 72

4.23 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกขนาดเล็กมีรูกลวงตรงกลาง 72

4.24 ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงรูปทรงกระบอกตัน 72

4.25 เชื้อเพลิงที่ถูกอัดเป็นแท่งเกลียว 73

4.26 แท่งเชื้อเพลิงที่ถูกอัดเป็นก้อนทรงสี่เหลี่ยมตัน 73

4.27 เชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นชิ้นไม้สับเป็นเหลี่ยม 73

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่, m^2
B	ความกว้างของร่องเกลียวที่วัดตามแนวสกรู, m
b	ความหนาของฟันเกลียว, m
c	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg·K
D	ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง, kg/m^3
D_b	เส้นผ่านศูนย์กลางของ barrel, m
$\bar{D}_{bi}$	ความสูงของฟันเกลียวเฉลี่ย, m
D_{bi-1}	ความสูงของฟันเกลียวตำแหน่งที่พิจารณามาก่อนแล้ว, m
D_{bi}	ความสูงของฟันเกลียวตำแหน่งที่กำลังพิจารณา, m
D_m	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย, m
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู, m
e	ค่าปรับแก้ค่าความร้อนของลวดชนวน, Cal/cm
F	แรงที่กดลงบนแท่งเชื้อเพลิง, N
f_b	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผิวของ barrel, "ไร้หน่วย"
f_s	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผิวของสกรู, "ไร้หน่วย"
g	น้ำหนักตัวอย่างของเชื้อเพลิง, kg
H	ความลึกของร่องเกลียวสกรู, m
HHV	ค่าความร้อนสูงของแท่งเชื้อเพลิง, MJ/kg
HHV_g	ค่าความร้อนสูงของแก๊ส, MJ/kg
HHV_{bio}	ค่าความร้อนสูงของชีวมวล, MJ/kg
K	ตัวแปรสมมติ, "ไร้หน่วย"
M	มวลของแท่งเชื้อเพลิง, kg
M_1	ตัวแปรสมมติ, "ไร้หน่วย"
M_2	ตัวแปรสมมติ, "ไร้หน่วย"
M_3	ตัวแปรสมมติ, "ไร้หน่วย"
M_{Total}	ตัวแปรสมมติ, "ไร้หน่วย"
$\dot{M}_s$	อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิง, kg/min
m	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์, kg

N	ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง, rpm
P	ความดันที่กระทำกับเบดอนุภาคของชีวมวล, N/m^2
P_1	ความดันของเบดอนุภาคชีวมวลที่ตำแหน่งทางเข้าของร่องเกลียว, N/m^2
P_2	ความดันของเบดอนุภาคชีวมวลที่ตำแหน่งทางออกของร่องเกลียว, N/m^2
P_w	กำลังงานที่ใช้ในการหมุนร่องเกลียวสกรู, kW
p	จำนวนปากของเกลียวสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง, ปาก
Q	ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, MJ/kg
S	ระยะพิชของฟันเกลียวสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง, m
T_1	อุณหภูมิน้ำก่อนการเผาไหม้, °C
T_2	อุณหภูมิน้ำหลังการเผาไหม้, °C
ΔT	อุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น, °C
V	ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง, m^3
V	ปริมาตรของร่องเกลียว, m^3
V_b	ความเร็วของ barrel, m/s
W_b	ความกว้างระหว่างฟันเกลียวสกรูในแนวเอียงที่ตำแหน่งยอดฟันสกรู, m
W_m	ความกว้างระหว่างฟันเกลียวสกรูเฉลี่ยในแนวเอียงระหว่างโคน และยอดฟันสกรู, m
W_s	ความกว้างระหว่างฟันเกลียวสกรูในแนวเอียงที่ตำแหน่งโคนฟันสกรู, m
Z_b	ความกว้างของ barrel ตามแนวแกนสกรู, m
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
θ	มุมขนถ่ายเบดอนุภาคของชีวมวล, degree
ϕ_b	มุมเอียงของฟันสกรูที่ตำแหน่งยอดฟันสกรู, degree
ϕ_m	มุมเอียงของฟันสกรูเฉลี่ยระหว่างโคน และยอดฟันสกรู, degree
ϕ_s	มุมเอียงของฟันสกรูที่ตำแหน่งโคนฟันสกรู, degree