

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองในอุตสาหกรรมน้ำตาล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Production of Biomass Pellets from Filter Cake in Sugar Industry



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

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองใน อุตสาหกรรมน้ำตาล
โดย	นายจิรโรจน์ โสภณอรุณรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ลีละวัฒน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์)	

จิรโรจน์ โสภณอรุณรัตน์ : การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองใน  
อุตสาหกรรมน้ำตาล. ( Production of Biomass Pellets from Filter Cake in Sugar  
Industry) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจาก  
ส่วนผสมของกากหม้อกรองและกากอ้อยเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน วิธีการวิจัยเริ่มต้นจากการนำ  
กากหม้อกรองมาผสมกับกากอ้อยที่สัดส่วนต่างๆ แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดชีวมวลขนาด 10 มม. เมื่อ  
ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงเหล่านั้นกับเกณฑ์ มอก. 2772-2560 ผลการวิจัย  
พบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ที่ความชื้น 10% มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุด โดย  
มีค่าความร้อน 13.15 MJ/kg และมีปริมาณเถ้า 14.67 % เมื่อนำไปทดลองใช้ด้วยการต้มน้ำเดือด  
ในเตาครัวเรือน (Water Boiling Test, WBT) พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง  
20%, 30%, และ 40% ความชื้น 10% ใช้ต้นทุนเชื้อเพลิงใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.22 ถึง 0.23 บาท ซึ่ง  
มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้การนำกากหม้อกรองไปผลิตเป็นเม็ดชีวมวลยังช่วยลด  
ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากหม้อกรองและสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนสำหรับอุตสาหกรรม  
น้ำตาลคิดเป็นผลประหยัด 2,000 บาทต่อตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270037121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Renewable Energy, Biomass Fuel Pellets, Bagasse, Sugarcane filter cake

Jiraroj Sophonarunrat : Production of Biomass Pellets from Filter Cake in Sugar Industry. Advisor: Assoc. Prof. Dr. JITTRA RUKIJKANPANICH

The objective of this research was to determine the suitable proportion of biomass pellet fuel from a mixture of sugarcane filter cake and bagasse for use as renewable energy. The research methodology was mixing the filter cake with bagasse at various proportions and then extruded it into 10 mm diameter biomass fuel pellets. When comparing the properties of those pellets with the criteria of TIS 2772-2560, the results showed that a 20% of filter cake at 10% moisture gave the most suitable physical properties with a heating value of 13.15 MJ/kg and an ash content of 14.67 %. According to experiments by boiling water with a household stove (Water Boiling Test, WBT), it was found that cost of biomass pellets at 20%, 30%, and 40% of filter cake at 10% moisture was 0.22 to 0.23 baht, which was economically worthwhile. In addition, to produce biomass pellets also reduces the cost of disposal of filter cake and can be used as an alternative energy for the sugar industry, saving 2,000 baht per ton.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตรา รุ่งกิจพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ ลีละวัฒน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ที่กรุณาเสียสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล และคุณพศธร ชุนโอษฐ์ นักวิทยาศาสตร์ ประจำศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงและค่าปริมาณถ่านสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จิรโรจน์ โสภณอรุณรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานที่ศึกษา .....	6
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	8
1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย.....	8
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.7 ตัวแปรที่ศึกษา.....	9
1.8 ตัวชี้วัดความสำเร็จ.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	11
2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย.....	11
2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ .....	11
2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์.....	16
2.2 เชื้อเพลิงชีวมวล .....	18
2.2.1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวมวล .....	19

2.2.2 การแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นพลังงาน .....	22
2.2.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง .....	22
2.3 การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	23
2.3.1 การอัดร้อนที่ความดันสูง.....	23
2.3.2 การอัดเย็นที่ความดันต่ำ .....	26
2.3.3 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย.....	26
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.4.1 งานวิจัยด้านเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้ทางการเกษตรและปศุสัตว์.....	27
2.4.2 งานวิจัยด้านเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้ในอุตสาหกรรม .....	29
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย .....	30
3.1 แผนงานวิจัย .....	30
3.1.1 ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง .....	31
3.1.2 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง .....	31
3.1.3 ขั้นตอนการศึกษาค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต .....	33
3.1.4 ขั้นตอนการนำชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองไปต้มน้ำกับเตาในครัวเรือน .....	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	36
3.3 วิธีทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	40
3.3.1 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value - ASTM D 5865).....	40
3.3.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture - ASTM D 3173).....	41
3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter - ASTM D 3175).....	41
3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash - ASTM D 3174).....	42
3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) .....	42
3.3.6 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density - ASTM E873).....	43
3.3.7 การวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิง (Average length - PFI Standard) .....	43



3.3.8 การวิเคราะห์ค่าความคงทน (Durability - PFI Standard) .....	44
3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณผงฝุ่น (Fines - PFI Standard) .....	45
3.4 ตัวแปรที่ศึกษา .....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล .....	46
4.1 ผลการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ .....	47
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	51
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	51
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	58
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	65
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	65
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	70
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	75
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	79
4.4 ผลการศึกษาค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต .....	84
4.5 ผลการศึกษากการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน .....	85
4.5.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อน .....	85
4.5.2 ผลการทดลองระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด .....	95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	103
5.1.1 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากส่วนผสมกากหม้อกรองและกากอ้อย ....	103
5.1.2 การพยากรณ์วัตถุดิบที่เหมาะสมตามเป้าหมายเกณฑ์ มอก. 2772-2560 .....	106
5.1.3 การทดสอบต้มน้ำเดือด .....	106
5.1.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ .....	107
5.1.5 การเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ .....	109

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	109
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก ผลวิเคราะห์ค่าความร้อนและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	111
ภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์คุณสมบัติกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	132
ภาคผนวก ค การคำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	142
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดกับเตาในครัวเรือน.....	149
รายการอ้างอิง .....	156
บรรณานุกรม.....	162
ประวัติผู้เขียน.....	164



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของกากหม้อกรอง.....	3
ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบของกากอ้อย.....	3
ตารางที่ 1.3 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิงกากหม้อกรองอัดเม็ดจากการทดลองนำร่องกับกากอ้อย .....	5
ตารางที่ 1.4 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	10
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย .....	27
ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง .....	32
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองต้มน้ำเดือดด้วยเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	34
ตารางที่ 3.3 การทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามมาตรฐาน ASTM C702-98.....	40
ตารางที่ 4.1 ผลการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด .....	48
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	53
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%.....	54
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%.....	56
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	60
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% .....	61
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%.....	63
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	67
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความหนาแน่นรวมเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	68
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	72
ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความยาวเฉลี่ยเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	73
ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	77
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความคงทนเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	78

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	82
ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณผงฝุ่นเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	83
ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	88
ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 10%).....	90
ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 15%).....	92
ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	97
ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% .....	98
ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% .....	100
ตารางที่ 5.1 สรุปคุณลักษณะค่าความร้อนและปริมาณเถ้า.....	104
ตารางที่ 5.2 สรุปคุณลักษณะทางกายภาพ.....	105
ตารางที่ 5.3 การพยากรณ์เป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากสมการถดถอย.....	106
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะเวลาต้มน้ำเดือด.....	107
ตารางที่ 5.5 สรุปผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์จากการทดสอบต้มน้ำเดือด.....	108
ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	109
ตารางที่ ก.1 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนและองค์ประกอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%.....	130
ตารางที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนและองค์ประกอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%.....	131
ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20%.....	133
ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 30%.....	134
ตารางที่ ข.3 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 40%.....	135
ตารางที่ ข.4 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50%.....	136
ตารางที่ ข.5 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 60%.....	137
ตารางที่ ข.6 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 70%.....	138

ตารางที่ ข.7 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 80% .....	139
ตารางที่ ข.8 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 90% .....	140
ตารางที่ ข.9 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% .....	141
ตารางที่ ค.1 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน .....	142
ตารางที่ ค.2 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ .....	143
ตารางที่ ค.3 น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ความชื้น 10% .....	145
ตารางที่ ค.4 น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ความชื้น 15% .....	146
ตารางที่ ค.5 ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตที่ความชื้น 10% .....	147
ตารางที่ ค.6 ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตที่ความชื้น 15% .....	148
ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 1 .....	150
ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 2 .....	151
ตารางที่ ง.3 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 3 .....	152
ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 1 .....	153
ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 2 .....	154
ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 3 .....	155

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 พื้นที่จัดเก็บกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษา.....	1
รูปที่ 1.2 ปริมาณกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษาในปีการผลิต 2559 ถึง 2563.....	2
รูปที่ 1.3 แผนผังผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ .....	2
รูปที่ 1.4 การลดความชื้นกากหม้อกรองด้วยการตากแดด .....	4
รูปที่ 1.5 การอัดขึ้นรูปกากหม้อกรองด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวล.....	4
รูปที่ 1.8 กากอ้อย .....	7
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ .....	11
รูปที่ 2.2 การสกัดน้ำอ้อย.....	12
รูปที่ 2.3 การทำใส่น้ำอ้อย.....	14
รูปที่ 2.4 หม้อกรองแบบสุญญากาศ.....	14
รูปที่ 2.5 การต้มระเหยน้ำอ้อย.....	15
รูปที่ 2.6 การเคี้ยวตกผลึก.....	16
รูปที่ 2.7 กระบวนการละลายน้ำตาลดิบ และลดค่าสีน้ำเชื่อม.....	17
รูปที่ 2.8 การเคี้ยว และปั่นผลึกน้ำตาลทรายขาว-รีไฟน์ .....	18
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนต่ำกับความชื้นในชีวมวลประเภทเศษไม้ .....	19
รูปที่ 2.10 เครื่อง Bomb Calorimeter.....	20
รูปที่ 2.11 เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ .....	25
รูปที่ 2.12 เครื่องอัดแบบวงแหวน .....	25
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนแผนงานวิจัย .....	30
รูปที่ 3.2 การเตรียมกากหม้อกรองในการทดลองนำร่อง .....	31
รูปที่ 3.3 การชั่งน้ำหนักภาชนะและน้ำก่อนทำการทดลองต้มน้ำ.....	35

รูปที่ 3.4 การทดสอบการต้มน้ำเดือด (Water boiling test) .....	36
รูปที่ 3.5 เครื่องผสมแบบลูกเต๋า .....	36
รูปที่ 3.6 เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวนหรือแนวตั้ง .....	36
รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งแบบพิคติน้ำหนักสูง .....	37
รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งแบบละเอียด .....	37
รูปที่ 3.9 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง .....	37
รูปที่ 3.10 บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ .....	38
รูปที่ 3.11 Thermogravimetric Analyzer .....	38
รูปที่ 3.12 เตาอบ .....	38
รูปที่ 3.13 เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาดรู 3.15 mm .....	39
รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความชื้นอัตโนมัติ .....	39
รูปที่ 3.15 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ .....	39
รูปที่ 3.16 เตาในครัวเรือน .....	40
รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	44
รูปที่ 4.1 การทดลองอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10% .....	47
รูปที่ 4.2 การซ่อมบำรุงเครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบวงแหวน .....	50
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ค่าความร้อนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	51
รูปที่ 4.4 Normal probability plot ของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	52
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% .....	55
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% .....	58
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ปริมาณเถ้ากับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	59
รูปที่ 4.8 Normal probability plot ของปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	59
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% .....	62
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% .....	64

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมกับสัดส่วนกากหม้อกรอง.....	65
รูปที่ 4.12 Normal probability plot ของความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	66
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความยาวเฉลี่ยกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	70
รูปที่ 4.14 Normal probability plot ของความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	71
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความคงทนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	75
รูปที่ 4.16 Normal probability plot ของความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	76
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงฝุ่นกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	80
รูปที่ 4.18 Normal probability plot ของปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	81
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	85
รูปที่ 4.20 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบต้มน้ำเดือด.....	86
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสัดส่วนต่างๆ .....	86
รูปที่ 4.22 Normal probability plot ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	87
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% .....	91
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% .....	94
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระยะเวลาต้มน้ำเดือดกับสัดส่วนกากหม้อกรอง .....	95
รูปที่ 4.26 Normal probability plot ของระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	96
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% .....	100
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% .....	102
รูปที่ ก.1 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1....	112
รูปที่ ก.2 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2....	113
รูปที่ ก.3 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3....	114
รูปที่ ก.4 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1....	115



- รูปที่ ก.5 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2.... 116
- รูปที่ ก.6 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3.... 117
- รูปที่ ก.7 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1.... 118
- รูปที่ ก.8 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2.... 119
- รูปที่ ก.9 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3.... 120
- รูปที่ ก.10 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1.. 121
- รูปที่ ก.11 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2.. 122
- รูปที่ ก.12 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3.. 123
- รูปที่ ก.13 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1 124
- รูปที่ ก.14 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2 125
- รูปที่ ก.15 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3 126
- รูปที่ ก.16 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1 127
- รูปที่ ก.17 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2 128
- รูปที่ ก.18 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3 129

## บทที่ 1

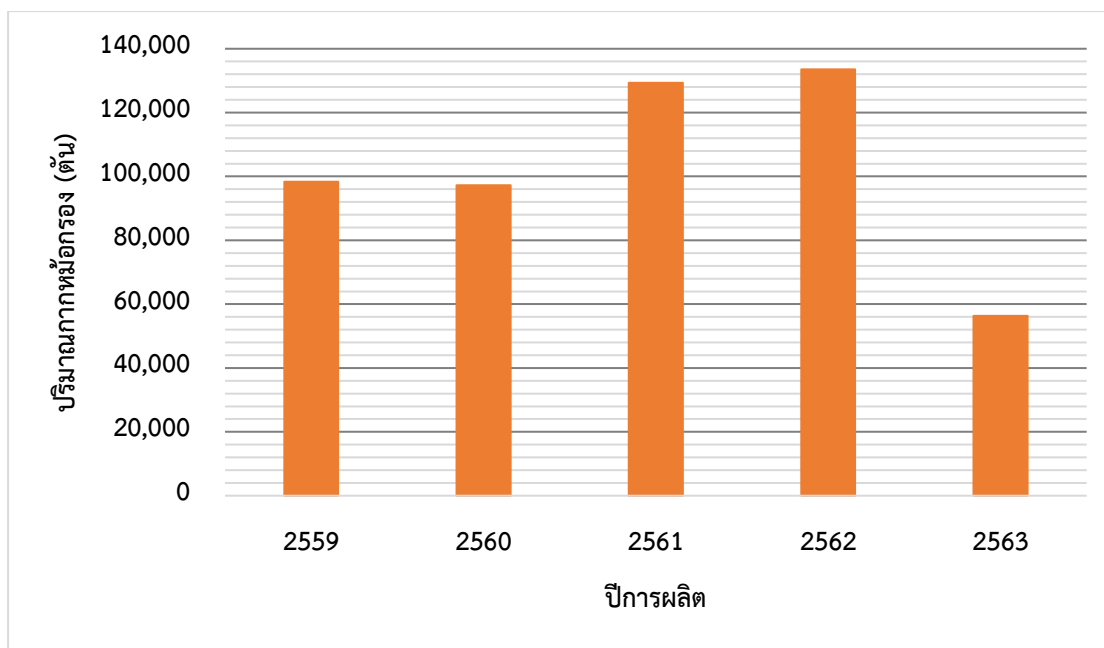
### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายของไทย เป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีบทบาทต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ประเทศไทยยังคงเป็นผู้ผลิตน้ำตาลรายใหญ่ที่สุดในภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ มีปริมาณอ้อยในฤดูการผลิต 2563 เท่ากับ 75 ล้านตัน (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2563) กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบเป็นการแปรรูปอ้อยให้เป็นน้ำตาลทรายดิบเพื่อใช้ในการส่งออกหรือเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลทรายขาวเพื่อใช้บริโภค จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ ได้แก่ กากอ้อยใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อไอน้ำ กากน้ำตาลใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ และกากหม้อกรองซึ่งนิยมเป็นสารบำรุงดินหรือแปรรูปเป็นปุ๋ยอินทรีย์แก่เกษตรกร โดยปริมาณกากหม้อกรองในแต่ละฤดูการผลิตคิดเป็นร้อยละ 3-4 ของปริมาณอ้อยทั้งหมด (Campiteli, et al., 2018) เมื่อกากหม้อกรองเหลือจากความต้องการของเกษตรกรที่นำไปเป็นสารบำรุงดินหรือปุ๋ยอินทรีย์ในไร้อ้อย โรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากหม้อกรองเฉลี่ย 1,300 บาทต่อตัน อารมณ์ วงษ์วิจารณ์ และคณะ (2543) ได้อธิบายว่าการจัดเก็บก่อนทำการขนย้ายด้วยวิธีกองในที่โล่ง แฉงยังส่งผลกระทบต่อปัญหาสภาพแวดล้อม ดังจะเห็นได้จากพื้นที่จัดเก็บกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษาในรูปที่ 1.1 จากข้อมูลการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาระหว่างปีการผลิต 2558 ถึง 2562 มีปริมาณกากหม้อกรองเฉลี่ยปีละ 100,000 ตันต่อปี ซึ่งมากกว่าความต้องการของเกษตรกรที่ใช้เป็นสารบำรุงดินเฉลี่ยปีละ 20,000 ตันต่อปี ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 1.2

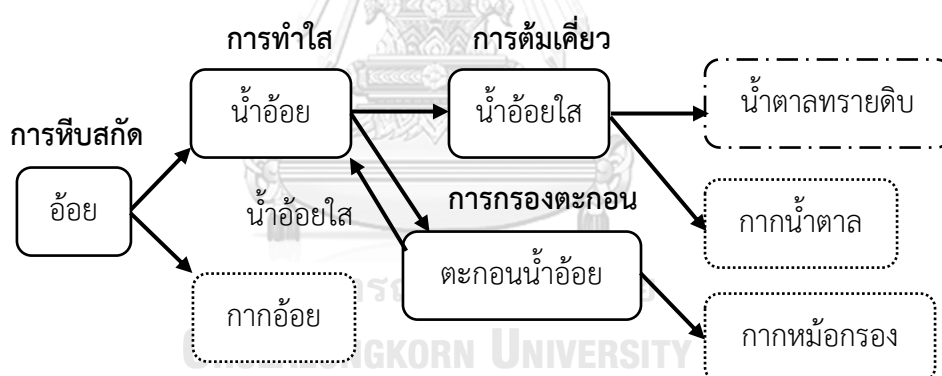


รูปที่ 1.1 พื้นที่จัดเก็บกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษา



หมายเหตุ : ปีการผลิต 2563 มีปริมาณกากหม้อกรองลดลง เนื่องจากปริมาณอ้อยลดลงจากปัญหาภัยแล้ง

รูปที่ 1.2 ปริมาณกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษาในปีการผลิต 2559 ถึง 2563



รูปที่ 1.3 แผนผังผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ

จากปัญหากากหม้อกรองส่วนเกินข้างต้น อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในประเทศไทยจึงนิยมแปรรูปเป็นปุ๋ยอินทรีย์ โดยประโยชน์ของปุ๋ยจากกากหม้อกรอง ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของดิน, เพิ่มอินทรีย์วัตถุ, ปรับสภาพดินให้ร่วนซุย, เพิ่มการระบายน้ำและอากาศในดิน, เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ และช่วยการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชของดินได้นานขึ้น (Wongkoon, Boonlue, and Riddech, 2014) แต่ในเชิงปฏิบัติเกษตรกรพบปัญหาการใช้งานปุ๋ยอินทรีย์จากกากหม้อกรอง เพราะการใส่ปุ๋ยอินทรีย์เห็นผลช้ากว่าปุ๋ยเคมีและควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชให้ตรงเวลาที่พืชต้องการได้ยาก อีกทั้งยังมีธาตุอาหารน้อยและสัดส่วนไม่แน่นอนต้องใช้ปริมาณมากจึง

จะเพียงพอกับความต้องการของพืช (Dotaniya, et al., 2016) จากปัญหาข้อเสียของปุ๋ยอินทรีย์ ประกอบกับความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ผลิตน้ำตาลทรายขาว-รีไฟน์นอกฤดูหีบอ้อยซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนำเข้าจากภายนอกเพิ่มเติม ทางโรงงานกรณีศึกษาจึงมีแนวคิดเพิ่มมูลค่ากากหม้อกรองมาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำเช่นเดียวกับกากอ้อย เนื่องจากมีส่วนประกอบของเส้นใยจำพวกลิกโนเซลลูโลสซึ่งมีคุณสมบัติการติดไฟเช่นเดียวกัน (Salmeia, et al., 2016) เมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยของกากหม้อกรองจากตารางที่ 1.1 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15 ถึง 30 ของน้ำหนักกากหม้อกรอง (Rossel, Costa, and Rabelo, 2015) เปรียบเทียบกับกากอ้อยจากตารางที่ 1.2 (Karp, et al., 2013) จะพบว่ากากอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในอุตสาหกรรมน้ำตาลในปัจจุบันมีปริมาณเส้นใยมากกว่ากากหม้อกรองประมาณ 3 เท่า

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของกากหม้อกรอง

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง
ไซ	4 - 14
เส้นใย	15 - 30
น้ำตาล	1 - 15
โปรตีน	5 - 15
เถ้า	9 - 20
SiO <sub>2</sub>	4 - 10
CaO	1 - 4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1 - 3
MgO	0.5 - 1.5

ตารางที่ 1.2 องค์ประกอบของกากอ้อย

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง
เส้นใย (เซลลูโลส, ลิกนิน, เฮมิเซลลูโลส)	93.2
เถ้า	2.2
อื่นๆ	4.6

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการทดลองนำกากหม้อกรองมาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ แต่ยังไม่พบปัญหาปริมาณเถ้าของกากหม้อกรองหลงเหลือจากการเผาไหม้ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 14.5 เมื่อเทียบ

กับกากอ้อยคิดเป็นร้อยละ 2.4 และปัญหาด้านการขนส่งกากหม้อกรองซึ่งมีลักษณะน้ำหนักเบาทำให้เสียต้นทุนในการขนส่ง แต่เมื่อพิจารณาประโยชน์ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การกำจัดกากหม้อกรองด้วยวิธีการเผาไหม้จะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศซึ่งปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาคิดเป็น 21 เท่าเมื่อเทียบเป็นหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (George, et al., 2010) งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองนำร่องเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษามาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยการนำกากหม้อกรองมาลดความชื้นด้วยการตากแดดให้มีความชื้นเริ่มต้นจาก 50% ลดลงเหลือ 20% ดังรูปที่ 1.4 จากนั้นจึงนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวล ดังรูปที่ 1.5 เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด และนำไปวิเคราะห์ค่าความร้อน และค่าการวิเคราะห์แบบประมาณซึ่งแสดงในตารางที่ 1.3 จากผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นปริมาณเถ้าของกากหม้อกรองของโรงงานกรณีศึกษาสูงกว่ากากอ้อยที่เป็นเชื้อเพลิงหลักในปัจจุบันประมาณ 25 เท่าซึ่งเป็นปริมาณที่อาจส่งผลกระทบต่อหม้อไอน้ำ



รูปที่ 1.4 การลดความชื้นกากหม้อกรองด้วยการตากแดด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 1.5 การอัดขึ้นรูปกากหม้อกรองด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

ตารางที่ 1.3 การเปรียบเทียบเชื้อเพลิงกากหม้อกรองอัดเม็ดจากการทดลองนำร่องกับกากอ้อย

ผลวิเคราะห์	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	กากหม้อกรอง	กากอ้อย	วันที่ทดสอบ
ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	5.22	8.62	23/7/2563
ความชื้น	ASTM D3172-3175	%	17.75	52.82	
ปริมาณสารระเหย		%	26.74	39.01	
ปริมาณเถ้า		%	51.70	2.12	
คาร์บอนคงตัว		%	3.81	6.05	

จากปัญหาที่พบจากงานวิจัยที่ศึกษาและการทดลองนำร่อง งานวิจัยนี้จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มคุณภาพของเชื้อเพลิงโดยการผสมกากหม้อกรองกับกากอ้อย แล้วทำการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับกากอ้อย และศึกษาการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อประโยชน์ในการขนส่งและจัดเก็บ ซึ่งการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีข้อดีด้านการขนส่งและจัดเก็บ อีกทั้งมีประโยชน์ต่อการควบคุมระบบการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำเพราะเชื้อเพลิงมีขนาดมาตรฐาน มีน้ำหนักแน่นอน และส่งผลให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์ในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย พ.ศ. 2560 – 2564 ที่กำหนดกลยุทธ์ส่งเสริมการผลิตพลังงานทดแทนและอุตสาหกรรมชีวภาพจากอ้อยและน้ำตาลทราย (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2561)

จากแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2561 - 2580) ด้านการเกษตรชีวภาพมีการส่งเสริมให้นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและพลังงานที่เกี่ยวข้องกับชีวภาพ เนื่องจากพลังงานชีวมวลจัดอยู่ในกลุ่มของพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไปสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยจึงเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่สามารถนำมาใช้แทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่จำกัดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำมันดิบ หรือ ถ่านหิน เป็นต้น อีกทั้งจากปัญหาความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการขยายตัวของสังคมและเศรษฐกิจซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางพลังงาน เชื้อเพลิงชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่จะส่งเสริมด้านความมั่นคงของพลังงาน เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในด้านเศรษฐกิจทั้งปัจจุบันและในอนาคตได้เพียงพอ เมื่อพิจารณาจากปริมาณชีวมวลในประเทศไทยจะพบว่ามีปริมาณมากเป็นอันดับ 2 รองจากประเทศอินโดนีเซียในกลุ่มประเทศอาเซียน ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานทดแทนที่จะช่วยตอบสนองความต้องการด้านพลังงานภายในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคต อีกทั้งช่วยเพิ่มการใช้ทรัพยากรได้อย่าง

คุ่มค่าและลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยแนวโน้มอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมีโอกาสดิบโตเนื่องจากปัจจัยหนุนด้านความต้องการของตลาดต่างประเทศที่มีมากขึ้นแรงผลักดันจากนโยบายของหลายประเทศที่ต้องการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น สหภาพยุโรปที่มีเป้าหมายภายใน พ.ศ. 2563 ให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 20 และประเทศญี่ปุ่นภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่ฟูกูชิม่า ทางรัฐบาลได้นำแผนยุทธศาสตร์ชีวมวลในระดับอุตสาหกรรมมาผลักดันใช้ทันที (วีชีร์ คตินนท์กุล, 2562) นอกจากนี้การนำกากหม้อกรองไปใช้ประโยชน์ข้างต้นยังมีงานวิจัยการเพิ่มมูลค่าของกากหม้อกรอง เช่น การสกัดไขมันออกจากกากหม้อกรองด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในระดับกึ่งอุตสาหกรรม ซึ่งใช้สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง อีกทั้งยังใช้ทดแทนคาร์บูบาร์แวกซ์จากใบของปาล์มคาร์บอนาที่มีราคาสูงได้เนื่องจากเป็นไขที่เกิดจากพืชเช่นเดียวกัน (กิตติวุฒิ เกษมวงศ์, 2560) เป็นต้น

## 1.2 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานที่ศึกษา

โรงงานกรณีศึกษามีกำลังการผลิต 40,000 ตันอ้อย/วัน ซึ่งประกอบกิจการเป็นกลุ่มบริษัทครอบคลุมกิจกรรมการแปรรูปอ้อยเป็นน้ำตาล ตลอดไปถึงผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล ประกอบด้วย 7 กลุ่มธุรกิจ ได้แก่ ธุรกิจน้ำตาล ธุรกิจโมลาส ธุรกิจเอทานอล ธุรกิจไฟฟ้า ธุรกิจเครื่องจักร ธุรกิจคลังสินค้า และธุรกิจงานวิจัยและพัฒนา ผลิตภัณฑ์หลักประกอบไปด้วยน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. น้ำตาลทรายดิบ (Raw sugar) คือ ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานในช่วงฤดูหีบอ้อยเดือนธันวาคมถึงเมษายน โดยมีกำลังการผลิตสูงสุด 4,600 ตันต่อวัน ซึ่งแบ่งเก็บไว้ในโกดังน้ำตาลทรายดิบเพื่อจำหน่ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ บางส่วนจะละลายเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลทรายขาวในฤดูหีบอ้อยทันที หรือวัตถุดิบในการผลิตกรดแลคติก โดยน้ำตาลทรายดิบจะมีสีน้ำตาลเข้มมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ และมีความบริสุทธิ์ต่ำ

2. น้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (White Sugar and Refined sugar) คือ ผลิตภัณฑ์ของโรงงานที่ผลิตในช่วงฤดูหีบอ้อยเดือนธันวาคมถึงเมษายน มีกำลังการผลิต 1,200 ตันต่อวัน และช่วงฤดูละลายน้ำตาลเดือน เมษายน ถึง สิงหาคม มีกำลังการผลิต 850 ตันต่อวัน ซึ่งผลิตจากการนำน้ำตาลทรายดิบมาผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการบอเนชั่น, การกรอง และการแลกเปลี่ยนประจุ เพื่อให้มีค่าสีลดลง และความบริสุทธิ์มากขึ้น น้ำตาลทรายขาวจึงใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารจากนั้นจึงตกผลึกเป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ เมื่อได้ผลิตภัณฑ์จะมีการ

จัดเก็บในกระสอบชนิดโพลีเอทิลีน (Polyethylene) และเก็บพักไว้ในโกดังเก็บน้ำตาลทรายขาว จะถูกขนส่งไปจำหน่ายโดยใช้รถบรรทุก และรถคอนเทนเนอร์

ผลิตภัณฑ์พลอยได้ของโรงงานกรณีศึกษา คือ กากอ้อย กากน้ำตาล กากหม้อกรอง เป็นส่วนที่ได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งจัดเป็นของเสียตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. กากอ้อย เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการหีบอ้อย โดยจะส่งเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำแรงดัน 20 บาร์ ขับเคลื่อนกังหันไอน้ำของลูกหีบ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้งานในกระบวนการผลิตหรือจำหน่ายไฟฟ้า โดยไม่มีจำหน่ายกากอ้อยแก่หน่วยงานภายนอกตามรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.6 กากอ้อย

2. กากหม้อกรอง เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการทำใส่น้ำอ้อย โดยเกิดจากการกรองแยกตะกอนด้วยหม้อกรองสุญญากาศ ซึ่งส่งให้บริษัทในเครือเป็นวัตถุดิบผลิตปุ๋ยอินทรีย์จำหน่ายแก่เกษตรกร ส่วนที่เหลือจะทำการจัดเก็บเพื่อรอขนย้ายไปกำจัดโดยบริษัทเอกชนที่รับกำจัดกากอุตสาหกรรม

3. กากน้ำตาล เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการปั่นแยกผลึกน้ำตาล โดยจะส่งให้บริษัทในเครือเพื่อเป็นวัตถุดิบผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ เมื่อพิจารณาหลักการ 3Rs จัดอยู่ในประเภทรีไซเคิลภายนอกโครงการได้ 100% ในรูปแบบของการนำกากของเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำตาลไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่



### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติและสัดส่วนของกากหม้อกรองในอุตสาหกรรมน้ำตาลจากอ้อย ซึ่งเป็นของเสียไปผลิตเป็นพลังงาน (waste to energy) ในรูปแบบของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

### 1.4 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

1. ผลิตรถยนต์พลอยได้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษา ได้แก่ กากอ้อย และกากหม้อกรอง
2. ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน (Heating value) ปริมาณเถ้า คุณสมบัติทางกายภาพ ต้นทุนการผลิต ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และระยะเวลาต้มน้ำเดือด

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบันของกากหม้อกรองในโรงงานกรณีศึกษา และกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ การผลิตไอน้ำจากเชื้อเพลิงชีวมวล และการใช้ประโยชน์จากกากหม้อกรอง
3. ทำการทดลองนำร่องเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกากหม้อกรองมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล
4. ทำการออกแบบการทดลอง โดยคัดเลือกปัจจัยที่เป็นตัวแปรต้นและตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลอง
5. ทำการทดลองอัดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ
6. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความร้อน (Heating value) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด
7. ทำการศึกษาต้นทุนการผลิต และค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต
8. ทำการทดสอบการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงหุงต้มกับเตาในครัวเรือน
9. ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ
10. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มมูลค่าของกากหม้อกรองให้เป็นพลังงาน และเป็นต้นแบบลดต้นทุนของการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาล
2. เป็นแนวทางผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดประเภทอื่นๆ

## 1.7 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนของกากหม้อกรองต่อกากอ้อย ความชื้นของกากหม้อกรองและกากอ้อยก่อนทำการอัดขึ้นรูปควบคุมความชื้นไว้ที่ 10% และ 15%
2. ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ความหนาแน่นรวม ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ความคงทน ปริมาณผงฝุ่น ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน และระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด
3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ชนิดเครื่องอัดเม็ดชีวมวล (แบบหัวอัตรดวงแหวน) และ เตาถ่านที่ใช้ในครัวเรือน

## 1.8 ตัวชี้วัดความสำเร็จ

สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีลักษณะตามมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 1.4 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

รายละเอียด	ระยะเวลา	เริ่ม	เสร็จสิ้น	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบันของกักหมักรอง และกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7 วัน	1/7/2563	7/7/2563						
2. ศึกษาทฤษฎี หลักการ รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30 วัน	8/7/2563	7/8/2563						
3. ทำการทดลองนำร่องเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกักหมักรองมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล	23 วัน	8/8/2563	31/8/2563						
4. ทำการออกแบบการ โดยคัดเลือกปัจจัยที่เป็นตัวแปรต้นและตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการทดลอง	15 วัน	1/9/2563	15/9/2563						
5. ทำการทดลองหาสัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราที่เหมาะสม	60 วัน	16/9/2563	14/11/2563						
6. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติความร้อน ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ และลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัตราเม็ด	30 วัน	15/11/2563	14/12/2563						
7. ทำการศึกษาต้นทุนการผลิต และคำนวณร่อนต้นทุนการผลิต	16 วัน	15/11/2563	30/11/2563						
8. ทำการทดสอบการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงหุงต้มกับเตาในครัวเรือน	16 วัน	15/11/2563	30/11/2563						
9. ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ	5 วัน	15/12/2563	19/12/2563						
10. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	15 วัน	15/12/2563	29/12/2563						

## บทที่ 2

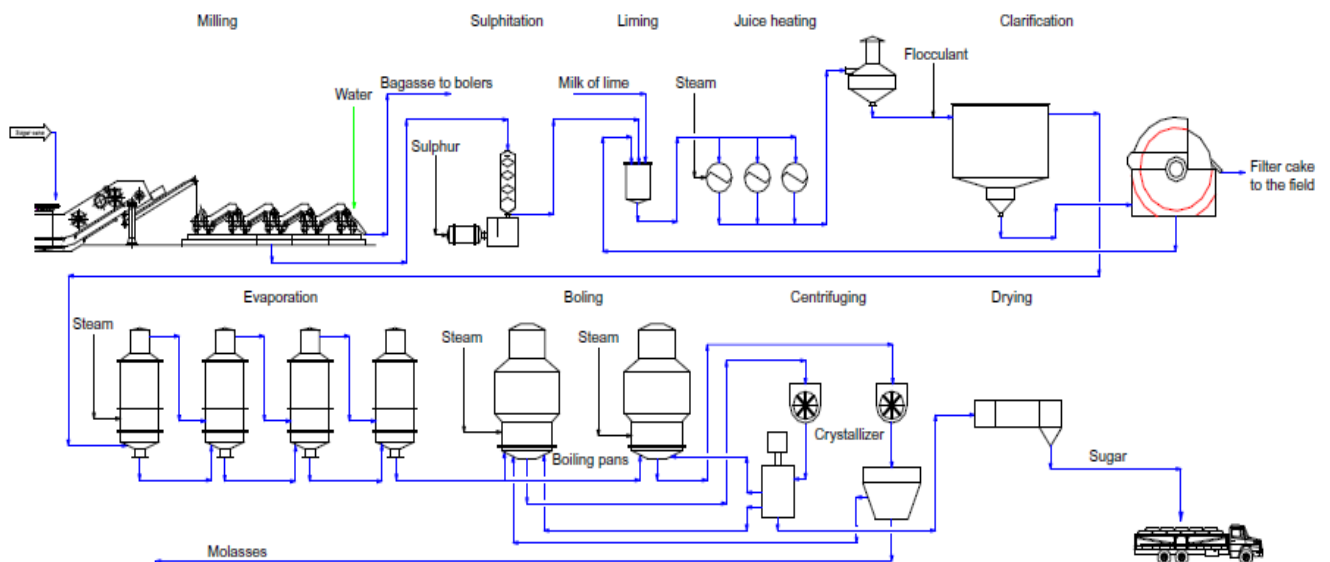
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย แบ่งออกเป็นกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ และการผลิตน้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ มีรายละเอียดดังนี้

##### 2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ

เป็นการดำเนินการผลิตเฉพาะในฤดูหีบอ้อย ในช่วงเดือนธันวาคมถึงเมษายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูเก็บเกี่ยวอ้อย โดยเกษตรกรจะนำอ้อยเข้าหีบสกัดเป็นน้ำอ้อยเพื่อผลิตเป็นน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายดิบบางส่วนจะนำไปผลิตเป็นน้ำตาลทรายขาวต่อไปแบ่งออกได้ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.1 (Cruz, Souza, and Cortez, 2013)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ  
(ที่มา : Cruz, Souza, and Cortez, 2013)

### 2.1.1.1 ขั้นตอนการรับอ้อยและเตรียมอ้อย (Raw Material Feed)

การขนส่งอ้อยเข้าสู่โรงงานจะใช้รถบรรทุก โดยเมื่อเข้าสู่โรงงานรถบรรทุกอ้อยจะเข้าเทียบจอดบริเวณแท่นเทในลานจอตรด้านใน โดยใช้ตะกาวและระบบไฮดรอลิคส์ยกถ่ายอ้อยลงสู่สะพานลำเลียง (Cane Unloader) ซึ่งมีการควบคุมความเร็วแบบอัตโนมัติ อ้อยจะถูกลำเลียงผ่านชุดมีดเกลี่ย จากนั้นอ้อยจะถูกตัดเป็นชิ้นโดยชุดมีดฟัน (Cane cutter) และจะถูกลำเลียงไปยังชุดแม่เหล็กเพื่อแยกเศษเหล็กที่อาจติดมากับอ้อยออกไป จากนั้นอ้อยจะถูกตีหรือทุบด้วยเครื่องย่อยอ้อย (Shredder) ให้มีสภาพละเอียดเหมาะสำหรับการสกัดโดยพิจารณาจากค่า PI (Preparation Index) หรือค่าอัตราส่วนระหว่างซูโครสที่ออกมาจากลำอ้อยต่อซูโครสที่มีอยู่ในลำอ้อย ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 จากนั้นจึงลำเลียงอ้อยเข้าสู่ขั้นตอนการหีบอ้อยต่อไป

### 2.1.1.2 ขั้นตอนการหีบอ้อยเพื่อสกัดน้ำอ้อย (Extraction of Juice)

อ้อยที่ถูกย่อยแล้วจะถูกลำเลียงด้วยสะพานเข้าสู่ชุดลูกหีบอ้อย จำนวน 5 ชุด ทำหน้าที่สกัดน้ำอ้อย ซึ่งลูกหีบแต่ละชุดมีหลักการทำงาน คือ อ้อยจะถูกลำเลียงจากลูกหีบชุดที่ 1 ไปยังลูกหีบชุดที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับโดยผ่านสะพานอ้อย ซึ่งเป็นสะพานเชื่อมระหว่างลูกหีบแต่ละชุด เมื่ออ้อยเข้าสู่ลูกหีบชุดที่ 1 อ้อยจะถูกคั้นน้ำออกและแยกไว้ส่วนหนึ่งไม่ปะปนกับน้ำอ้อยจากลูกหีบอื่นๆ ส่วนกากอ้อยที่เหลือจะเข้าสู่ลูกหีบชุดที่ 2 ซึ่งในลูกหีบชุดที่ 2 นี้ อ้อยจะถูกหีบเพื่อคั้นน้ำออกพร้อมกับการพรมน้ำอ้อยที่สุบย้อนขึ้นมาจากลูกหีบชุดที่ 3 เพื่อผสมเจือจางน้ำอ้อยที่ยังติดค้างอยู่ในกากอ้อยออกมาให้มากที่สุด กากอ้อยที่เหลือจะเข้าสู่ลูกหีบชุดที่ 3 ซึ่งจะใช้น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 4 ในการพรมกากอ้อยและหีบน้ำอ้อย กากอ้อยที่เหลือจะเข้าสู่ลูกหีบชุดที่ 4 ต่อเนื่องกันไปตามลำดับ การหีบอ้อยที่ลูกหีบชุดที่ 5 จะใช้น้ำร้อนอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในการพรมกากอ้อย ซึ่งน้ำอ้อยที่ออกมาจะใช้พรมกากอ้อยย้อนขึ้นไปที่ลูกหีบชุดที่ 4, 3 และ 2 ตามลำดับ โดยไม่มีการเติมน้ำร้อนให้ลูกหีบชุดที่ 1 เลย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสกัดน้ำอ้อย

การพรมอ้อยแบบนี้เรียกว่า Compound Imbibition จากขั้นตอนนี้จะได้น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 1 ที่ถูกแยกไว้เป็นตัวแทนสำหรับวัดคุณภาพอ้อย และน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 2 ที่เกิดจากการรวมกันของน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 3-5 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำใส่น้ำอ้อยต่อไป ส่วนกากอ้อยที่ได้จากการหีบครั้งสุดท้ายจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตไอน้ำใช้เป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการผลิตต่อไป

#### 2.1.1.2 ขั้นตอนการทำใส่น้ำอ้อย (Clarification)

น้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดที่ 1 ที่ถูกแยกไว้จะถูกนำมาผสมกับน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 2 เรียกว่า น้ำอ้อยรวม (Mixed juice) ซึ่งจะควบคุมค่า Brix ประมาณ 14 เนื่องจากไม่ได้ทำความสะอาดอ้อยก่อนการเข้าหีบ จึงยังคงมีสิ่งสกปรกแขวนลอยอยู่ในน้ำอ้อย เช่น กากอ้อย โคลน เศษหิน ดิน ทราย เป็นต้น โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกสารแขวนลอยและสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากน้ำอ้อยด้วยวิธีทางกล เช่น ผ่านเครื่องกรอง และวิธีการทางเคมี เช่น การให้ความร้อน การเติมปูนขาว (Lime Milk) โดยเป็นการผสมกันระหว่างน้ำปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) กับน้ำเชื่อมดิบช่วยให้สารแขวนลอยในน้ำอ้อยรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่และจับตัวกันตกตะกอน และปรับสภาพน้ำอ้อยให้แตกต่างป้องกันไม่ให้น้ำอ้อยเน่าเสีย และการเติมน้ำยาฟอกใสจะช่วยจับตะกอนในน้ำอ้อยที่กระจายอยู่ให้มีโมเลกุลที่หนักและแน่นขึ้นทำให้การตกตะกอนเกิดได้รวดเร็วมากขึ้น น้ำอ้อยรวมจะถูกสูบผ่านหม้ออุ่นชุดที่ 1 (Primary heater) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 65 ถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วผสมกับน้ำปูนขาวเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 7.2 ถึง 7.8 ในถังผสมซึ่งมีใบพัดกวนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที ก่อนจะเข้าสู่หม้อต้มชุดที่ 2 (Secondary heater) โดยเพิ่มอุณหภูมิที่ผสมกับน้ำปูนขาวแล้ว ให้อยู่ในช่วง 102 ถึง 103 องศาเซลเซียส เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำอ้อยกับน้ำปูนขาวเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อน้ำอ้อยร้อนเกินจุดเดือดจะถูกสูบไปพักที่ Flash tank เพื่อไล่ฟองอากาศ ลดความดัน และอุณหภูมิ ช่วยลดการเกิดตะกอนลอยซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำอ้อยขุ่น จากนั้นน้ำอ้อยจะถูกปล่อยเข้าสู่ถังฟอกใส (Clarifier) ดังรูปที่ 2.3 และทำการเติมน้ำยาฟอกใสซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ มีลักษณะเหนียวใส น้ำอ้อยที่ได้จะถูกทิ้งให้ตกตะกอนแยกส่วนกัน น้ำอ้อยด้านบนซึ่งเป็นน้ำอ้อยใสจะล้นออกด้านบนของถัง ซึ่งจะถูกนำไปกรองด้วยตะแกรงกรองน้ำอ้อยใสและผ้ากรอง

น้ำอ้อยที่ผ่านการกรองจะนำไปต้มระเหยในขั้นตอนต่อไป ส่วนน้ำอ้อยโคลนที่จมอยู่ก้นถังจะถูกส่งไปผสมกับฝุ่นกากอ้อย (Bagacillo) ซึ่งมาจากลูกหีบชุดที่ 5 ภายในรางผสม จนมีลักษณะเป็นของแข็งกึ่งเหลว (Slurry) จากนั้นจะถูกนำไปกรองที่หม้อกรองแบบสุญญากาศ (Rotary vacuum filter) ดังรูปที่ 2.4 เพื่อตูดน้ำอ้อยออกจากโคลนเป็นน้ำอ้อยใสซึ่งจะถูกส่งกลับไปรวมกับ

น้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบเข้าสู่ขั้นตอนการทำใส่น้ำอ้อยอีกครั้ง ส่วนกากตะกอนที่ได้จากหม้อกรองนี้เรียกว่า กากหม้อกรอง (Filter cake)



รูปที่ 2.3 การทำใส่น้ำอ้อย



รูปที่ 2.4 หม้อกรองแบบสุญญากาศ

#### 2.1.1.3 ขั้นตอนการต้มระเหยน้ำอ้อย (Evaporation)

การต้มระเหยน้ำออกจากน้ำอ้อยเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำอ้อยให้ได้น้ำเชื่อมดิบที่มีค่า Brix ประมาณ 58-70 ผ่านหม้อต้มจำนวนทั้งหมด 6 ชุด หม้อพรี 1 ชุด หม้อต้ม 5 ชุด ดังรูปที่ 2.5 โดยหม้อต้มชุดที่ 1 จะรับไอน้ำที่ออกจากเครื่องกังหันของโรงไฟฟ้าชีวมวล มาให้ความร้อนแก่หม้อต้ม น้ำในน้ำอ้อยจะระเหยกลายเป็นไอทำให้น้ำอ้อยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ไอที่ระเหยจากหม้อต้มชุดที่ 1 จะส่งไปใช้ต่อในหม้อต้มชุดที่ 2 ไอที่ระเหยจากหม้อต้มชุดที่ 2 จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำอ้อยของหม้อต้มชุดที่ 3 และไอที่ระเหยจากหม้อต้มชุดที่ 3 จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำอ้อยของหม้อต้มชุดที่ 4 และไอที่ระเหยจากหม้อต้มชุดที่ 4 จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำอ้อยของหม้อต้มชุดที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งจะมีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส น้ำอ้อยเมื่อระเหยในหม้อต้มชุดที่ 5 แล้วจะได้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 58% ถึง 70% ส่วนไอระเหยของหม้อต้มชุดที่ 2 ถึงหม้อต้มชุดที่

5 และหม้ออุ่นน้ำอ้อยเมื่อกลั่นตัวเป็นคอนเดนเสทแล้ว ทั้งหมดจะถูกส่งเข้าสู่ถังพักน้ำร้อน เพื่อนำกลับไปใช้พรมกากอ้อยที่ลูกทีบ น้ำอ้อยเมื่อผ่านการต้มจนถึงหม้อชุดที่ 5 แล้วจะได้น้ำเชื่อมดิบ (Raw syrup) ซึ่งจะเข้าสู่กระบวนการเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pump) และปั่นน้ำตาลดิบต่อไป



รูปที่ 2.5 การต้มระเหยน้ำอ้อย

#### 2.1.1.4 ขั้นตอนการเคี้ยวน้ำตาล (Crystallization) และปั่นน้ำตาล (Centrifuge)

การเคี้ยวน้ำตาลเป็นการตกผลึกน้ำตาลเพื่อแยกน้ำตาลออกจากสิ่งสกปรกที่ปะปนมากับน้ำเชื่อมโดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอน้ำที่ได้จากหม้อต้มน้ำตาลกับน้ำเชื่อมดิบ ซึ่งจะมีการควบคุมจุดเดือดของน้ำตาลให้ต่ำกว่าจุดเดือดของบรรยากาศภายใต้สภาวะสุญญากาศ การเคี้ยวน้ำตาลจะมีการนำผลึกน้ำตาลคุณภาพต่ำมารวมกับน้ำหรือน้ำเชื่อมดิบเพื่อผสมเป็นแมกมา (magma) และใช้เป็นหัวเชื้อเริ่มต้นให้น้ำตาลมาเกาะและตกผลึก ในระหว่างนั้นจะมีการเคี้ยวต่อไปเพื่อรักษาสมดุลของความเข้มข้นของน้ำเชื่อมดิบจนเกิดการรวมตัวกันจนเป็นผลึกขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากการเคี้ยวน้ำตาลจะได้ผลึกน้ำตาลที่ยังมีน้ำหล่อเลี้ยงเหลืออยู่หรือที่เรียกว่า แมสคิวท (massecuite) เมื่อผลึกน้ำตาลมีขนาดใหญ่ตามที่ต้องการแล้ว แมสคิวทจะถูกส่งไปยังรางกววน (crystallizer) เพื่อพักให้อุณหภูมิลดลงซึ่งจะช่วยให้ผลึกน้ำตาลยึดเกาะกันได้มากขึ้น จนมีขนาดน้ำตาลตามที่ต้องการ จากนั้นจะเข้าสู่หม้อปั่น (centrifugal) เพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นน้ำตาลและกากน้ำตาล (molasses) ออกจากกัน โดยในระหว่างการปั่นจะมีการฉีดล้างผลึกด้วยน้ำร้อนเพื่อให้ได้ผลึกน้ำตาลที่มีความบริสุทธิ์สูง

สำหรับการเคี้ยวและปั่นน้ำตาลดิบจะมีการใช้ระบบการเคี้ยวแบบ 3 ชั้น หรือระบบ A-B-C อธิบายได้ดังนี้

ก) หม้อเคี้ยวชุดที่ 1 หรือหม้อเคี้ยวน้ำตาลเอ จะใช้น้ำเชื่อมดิบผสมกับเชื้อจากแมกมาบี (B-magma) ในการเคี้ยวจนได้แมสคิวทเอ (A-massecuite) จากนั้นจะเข้าสู่หม้อปั่น



น้ำตาลเอ (A-centrifugal) เพื่อปั่นแยกกากน้ำตาลเอ (A-molasses) และน้ำตาลเอออกจากกัน น้ำตาลเอจากหม้อเคี้ยวนี้ เป็นน้ำตาลบริสุทธิ์และมีความหวานสูง

ข) หม้อเคี้ยวชุดที่ 2 หรือหม้อเคี้ยวน้ำตาลบี จะใช้กากน้ำตาลเอเคี้ยวผสมกับแมกมาซี (C-magma) ได้เป็นแมสคิวทิต (B-massecuite) และส่งเข้าสู่หม้อปั่นน้ำตาลบี (B-centrifugal) เพื่อแยกเป็นกากน้ำตาลบี (B-molasses) และน้ำตาลบี โดยระหว่างปั่นจะมีการฉีดน้ำร้อนเพื่อล้างผลึกน้ำตาลให้สะอาดที่สุดเพื่อให้ได้น้ำตาลที่มีคุณภาพดี และถูกนำไปผสมกับน้ำร้อนเพื่อทำเป็นแมกมาซี สำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อในการเคี้ยวน้ำตาลเอ ส่วนกากน้ำตาลบีที่ได้จะใช้เป็นหัวเชื้อในหม้อเคี้ยวน้ำตาลซีต่อไป

ค) หม้อเคี้ยวชุดที่ 3 หรือหม้อเคี้ยวน้ำตาลซี จะใช้น้ำเชื่อมดิบผสมกับกากน้ำตาลเอเข้าด้วยกัน ทำการเคี้ยวจนได้ความเข้มข้น Brix ประมาณ 82-84 แล้วเติมเชื้อน้ำตาลเพื่อกระตุ้นการเกิดผลึก จากนั้นจึงเคี้ยวผสมกับกากน้ำตาลบีที่ได้จากหม้อเคี้ยวชุดที่ 2 จนได้เป็นแมสคิวทิตซี (C-massecuite) และส่งเข้าสู่หม้อปั่นน้ำตาลซี (C-centrifugal) เพื่อแยกกากน้ำตาลซีและน้ำตาลซีออกจากกัน น้ำตาลซีที่ได้จะถูกผสมกับน้ำร้อนหรือน้ำเชื่อมดิบเพื่อทำเป็นแมกมาซีสำหรับนำกลับไปใช้เป็นเชื้อในการเคี้ยวน้ำตาลบีในหม้อเคี้ยวชุดที่ 2 ส่วนกากน้ำตาลซี (C-molasses) จะถูกส่งไปกักเก็บที่ถังเก็บกากน้ำตาลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ให้โรงงานเอทานอล



รูปที่ 2.6 การเคี้ยวตกผลึก

### 2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

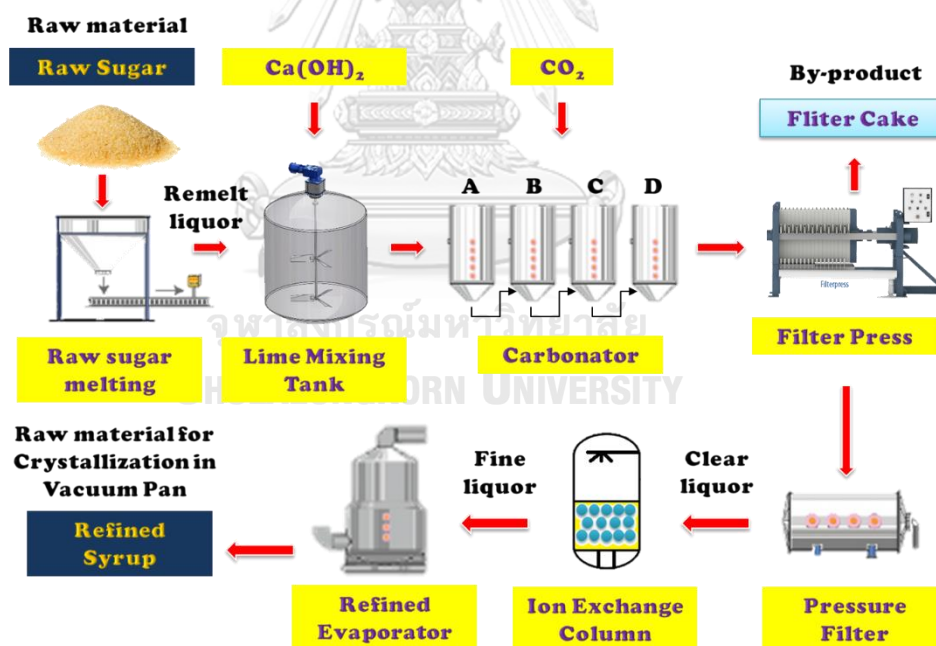
เป็นการนำน้ำตาลทรายดิบมาละลายแปรรูปเป็นน้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์เพื่อเพิ่มมูลค่าแก่ผลิตภัณฑ์ แบ่งออกได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

#### 2.1.2.1 ขั้นตอนการละลายน้ำตาลทรายดิบและการลดค่าสี

น้ำตาลดิบจะถูกนำมาละลายด้วยน้ำร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 60-70 องศาเซลเซียส และมีการเปิดไอเข้าผสมในถังกวนเพื่อให้ความร้อน จากนั้นจะส่งผ่านไปตะแกรงกรองสิ่งปนเปื้อนที่มากับน้ำตาลทรายดิบจากนั้นจึงส่งไปพักที่ถังพักน้ำเชื่อมละลาย น้ำเชื่อมละลายที่อยู่ในถังพักจะมีการปรับน้ำเชื่อมให้เป็นต่างด้วยน้ำปูนขาวความเข้มข้น 10 ถึง 12 โบเม่ และส่งต่อไปที่หม้อฟอก (Carbonator) เพื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10 ถึง 12 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 2.7

### 2.1.2.2 ขั้นตอนการกรองน้ำเชื่อม

น้ำเชื่อมที่ผ่านการฟอกจะนำไปกรองตะกอนออกด้วยหม้อกรองความดัน (pressure filter) เพื่อให้ได้น้ำเชื่อมใส (clear liquor) จากนั้นน้ำเชื่อมที่กรองได้จะส่งไปลดค่าสีอีกครั้งหนึ่งด้วยการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) จะได้น้ำเชื่อมบริสุทธิ์ (Fine Liquor) เป็นวัตถุดิบในการตกผลึกน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ จะใช้ระบบการเคี้ยวแบบ 2 ขั้นตอน

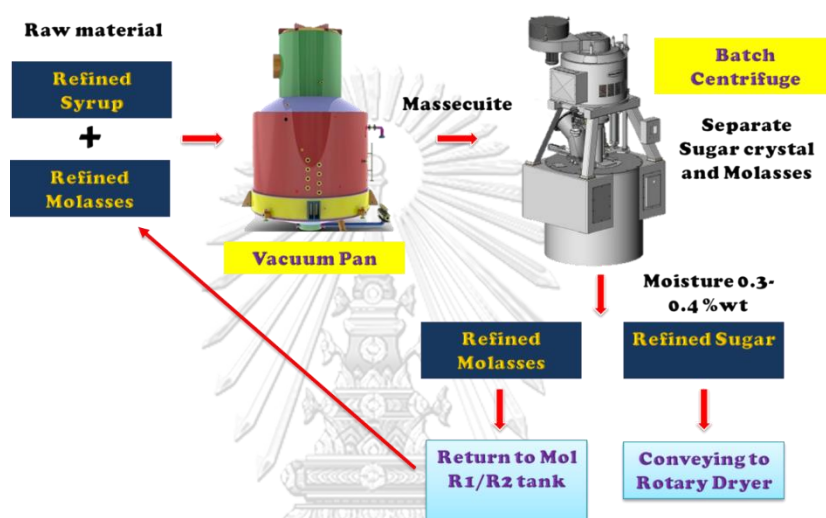


รูปที่ 2.7 กระบวนการละลายน้ำตาลดิบ และลดค่าสีน้ำเชื่อม

### 2.1.2.3 ขั้นตอนการเคี้ยว ปั่น อบแห้ง และบรรจุ

การเคี้ยวน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ จะใช้วิธีการเคี้ยววนกากน้ำตาล โดยเริ่มต้นจากการต้มน้ำเชื่อมให้ข้นตามต้องการ แล้วใส่เขื่อน้ำตาลเคี้ยวต่อด้วยน้ำเชื่อมรี

ไฟน์จนเต็มหม้อเคี้ยว แมสคิวทิตที่จะเอาลงหม้อเคี้ยวต้องเคี้ยวให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 89-92 ปริกซ์ แมสคิวทิตขาวจะปั่นโดยใช้หม้อปั่นที่เรียกว่า Batch Type ดังรูปที่ 2.8 เพื่อแยกกากน้ำตาล และน้ำตาลออกจากกัน ส่วนกากน้ำตาลขาวจะถูกส่งไปหม้อเคี้ยวเพื่อเคี้ยวน้ำตาลในลำดับต่อไป จนกระทั่งกากน้ำตาลขาวมีค่าสูงเกินค่าที่กำหนดไว้จึงส่งกลับไปเคี้ยวน้ำตาลดิบต่อไป น้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ที่ออกจากหม้อปั่นจะส่งไปอบแห้งที่หม้ออบ หลังจากอบแล้ว จะลำเลียงลงยุงและบรรจุใส่ถุงไปเก็บไว้ในโกดังและส่งขายให้ผู้รับซื้อต่อไป



รูปที่ 2.8 การเคี้ยว และปั่นผลึกน้ำตาลทรายขาว-รีไฟน์

## 2.2 เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นสารประกอบของสารอินทรีย์ทั่วไปจากธรรมชาติสามารถเผาไหม้ได้โดยง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจน ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าได้ โดยแหล่งที่มาของชีวมวลอาจมาจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ซึ่งในกลุ่มประเทศเกษตรกรรมและกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา มีความนิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือก เนื่องจากการประกอบอาชีพเกษตรกรรมทำให้มีของเหลือจากการเก็บเกี่ยว เช่น ลำต้น ใบ และเปลือก เป็นต้น (เจตน์สิทธิ์ สาสิทธิ์, 2559)

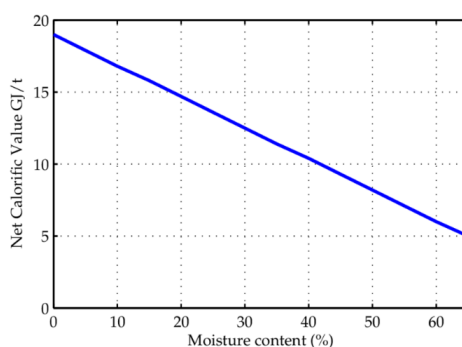
เชื้อเพลิงชีวมวลได้รับความสนใจมากขึ้น เพราะสามารถใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดได้ และยังเป็นสารอินทรีย์ซึ่งได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืช สัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรชีวิตของพืชมีวงจรที่สั้น

แตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการทับถมของสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวมวลยังมีปัญหาด้านความหนาแน่นรวมที่ต่ำจึงพบปัญหาการขนส่ง ขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ และสิ่งปนเปื้อนในวัตถุดิบส่งผลให้ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงในระบบไม่เป็นไปอย่างที่คาดไว้ จึงเกิดแนวคิดในการลดขนาดอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีขนาดใกล้เคียง แล้วจึงอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงส่งผลให้ควบคุมประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงของระบบทำได้ง่าย และยังง่ายต่อการขนส่งรวมทั้งควบคุมสภาวะในการจัดเก็บ

### 2.2.1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุหลัก 4 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) อาจจะมีคลอรีน (Cl) และกำมะถัน (S) ผสมอยู่เล็กน้อย (กิตตินันท์ มลิวรรณ, ฐานันดรศักดิ์ เทพญา, ชยุต นันทดุสิต, นันทพันธ์ นภัทรานันท์, และ ศักตินันท์ โอแก้ว, 2556) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจึงทำได้ 3 รูปแบบ คือ

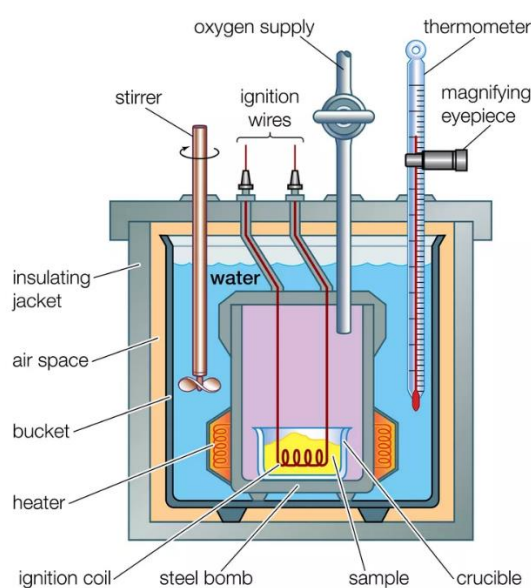
2.2.1.1 ค่าความร้อน (Heating value หรือ Calorific Value) คือ เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ (Combustion) ของชีวมวลแต่ละชนิดซึ่งถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมี 2 ชนิด คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value หรือ HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value หรือ LHV หรือ Net calorific value) โดยค่าความร้อนสูงของชีวมวลนั้นๆ เป็นค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้และรวมกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของความชื้นที่อยู่ในชีวมวล ดังนั้นค่าความร้อนสูงจึงไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นที่อยู่ในชีวมวล ส่วนค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวลซึ่งค่าความชื้นจะมีผลโดยตรง เช่น ค่าความร้อนต่ำกับความชื้นในชีวมวลประเภทเศษไม้ ดังจะเห็นจากความสัมพันธ์รูปที่ 2.9 (Merlan, 2016)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนต่ำกับความชื้นในชีวมวลประเภทเศษไม้

(ที่มา : Merlan, 2016)

หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter จะเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยเชื้อเพลิงที่ต้องการทดสอบจะถูกบรรจุในส่วนของ Chamber และเติมออกซิเจนภายใต้ความดันสูง จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน Ignition wires และทำให้เกิดการจุดระเบิด โดยเครื่องจะถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกไปสู่สภาวะแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้สามารถวัดปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากแท่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่อง Bomb Calorimeter

(ที่มา : Helmenstine, 2020)

2.2.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate Analysis) เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ สารระเหย (Volatile Matter) เถ้า (Ash) ความชื้น (Moisture) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สารระเหย (Volatile Matter) คือ องค์ประกอบในชีวมวลที่ระเหยไป เมื่อได้รับความร้อน ชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยได้สูงจะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูงด้วย อย่างไรก็ตาม สารที่ระเหยได้บางชนิดอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำวัสดุเชื้อเพลิงไปใช้งาน เช่น สารอัลคาไลน์ในทะเลสาบปาล์มจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดท่อน้ำในห้องเผาไหม้ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำลดลง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่หายไปของเชื้อเพลิงหลังจากให้ความร้อน 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไอรระเหยจะเกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เถ้า (Ash) เป็นเศษที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้อีกอยู่ในรูปของซีเถ้า และเศษเหลือบางชนิดจะอยู่ในรูปของเมือกเหนียว (slag) โดยในกรณีที่แปรสภาพด้วยชีวเคมี (biochemical conversion) เศษที่เหลือจะเป็นปริมาณคาร์บอนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Nonbiodegradable carbon) ปริมาณซีเถ้าและเศษที่เหลือต่าง ๆ นี้เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการออกแบบเตาเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งหากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีปริมาณเถ้าเยอะจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำ ถ้าบางส่วนอาจเกิดการหลอมทำให้อุปกรณ์ภายในหม้อไอน้ำเสียหาย อีกทั้งยังเป็นปัญหาในการกำจัดเถ้าอีกด้วย

ความชื้น (Moisture) คือ สัดส่วนระหว่างน้ำที่อยู่ในชีวมวลต่อน้ำหนักชีวมวลทั้งหมดแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นภายใน (Intrinsic Moisture) และความชื้นภายนอก (Extrinsic moisture) ซึ่งความชื้นภายในเป็นค่าความชื้นที่อยู่ในชีวมวลซึ่งเป็นค่าคงที่ซึ่งจะไม่คิดค่าความชื้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนโดยตรง โดยหากชีวมวลดังกล่าวมีความชื้นมากจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ ทำให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลง โดยค่าความชื้นสูงสุดของชีวมวลที่แนะนำให้ใช้ในหม้อไอน้ำต่างๆ มีดังนี้ กรณีของหม้อไอน้ำเล็ก (Smaller Boiler) ไม่ควรเกินร้อยละ 30-35 และ หม้อไอน้ำแบบ Stoker ไม่ควรเกินร้อยละ 25 (The Carbon Trust, 2012)

คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นปริมาณคาร์บอนคงตัวซึ่งจะระเหยได้ยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในรูปกากของเสียหลังจากสารระเหยออกไปแล้ว ซึ่งเหลือจากเผาไหม้ที่ความร้อน 900 องศาเซลเซียส หากปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจะทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้หมดได้ช้าตามสมการ 2.1 (ASTM International, 2013)

$$FC = 100 - M - \text{Ash} - VM \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ FC คือ คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

M คือ ความชื้น (Moisture)

Ash คือ เถ้า (Ash)

VM คือ ไอรระเหย (Volatile Matter)

2.2.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียด (Ultimate Analysis) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุและความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลตามสมการ 2.2 (ASTM International, 2015)

$$\text{Carbon} + \text{Hydrogen} + \text{Oxygen} + \text{Nitrogen} + \text{Sulfur} + \text{Ash} + \text{Moisture} = 100 \text{ wt. \% (2.2)}$$

## 2.2.2 การแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นพลังงาน

2.2.2.1 การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) เป็นการนำชีวมวลมาเผาให้มาได้ซึ่งความร้อน ซึ่งพลังงานที่ได้ขึ้นกับค่าความร้อนของชีวมวลชนิดนั้นๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ โดยไอน้ำที่ผลิตได้จะมีอุณหภูมิและความดันที่สูงจึงถูกนำไปใช้ขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนไอน้ำแรงดันต่ำจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

2.2.2.2 การผลิตก๊าซ (Gasification) เป็นกระบวนการที่นำของเหลือใช้ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว เช่น ขยะชุมชน หรือชีวมวล เปลี่ยนมาอยู่ในรูปของก๊าซโดยการให้ความร้อนระดับหนึ่งแต่ไม่ถึงระดับการเผา(Thermal Conversion process) โดยจำกัดปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ ความร้อนระดับนี้จะทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัวได้ส่วนผสมของก๊าซมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือเรียกว่า ซินแกส (Syngas) หรือ synthesis gas ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอื่น ๆ ก๊าซเหล่านี้จะทำหน้าที่ขับเคลื่อนกังหันก๊าซ (Gas turbine)

2.2.2.3 การหมัก (Fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ส่งผลให้ชีวมวลจะถูกย่อยสลายให้มาซึ่งก๊าซชีวภาพ (Biogas) ที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซมีเทนนั้นสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

## 2.2.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง มีรูปแบบในการเผาไหม้ 4 วิธี ดังนี้

2.2.2.1 Evaporating combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เชื้อเพลิงแข็งที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำ จะหลอมเหลวก่อนเผาไหม้ แล้วระเหยในทำนองเดียวกับเชื้อเพลิงเหลว หลังจากนั้นจึงเผาไหม้ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิระเหยมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อน

2.2.2.2 Decomposing combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิระเหย โดยเมื่อได้รับความร้อน เชื้อเพลิงจะสลายตัวด้วยความร้อน และเมื่อ Volatile matter ถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวจะเกิดการเผาไหม้

2.2.2.3 Surface combustion เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ในถ่านไม้หรือถ่านโค้กซึ่งแทบไม่มี Volatile matter และพบได้ใน Fixed carbon หลังจาก Decomposing combustion โดยออกซิเจนหรือก๊าซที่มีคุณสมบัติออกซิเดชั่น (เช่น  $\text{CO}_2$ ) จะแพร่เข้าไปในช่องว่างบนพื้นผิวหรือภายในของแข็งแล้วเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้

2.2.2.4 Surface combustion สำหรับสสารที่มีอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนต่ำ เช่น กระดาษ หลังจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน หาก Volatile matter ไม่ถูกจุดไฟ บางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวซึ่งทำให้เกิดควันขึ้นเป็นจำนวนมากเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Smoldering สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวมีการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟของ Volatile matter ถ้าบังคับควันให้ติดไฟ หรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดติดไฟของควันแล้ว การเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการเผาไหม้ที่เกิดเปลวไฟ

## 2.3 การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

การแปรรูปชีวมวลหรือของเสียด้วยการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง เป็นวิธีซึ่งแพร่หลายในการจัดการกับของเสียที่เป็นชีวมวล หรือวัสดุที่เหลือทางการเกษตร เนื่องจากวิธีการแปรรูปจากของเสียเป็นเชื้อเพลิงทำได้ง่าย สะดวกต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งเงินลงทุนในส่วนของเครื่องจักรน้อย ของเสียประเภทชีวมวลหรือวัสดุที่เหลือทางการเกษตร เป็นอินทรีย์สารซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเมื่อนำไปเผาไหม้จะให้พลังงานความร้อน แต่ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบและลักษณะของเสียดังกล่าวมีค่าความร้อนสูงหรือไม่เมื่อถูกเผาไหม้ และพฤติกรรมในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอหรือไม่

### 2.3.1 การอัดร้อนที่ความดันสูง

เป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากใช้ได้กับวัสดุหลากหลายชนิด แบ่งออกตามลักษณะของเครื่องมือที่ใช้ทำการอัดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นมีทั้งหมด 4 ชนิด (ศิริชัย ต่อสกุล, จงกล สุภารัตน์, และ นทีชัย ผัสดี, 2558) ได้แก่

2.3.1.1 การอัดขึ้นรูปด้วยกระบอกสูบ (Piston press) เครื่องจักรจะประกอบด้วยกลไกลูกสูบและกระบอกสูบที่ออกแรงกดวัสดุจากช่องป้อนลงในเบ้า ชีวมวลจะถูกอัดจนมีความร้อน



150 ถึง 300 °C เครื่องอัดแท่งจะถูกขับด้วยไฟฟ้าและต่อกับล้อสะสมพลังงาน (Flywheel) เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จะมีลักษณะทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 100 mm

2.3.1.2 การอัดขึ้นรูปแท่งด้วยสกรู (Screw press) เชื้อเพลิงจะถูกอัดด้วยสกรูซึ่งมี 3 ส่วน คือ สกรูทรงกรวย ส่วนให้ความร้อน และสกรูแปด หัวอัดสกรูจะอัดส่งเชื้อเพลิงออกมา ด้านหน้าขนาด 50 ถึง 100 mm ส่วนที่ให้ความร้อนจะรักษาอุณหภูมิไว้ประมาณ 300 °C และส่งถ่ายให้วัสดุมีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เครื่องอัดแบบสกรูมักพบปัญหาเรื่องการสึกหรอของสกรู และแบมแม่พิมพ์ มีอายุการใช้ 100 ถึง 180 ชั่วโมง

2.5.1.3 การอัดแบบกลิ้ง (Roll press) เครื่องอัดแบบลูกกลิ้งจะอัดชีวมวลด้วยลูกกลิ้งสองตัวหมุนในทิศตรงข้ามกัน วัตถุดิบถูกอัดแน่นเข้าไปในตัวรองรับแทนอัด (Pillow-shaped briquetted) ซึ่งมีช่องห่างของลูกกลิ้งตามเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเชื้อเพลิงที่ต้องการ วิธีการดังกล่าวต้องการวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กมากกว่าแบบกระบอกสูบและสกรู อีกทั้งค่าความทนทานของแท่งเชื้อเพลิงยังน้อยกว่าด้วย ด้วยการอัดวิธีนี้จะใช้ตัวประสานบางประเภทเพื่อเพิ่มความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

2.5.1.4 การอัดเป็นเม็ด (Pelletizing) การอัดแบบนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ (Matrix) และลูกกลิ้ง (Roller) ซึ่งแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งส่งผลให้เกิดการบังคับวัสดุผ่านช่องแบบแม่พิมพ์และทำให้ความร้อนเนื่องจากเกิดแรงเสียดทาน ทำให้ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไม้อ่อนตัวลงและเชื่อมประสานเนื้อวัสดุในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าด้วยกัน เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ถูกอัดออกมาแล้วจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนดให้ เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากวิธีนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 ถึง 15 mm และความยาวไม่เกิน 30 mm ถ้าแท่งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้แล้วจะใช้การอัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) แทนการอัดเม็ด เครื่องอัดเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellet Mill) มี 2 แบบสำคัญดังนี้

ก) เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ (Flat Die) หรือเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) ใช้หลักการของวัตถุดิบจากด้านบนสู่ลูกกลิ้งซึ่งกำลังหมุนอยู่บนหัวอัด (Die) ของเครื่องอัด วัตถุดิบจะถูกอัดอยู่ระหว่างลูกกลิ้งและพื้นผิวของหัวอัดผ่านลงสู่รูของหัวอัด มีดจะทำการตัดเม็ดชีวมวลตามความยาวที่ปรับตั้งเอาไว้ ตัวหนอนเกลียวและล้อขับจะถูกใช้สำหรับเครื่องอัดแบบหัวอัดแนวราบ (Flat Die)

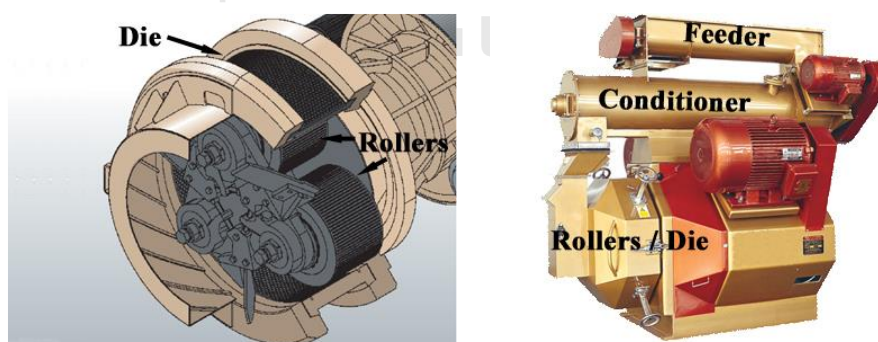


รูปที่ 2.11 เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดแนวราบ

(ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

ข) เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัดวงแหวนหรือแนวตั้ง (Ring Die or Vertical Die) ภายในประกอบไปด้วยหัวอัดวงแหวนแนวตั้งและลูกกลิ้งที่อยู่ด้านในใช้แรงอัดกับหัวอัดวงแหวน (Ring Die) วัตถุดิบจะถูกป้อนจากเครื่องป้อนวัตถุดิบด้วยความเร็วที่ไม่คงที่ของคอนดิชันเนอร์ (Conditioner) ที่อยู่เหนือเครื่องอัดเม็ด วัตถุดิบที่ถูกปรับสภาพแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านหน้าของเครื่องอัดเม็ด จากนั้นสกรูลำเลียงจะป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ส่วนกลางของหัวอัดภายในหัวอัดลูกกลิ้งจะอยู่กับที่และหัวอัดจะถูกขับเคลื่อนคล้ายกับเครื่องซักผ้า เมื่อหัวอัดหมุนวัตถุดิบภายในหัวอัดจะถูกยกขึ้นและลูกกลิ้งจะบดอัดวัตถุดิบลงไปในรูหัวอัดได้ออกมาเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตัวอย่างของการอัดเม็ดโดยเครื่องอัดแบบหัวอัดวงแหวนหรือแนวตั้ง และ เครื่องอัดแบบหัวอัดวงแหวนหรือแนวตั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดแบบวงแหวน

(ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

### 2.3.2 การอัดเยื่อที่ความดันต่ำ

เป็นกระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ความดันและอุณหภูมิขณะเดินระบบที่ต่ำแบ่งออกวิธีย่อยได้เป็น 2 วิธี

2.3.2.1 การบีบอัดแบบใช้ตัวประสาน เป็นกระบวนการที่ใช้อัดชีวมวลโดยเติมตัวเชื่อมประสานเข้าไปทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเนื้อวัสดุจึงไม่มีความจำเป็นต้องให้ความร้อน โดยตัวประสานที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ควรไม่ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง และปริมาณเถ้าหลังการเผาไหม้ต้องน้อย ซึ่งตัวประสานออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

ก) ตัวประสานชนิดโครงข่าย (Matrix type) เป็นตัวประสานที่ผสมกับวัตถุดิบที่จะทำการอัดขึ้นรูป การใช้ตัวประสานชนิดนี้ต้องใช้ตัวประสานในปริมาณมาก ได้แก่ น้ำยางพาราชั้น ดินเหนียว ของเหลือจากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นต้น

ข) ตัวประสานชนิดแผ่นฟิล์ม (Film type) ตัวประสานรูปแบบนี้นิยมใช้ในรูปแบบของสารละลายในน้ำ โดยทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีความแข็งแรงขึ้น เมื่อมีการชับน้ำออกจนแห้งแล้วหลังการอัดขึ้นรูป ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล กาว เป็นต้น

ค) ตัวประสานชนิดเคมี (Chemical type) ตัวประสานประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีระหว่างองค์ประกอบของตัวประสานหรือปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวประสานกับวัตถุดิบอัดแท่ง เช่น ของผสมระหว่างสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกากน้ำตาล

2.3.2.2 การบีบอัดแบบไม่ใช้ตัวประสาน เป็นวิธีนี้ใช้สำหรับชีวมวลย่อยสลายตัวแล้ว เช่น ของเหลือใช้ทางการเกษตรที่หลังการเก็บเกี่ยว เช่น กองใบอ้อย กองใบไม้ และ กองเปลือกพืชพันธุ์เกษตร เป็นต้น ชีวมวลที่ยังไม่ผ่านการย่อยสลายสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้ต่อเมื่อผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้มีการย่อยสลายมาก่อนระดับหนึ่ง

### 2.3.3 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นที่สนใจและถูกพัฒนามาใช้งานภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ (Boiler) และการผลิตก๊าซชีวมวล (Producer gas) แต่ยังมีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น คุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลไม่แน่นอน และการที่ไม่มีมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลทำให้มีปัญหาราคาไม่แน่นอน หน่วยงานที่ดูแลการจัดทำมาตรฐานเชื้อเพลิงในประเทศไทย จึงเริ่มมีการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดย

ทำการร่างมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากการประชุมรับฟังความคิดเห็น และสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2555 จึงมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560) ครอบคลุมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งที่ได้จากเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรม หรือ วัสดุเหลือใช้ทาง ซึ่งประกาศใช้ ณ วันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2560 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอุตสาหกรรม, 2555) มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย

คุณลักษณะ	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2
ความหนาแน่น	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg	ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg
เถ้า	ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	ไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก
ความยาวเฉลี่ย	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 6 mm ถึง 10 mm	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm
	ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 50 mm สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 12 mm ถึง 25 mm	
ความคงทน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 96.0	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 96.0
ปริมาณผงฝุ่น	ไม่เกินร้อยละ 3.0	ไม่เกินร้อยละ 6.0

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 งานวิจัยด้านเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้ทางการเกษตรและปศุสัตว์

การนำของเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปมักพบปัญหาขนาดของชีวมวลที่ใหญ่หรือไม่สม่ำเสมอจึงต้องทำการตัดลดขนาด เช่น เศษไม้ยางพารา กะลามะพร้าว และทะเลาะปาล์ม เป็นต้น ซึ่งจะต้องมีกระบวนการย่อย (Crushing) หรือบางวัสดุไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อทำการอัดทำให้ง่ายต่อการแตกหัก จึงต้องหาตัวประสานที่เหมาะสมโดยกระบวนการผสม (Mixing) และบางวัสดุมีความชื้นที่สูงจึงต้องผ่านกระบวนการลดความชื้น (Drying) เพื่อให้เชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพดีให้ค่าความร้อนสูง ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของพรพรรณ เถ่าประวัติชัย (2561) ซึ่งทำการนำเศษไม้ยางพาราในจังหวัดระนองมาย่อยลดขนาดก่อนทำการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ของเหลือใช้จากปาล์ม เป็นของเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพที่จะใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ในของกรณีทะเลายปาล์มไม่ได้ความนิยมแพร่หลาย เนื่องจากปัญหาของโพแทสเซียมที่มีปริมาณสูงส่งผลต่อการเกิดตะกรันหลังเผาไหม้ โดยที่ถ้าหลังการเผาไหม้จะเกาะที่ท่อไอน้ำร้อน ยิ่งยวดจึงมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาศึกษาปรับปรุงคุณภาพของทะเลายปาล์ม 2 วิธี คือ การผสมทะเลายปาล์มกับชีวมวลที่มีโพแทสเซียมปริมาณต่ำแล้วทำการอัดเม็ด และการใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่ง งานวิจัยนี้จึงทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด 2 ชุด โดยชุดแรกผสมทะเลายปาล์มเปล่านั้นกับขี้เลื่อยไม้ และทะเลายปาล์มผสมดินขาว ทั้ง 2 วิธีได้ผลค่าความร้อน และปริมาณไนโตรเจนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซื้อขาย แต่พบปัญหาปริมาณซัลเฟอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.53 ถึง 0.68 โดยน้ำหนักซึ่งมากกว่าเกณฑ์ซื้อขาย Enplus Grade B และ Korean 4<sup>th</sup> Grade จึงเป็นชีวมวลที่ต้องมีการระบบบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (กษิเดช สาลีพัฒนา, 2560) ส่วนองค์ประกอบอื่นของปาล์ม ได้แก่ เปลือกนอกต้นปาล์มและใบปาล์มมีงานวิจัยเพิ่มคุณภาพค่าความร้อนโดยการใช้วัสดุประสาน 4 ชนิด ได้แก่ ของเสี่ยกลีเซอรอล แป้งเปียก น้ำกากสำ และตะกอนกลีเซอรอล ผลการศึกษาระบุว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทางใบปาล์มและเปลือกนอกต้นปาล์มโดยใช้ของเสี่ยกลีเซอรอลเป็นวัสดุประสานเหมาะสม ซึ่งให้ค่าความร้อน ความหนาแน่น และปริมาณความชื้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด ยกเว้นแต่ปริมาณเถ้าที่ยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด (กฤติย์ภรณ์ ตรีรงค์ประสิทธิ์, 2553)

นอกจากนี้ยังพบการศึกษาค้นคว้าผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ซึ่งต้องใช้ตัวประสาน เนื่องจากสามารถจับตัวเป็นก้อนได้แต่มีความไม่คงตัว ได้แก่ การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด โดยนำมาผสมกับตัวประสานแป้งมันสำปะหลังหรือโมลาส ซึ่งผลการศึกษาระบุว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานมีค่าความร้อนสูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่ได้จากฟืนไม้มีค่าความชื้นและปริมาณเถ้าต่ำ (อัจฉรา อัครวิจิตรชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดิ์, ณัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ, และ นิภาวรรณ ชูชาติ, 2554) การผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาคุ ซึ่งทำการเผาเปลือกต้นสาคุที่เหลือจากการผลิตแป้งให้เป็นถ่านแล้วบดให้ละเอียดเป็นผงถ่าน จากนั้นจึงนำผงถ่านไปหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูประหว่างผงถ่านเปลือกต้นสาคุ แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ จากการศึกษาค้นคว้าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ ผงถ่านเปลือกต้นสาคุ แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ คือ 2 : 2 : 1 (เสริมศักดิ์ เกิดวัน, รุ่งโรจน์ จินด่าง, และ สุธาพร เกตุพันธ์, 2561) และการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับใบอ้อยโดยใช้ชันเป็นตัวประสาน โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิง คือ การใช้ใบอ้อยเพียงอย่างเดียวกับชันเป็นตัวประสาน จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 7,190 cal/g และเถ้าร้อยละ 2.14 โดยน้ำหนัก (ธีรรัตน์ จีระมะกร, กมลวรรณ แสนคนึง, ผกาวดี สัตวีรงค์, และ กฤติดา

ธรรมรัตน์, 2561) ส่วนกากเหลือจากกลุ่มพืชเศรษฐกิจจำพวกฟางข้าว ใบอ้อย และใบข้าวโพด ได้ทดลองทำการอัดแท่งด้วยกรรมวิธีอัดร้อน และกรรมวิธีอัดเย็นโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งในกรรมวิธีอัดร้อนได้ทดลองอัตราส่วนวัตถุดิบของแท่งเชื้อเพลิงตั้งแต่ 1:9 จนถึง 9:1 โดยสูตรวัตถุดิบที่ให้ค่าความร้อนสูงสุด คือ สูตรใบอ้อยกับใบข้าวโพดที่อัตราส่วน 5:5 มีค่าเท่ากับ 16.50 MJ/kg ในสูตรอัดร้อน และ 17.33 MJ/kg ในสูตรอัดเย็น (เจตน์สิทธิ์ สาสิทธิ์, 2559)

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากมูลสุกรและมูลไก่ เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ต้องใช้ตัวประสานในการขึ้นรูป จึงสามารถลดต้นทุนของตัวประสานได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงจากกากปาล์มน้ำมัน และกากตะกอนน้ำเสียชุมชน แต่เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าที่สูงถึงร้อยละ 32 ถึง 35 จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานกับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม แต่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในระดับครัวเรือนได้ (ยุวรัตน์ เงินเย็น, ชนิภรณ์ อุตสารห์, และ กนกวรรณ ฤทธิวิธ, 2561)

#### 2.4.2 งานวิจัยด้านเชื้อเพลิงชีวมวลจากของเหลือใช้ในอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรมมักพบของเหลือใช้ ซึ่งสร้างปัญหาในการกำจัดส่งผลให้เกิดต้นทุนในการจัดการของเหลือใช้เหล่านี้ จึงมีการศึกษานำของเสียเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิง เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและลดการใช้พลังงาน ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิง คือ การใช้กากตะกอนบำบัดน้ำเสียร้อยละ 95 ต่อกากดินฟอกสีร้อยละ 5 โดยใช้กลีเซอรอลดิบเป็นตัวประสานจะให้ค่าความร้อนสูงสุด 3,548.10 cal/g (ปริญญาธิรัฐ หนูสงค์, 2560) ด้านอุตสาหกรรมน้ำตาลพบปัญหาในการกำจัดกากหม้อกรอง และปัญหาด้านการขนส่งเนื่องจากกากหม้อกรองซึ่งมีลักษณะน้ำหนักเบาทำให้เสียต้นทุนในการขนส่งไปยังผู้รับกำจัด จึงมีทดลองนำกากหม้อกรองมาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำร่วมกับกากอ้อย แต่ยังคงพบปัญหาปริมาณเถ้าของกากหม้อกรองหลงเหลือจากการเผาไหม้ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 14.5 เมื่อเทียบกับกากอ้อยคิดเป็นร้อยละ 2.4 ซึ่งเถ้าที่เหลือยังมีองค์ประกอบของแร่ธาตุหลักที่เหมาะสมในการปรับปรุงดิน เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมงกานีส (George, et al., 2010)

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้ได้ศึกษาวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลแห่งหนึ่งใน จ. สระบุรี ได้แก่ กากหม้อกรองและกากอ้อย โดยการเตรียมวัตถุดิบ ลดความชื้น การอัดขึ้นรูป การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือนที่โรงงานดังกล่าว จากนั้นทำการส่งตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate analysis) ที่ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

#### 3.1 แผนงานวิจัย

การวิจัยจะทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและคุณสมบัติต่างๆของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อย ซึ่งแบ่งแผนงานวิจัยออกเป็น 5 ส่วน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนแผนงานวิจัย

### 3.1.1 ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

1. นำกากหม้อกรอง 300 kg มาทำการลดความชื้นกากหม้อกรองด้วยการตากแดด จนความชื้นเหลือประมาณ 20% ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมกากหม้อกรองในการทดลองนำร่อง

2. นำกากหม้อกรองมาทำการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Biomass pellet) ด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวลครึ่งละ 100 kg ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และตรวจสอบสภาพความคงตัวของเชื้อเพลิง
3. จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง และกากอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลัก ไปทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ
4. ทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตามวิธี ASTM D5865 และ องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณตามวิธี ASTM D3172-3175 ของเชื้อเพลิงจากกากหม้อกรอง และกากอ้อย และสรุปผลความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

### 3.1.2 ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

1. นำกากหม้อกรองและกากอ้อย มาทำการลดความชื้นกากหม้อกรองด้วยการตากแดด จนความชื้นเหลือประมาณ 10% และ 15% ตามมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทย
2. ทำการผสมกากหม้อกรองกับกากอ้อยที่อัตราส่วนกากหม้อกรอง 0% จนถึง 100% ทั้งหมด 11 สัดส่วน
3. นำกากหม้อกรองและกากอ้อยที่ผสมไว้อัตราส่วนต่างๆ มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Biomass pellet) ด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวลเป็นเวลา 10 นาที โดยทำการ



ทดลอง 3 ซ้ำ ตามแผนการทดลองดังตารางที่ 3.1 จากนั้นบันทึกน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตได้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปใน 10 นาที

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

สัดส่วนกากหม้อกรอง (%)	ความชื้น (%)	ลำดับการทดลอง (n=3)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	10	39	38	40
	15	29	7	3
10	10	51	37	54
	15	17	59	56
20	10	4	60	18
	15	45	57	41
30	10	10	16	5
	15	24	43	52
40	10	2	35	42
	15	9	26	25
50	10	14	48	62
	15	32	8	22
60	10	61	21	63
	15	15	36	28
70	10	12	47	27
	15	33	65	6
80	10	19	44	64
	15	53	58	46
90	10	11	55	66
	15	50	20	1
100	10	49	30	34
	15	31	23	13

3. นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% 50% และ 100% ความชื้น 10% และ 20% ไปทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตามวิธี ASTM D5865 องค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณตามวิธี ASTM D3172-3175

4. นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความยาวเฉลี่ย ความคงทน และปริมาณผงฝุ่น

5. นำผลวิเคราะห์จากขั้นตอนที่ 3 ไปตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน และสร้างสมการถดถอย เพื่อนำไปพยากรณ์ค่าความร้อน และปริมาณเถ้าที่สัดส่วนอื่นๆ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MINITAB 18

6. นำผลวิเคราะห์จากขั้นตอนที่ 4 ไปเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพกับมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในไทย และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักสัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ

### 3.1.3 ขั้นตอนการศึกษาค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต

1. คำนวณค่าความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ค่าความร้อนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10% และ 15%

2. คำนวณต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงในแต่ละอัตราส่วน โดยใช้ข้อมูลจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในการทดสอบอัดเชื้อเพลิง 10 นาที ค่าแรงงาน และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้

3. ทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)

### 3.1.4 ขั้นตอนการนำชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองไปต้มน้ำกับเตาในครัวเรือน

1. นำตัวอย่างจากการทดลองทั้ง 11 สัดส่วน ชั่งน้ำหนักสัดส่วนละ 1 kg มาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อต้มน้ำกับเตาถ่านในครัวเรือน โดยมีการออกแบบการทดลองต้มน้ำเดือดดังตารางที่ 3.2

2. ใช้น้ำมันก๊าด (Kerosene) เป็นสารช่วยในการจุดติดไฟ ปริมาตร 3 ml หยดลงเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนจะจุดไฟ

3. บันทึกน้ำหนักของภาชนะและน้ำ 1,000 ml ดังรูปที่ 3.3

4. เมื่อเชื้อเพลิงอัดเม็ดจุดติดไฟดีแล้ว วางปีกเกอร์ที่มีน้ำปริมาตร 1,000 ml จากนั้นต้มน้ำจนถึงจุดเดือด โดยสังเกตจากฟองที่ระดับน้ำด้านบนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองต้มน้ำเดือดด้วยเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สัดส่วนกากหม้อกรอง (%)	ความชื้น (%)	ลำดับการทดลอง (n=3)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	10	6	18	54
	15	55	36	23
10	10	63	50	26
	15	53	39	22
20	10	49	31	20
	15	27	64	11
30	10	5	66	4
	15	35	9	52
40	10	38	61	24
	15	56	46	60
50	10	7	47	14
	15	3	8	59
60	10	43	45	29
	15	13	62	44
70	10	1	34	25
	15	58	30	19
80	10	41	2	65
	15	42	16	15
90	10	37	51	33
	15	57	12	40
100	10	21	17	28
	15	10	48	32

5. บันทึกระยะเวลาในการต้มน้ำจนถึงจุดเดือด อุณหภูมิน้ำก่อนต้มและตอนเดือด

6. บันทึกน้ำหนักของน้ำที่หายไป วัดโดยการปิดฝาปิ๊งเกอร์ที่มีน้ำร้อนอยู่ ทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักแล้วหาค่ากลับกับน้ำหนักน้ำและภาชนะที่ชั่งไว้ก่อนการทดลอง จะได้น้ำหนักน้ำที่หายไป

7. บันทึกปริมาณเชื้อเพลิง วัดปริมาณโดยการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงเริ่มต้นหาค่ากลับกับเชื้อเพลิงที่คงเหลือในเตาถ่าน บันทึกผลการทดลองขั้นตอนที่ 4 ถึง 6

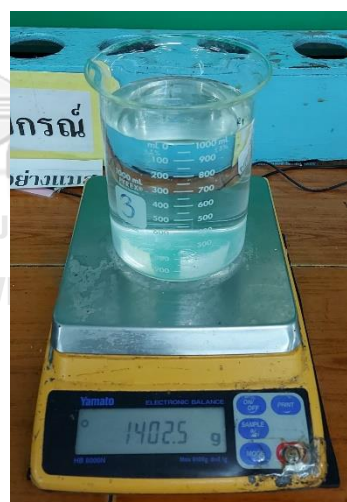
8. คำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Heat efficiency) จากสมการที่ 3.1 และเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ที่สัดส่วนและความชื้นต่างๆ

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = \frac{M_{wi}C_p(T_b - T_i) + M_{we}H_l}{M_m H_m} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ	$M_{wi}$	คือ น้ำหนักน้ำก่อนต้ม	$M_{we}$	คือ น้ำหนักของน้ำที่หายไป
	$C_p$	คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ	$H_l$	คือ ความร้อนแฝงของน้ำ
	$T_b$	คือ อุณหภูมิของน้ำเดือด	$M_m$	คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้
	$T_i$	คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม	$H_m$	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

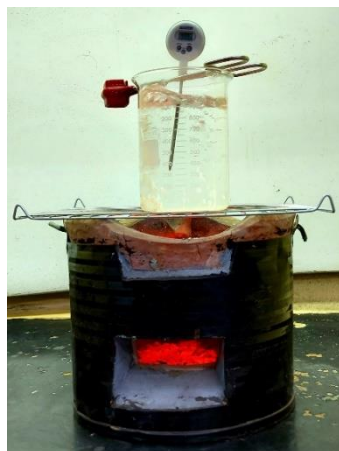


ก) การชั่งน้ำหนักภาชนะ



ข) การชั่งน้ำหนักน้ำและภาชนะก่อนทดลองต้มน้ำ

รูปที่ 3.3 การชั่งน้ำหนักภาชนะและน้ำก่อนทำการทดลองต้มน้ำ



รูปที่ 3.4 การทดสอบการต้มน้ำเดือด (Water boiling test)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมแบบลูกเต๋า (Cubic mixer)



รูปที่ 3.5 เครื่องผสมแบบลูกเต๋า

2. เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวนหรือแนวตั้ง



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวนหรือแนวตั้ง

3. เครื่องชั่งแบบพิกัดน้ำหนักสูง



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่งแบบพิกัดน้ำหนักสูง

4. เครื่องชั่งแบบละเอียด



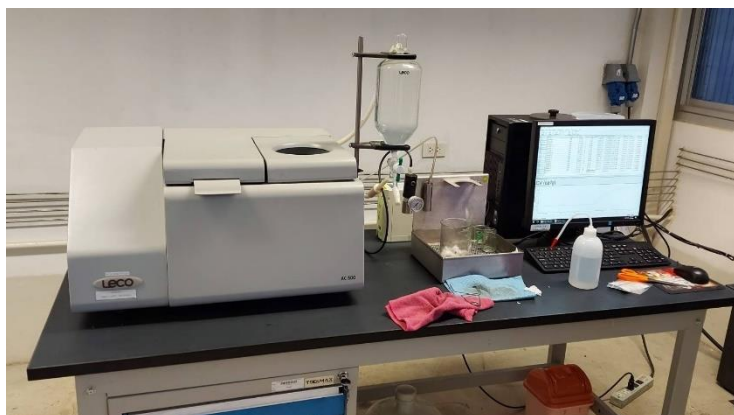
รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งแบบละเอียด

5. เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง



รูปที่ 3.9 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง

6. บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ Leco รุ่น AC500



รูปที่ 3.10 บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

7. Thermogravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ Leco รุ่น TGA701



รูปที่ 3.11 Thermogravimetric Analyzer

8. เตอบ



รูปที่ 3.12 เตอบ

9. เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาดรู 3.15 mm



รูปที่ 3.13 เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนมาตรฐาน ขนาดรู 3.15 mm

10. เครื่องวัดความชื้นอัตโนมัติ



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความชื้นอัตโนมัติ

11. เวอร์เนียคาลิปเปอร์



รูปที่ 3.15 เวอร์เนียคาลิปเปอร์



## 12. เตาในครัวเรือน



รูปที่ 3.16 เตาในครัวเรือน

### 3.3 วิธีทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

การทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในงานวิจัยนี้ทำตามมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของประเทศสหรัฐอเมริกา (PFI Standard) ซึ่งสถาบันเชื้อเพลิงอัดเม็ดของสหรัฐอเมริกา (Pellet Fuel Institute ; PFI) กำหนดมาตรฐานและวิธีการทดสอบของเชื้อเพลิงอัดเม็ดไว้ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C702-98 มีรายละเอียดตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามมาตรฐาน ASTM C702-98

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	ปริมาณตัวอย่างที่เก็บมาทดสอบ (kg)
ค่าความร้อน	ASTM D5865	1.25
ความชื้น	ASTM D3173	1.25
ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	
ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	
คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	
ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	10
ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	2.5
ความคงทน	PFI Standard (2018)	5
ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value - ASTM D 5865)

1. เตรียมลวดผูกกับแท่งเหล็กด้านล่างของฝาบอมบี้

2. เตรียมตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ต่อครั้งประมาณ 1 g
3. ใส่ตัวอย่างลงในเครื่อง เติมน้ำกลั่น 1 ml
4. ปิดฝาเครื่อง เติมออกซิเจนจนความดันภายในประมาณ 30 ATM
5. เติมน้ำกลั่นปริมาณ 2 ลิตร ที่อุณหภูมิประมาณ 24 °C
6. เปิดเครื่องบอมบ์ จากนั้นอ่านอุณหภูมิของน้ำในเครื่องจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่จึงหยุดเครื่อง
7. นำบอมบ์ออกจากเครื่อง ปลดออกก๊าซออกเครื่อง
8. วัดความยาวหลอดที่เหลือ แล้วบันทึกลงเครื่องประเมินค่าความร้อนของตัวอย่าง

### 3.3.2 การวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture - ASTM D 3173)

1. เตรียมตัวอย่างให้ไว้ที่อุณหภูมิ 150 °C
2. จากนั้นอบด้วยทนความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปใส่โถดูดความชื้นให้เย็นตัวลง
3. เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด 1.0 g ใส่ในถ้วยทนความร้อน
4. นำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักสุดท้ายหลังอบเพื่อคำนวณค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ตามสมการที่ 3.2

$$M = (W_m / W_{mi}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

เมื่อ M คือ ความชื้น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

$W_m$  คือ น้ำหนักที่เหลือหลังอบทดสอบความชื้น หน่วยเป็น g

$W_{mi}$  คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการอบทดสอบความชื้น หน่วยเป็น g

### 3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile matter - ASTM D 3175)

1. เผาถ้วยทนความร้อน ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวลง
2. เตรียมตัวอย่างประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยทนความร้อน ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง
3. นำตัวอย่างเผาในเครื่องที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที (ขณะเผาปิดฝาถ้วยทนความร้อน) ตั้งไว้ทิ้งไว้ 20 นาที แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือหลังเผา เพื่อคำนวณค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามสมการที่ 3.3

$$VM = (W_v / W_{vi}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

เมื่อ VM คือ เถ้า หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

$W_v$  คือ น้ำหนักที่เหลือหลังเผาทดสอบสารระเหย หน่วยเป็น g

$W_{vi}$  คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการเผาทดสอบสารระเหย หน่วยเป็น g

### 3.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash - ASTM D 3174)

1. เผาถ้วยทนความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

2. เตรียมตัวอย่างประมาณ 1.0 กรัม ใส่ในถ้วยทนความร้อน

3. เผาตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักเถ้าที่เหลือจากการเผา นำไปคำนวณปริมาณเถ้าด้วยสมการ 3.4

$$\text{Ash} = (W_a / W_{ai}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

เมื่อ Ash คือ เถ้า หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

$W_a$  คือ น้ำหนักเถ้าหลังการเผาทดสอบเถ้า หน่วยเป็น g

$W_{ai}$  คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนการเผาทดสอบเถ้า หน่วยเป็น g

### 3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความชื้น ปริมาณสารระเหย และเถ้า ให้นำค่าทั้ง 3 ค่ามาคำนวณในสมการที่ 3.5 จะได้ปริมาณคาร์บอนคงตัว

$$FC = 100 - M - \text{Ash} - VM \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

เมื่อ FC คือ คาร์บอนคงตัว หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

M คือ ความชื้น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

Ash คือ เถ้า หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

VM คือ สารระเหย หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

### 3.3.6 การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk density - ASTM E873)

- นำตัวอย่างบรรจุในกล่องขนาดความกว้าง 305 mm ความยาว 305 mm และความสูง 305 mm โดยปล่อยเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงจากปากด้านบนกล่องถึงจุดปล่อยเชื้อเพลิงอัดเม็ด 610 mm
- จากนั้นปล่อยกล่องกระทบพื้นจากความสูง 150 mm จำนวน 5 ครั้ง พร้อมกับเติมแท่งเชื้อเพลิงจนกว่าจะเต็มกล่องพอดีปากกล่องด้านบน
- ชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักของกล่อง คำนวณตามสมการ 3.6 และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 ครั้ง

$$D_b = (W_d - W_{di}) / V_d \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

เมื่อ	$D_b$	คือ ความหนาแน่นรวม หน่วยเป็น $\text{kg/m}^3$
	$W_d$	คือ น้ำหนักเชื้อเพลิงรวมภาชนะ หน่วยเป็น kg
	$W_{di}$	คือ น้ำหนักภาชนะ หน่วยเป็น kg
	$V_d$	คือ ปริมาตรของภาชนะ หน่วยเป็น $\text{m}^3$

### 3.3.7 การวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิง (Average length - PFI Standard)

- เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด จำนวน 1,000 g
- วัดความยาวของตัวอย่างแต่ละชิ้นโดยใช้เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.1 mm (เวอร์เนียคาลิปเปอร์) ตามรูปที่ 3.17 และบันทึกความยาวที่วัดได้ จากนั้นคำนวณตามสมการที่ 3.7 และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 ครั้ง

$$L = L_a / N \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

เมื่อ	$D_u$	คือ ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด หน่วยเป็น mm
	$L_a$	คือ ความยาวรวมของตัวอย่างแต่ละชิ้น หน่วยเป็น mm
	$N$	คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด หน่วยเป็น ชิ้น



รูปที่ 3.17 การวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชือกเพลิงอัดเม็ด

### 3.3.8 การวิเคราะห์ค่าความคงทน (Durability - PFI Standard)

1. เตรียมตัวอย่างเชือกเพลิงอัดเม็ดจำนวน 1,000 g
2. นำตัวอย่างเชือกเพลิงอัดเม็ดร้อนด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm เพื่อแยกสิ่งปนออกจากตัวอย่างเชือกเพลิง โดยเก็บเฉพาะแท่งเชือกเพลิงที่ค้างอยู่บนตะแกรงร้อนนำไปวิเคราะห์ความคงทน
3. ชั่งตัวอย่างจำนวน 500 g
4. นำตัวอย่างเชือกเพลิงอัดเม็ดจำนวน 500 g ใส่ลงในเครื่องทดสอบความทนทานของแท่งเชือกเพลิงแบบอัดเม็ด โดยหมุนด้วยอัตรา 50 รอบ/นาที ทั้งหมด 500 รอบ (เป็นเวลา 10 นาที)
5. นำตัวอย่างเชือกเพลิงอัดเม็ดออกจากเครื่องทดสอบความทนทาน แล้วนำมา ร้อนด้วยตะแกรงร้อนที่มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm เพื่อแยกส่วนที่แตกหักออกและชั่งน้ำหนักด้วยความละเอียด 0.1 g
6. คำนวณค่าความทนทานของเชือกเพลิงอัดเม็ดด้วยสมการ 3.8 และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 ครั้ง

$$D_u = 100 \times (W_u / W_{ui})$$

สมการที่ 3.8

- เมื่อ  $D_u$  คือ ความคงทน หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล
- $W_u$  คือ มวลตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงหลังทดสอบ หน่วยเป็น g
- $W_{ui}$  คือ มวลตัวอย่างก่อนทดสอบความคงทน หน่วยเป็น g

### 3.3.9 การวิเคราะห์ปริมาณผงฝุ่น (Fines - PFI Standard)

1. เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลจากตัวอย่างที่แบ่ง จำนวน 3,000 g
2. แบ่งตัวอย่างมาจำนวน 500 g แล้วชั่งและบันทึกมวลแน่นอนที่ชั่งได้
3. นำตัวอย่างไปร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm จนหมดฝุ่นแล้ว
4. ชั่งมวลอีกครั้งและบันทึกมวลแน่นอนที่ชั่งได้ คำนวณตามสมการ 3.9 และทำการวิเคราะห์ซ้ำอีก 2 ครั้ง

$$F = 100 \times (W_{fi} - W_f) / W_{fi} \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

เมื่อ  $F$  คือ ปริมาณฝุ่น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยมวล

$W_{fi}$  คือ มวลตัวอย่างก่อนร่อน หน่วยเป็น g

$W_f$  คือ มวลตัวอย่างหลังร่อน หน่วยเป็น g

### 3.4 ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนของกากหม้อกรองต่อกากอ้อย ความชื้นของกากหม้อกรองและกากอ้อยก่อนทำการอัดขึ้นรูปควบคุมความชื้นไว้ที่ 10% และ 15%
2. ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ความหนาแน่นรวม ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ความคงทน ปริมาณผงฝุ่น ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน และระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด
3. ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ชนิดเครื่องอัดเม็ดชีวมวล (แบบหัวอัตร่วงแหวน) และ เตาถ่านที่ใช้ในครัวเรือน

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยเรื่องการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรองในอุตสาหกรรมน้ำตาล เป็นการนำกากหม้อกรองซึ่งของเหลือใช้จากกระบวนการกรอง แล้วทำการลดความชื้นด้วยการตากแดด เพื่อเพิ่มค่าความร้อน จากนั้นผสมกับกากอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในอุตสาหกรรมน้ำตาลแล้วทำการอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวน (Ring Die) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตที่สัดส่วนต่างๆ เมื่อได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจึงทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ดังนั้นผลการศึกษาก็แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

- 4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ
- 4.2 ขั้นตอนการศึกษาค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
- 4.3 ขั้นตอนการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
  - 4.3.1 ความหนาแน่นรวม
  - 4.3.2 ความยาวเฉลี่ย
  - 4.3.3 ความคงทน
  - 4.3.4 ปริมาณผงฝุ่น
- 4.4 ขั้นตอนการศึกษาค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต
  - 4.4.1 การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนอัดขึ้นรูป
  - 4.4.2 การประเมินต้นทุนการผลิตรวมของชีวมวลอัดเม็ด (บาท/ตัน)
  - 4.4.3 การประเมินค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)
- 4.5 ขั้นตอนการศึกษากการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน
  - 4.5.1 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
  - 4.5.2 การศึกษาระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### 4.1 ผลการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ

จากการศึกษาทดลองอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่สัดส่วนต่างๆ ด้วยวัตถุดิบที่มีความชื้น 10% และ 15% ที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 0% จนถึง 100% ทั้งหมด 11 สัดส่วน ในขั้นตอนการทดสอบพบว่า สัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10% ไม่สามารถอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวนได้ เนื่องจากวัตถุดิบติดอยู่ในชุดลูกกลิ้งหัวอัดจนกระแสน้ำในระบบการอัดสูงเกินกว่าภาระไฟฟ้าของมอเตอร์ เป็นผลให้มอเตอร์ของเครื่องหยุดทำงาน ดังรูปที่ 4.1 แสดงการติดของวัตถุดิบภายในเครื่องอัดเม็ดชีวมวล

จากปัญหาที่พบเมื่อพิจารณาวัตถุดิบที่ใช้อัดเม็ดจะพบว่ากากอ้อยมีองค์ประกอบของเซลลูโลสประมาณ 33.4% (Sun, et al., 2004) มีลักษณะทางกายภาพเป็นเส้นใยขนาดใหญ่จึงต้องทำลายโครงสร้างดังกล่าวด้วยการสับหรือบดละเอียดให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงก่อนทำการอัดเม็ด ขณะที่กากหม้อกรองมีองค์ประกอบของเซลลูโลสประมาณ 8.9% (George, et al., 2010) ขนาดชีวมวลที่เล็กลงช่วยให้ง่ายต่อการอัดขึ้นรูป เพราะผิวสัมผัสสำหรับการสร้างพันธะเกาะยึดได้มากและทำให้กระบวนการอัดทำได้เร็ว



ก) ภาพด้านหน้า

ข) ภาพด้านข้าง


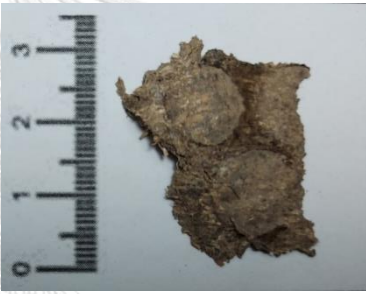




รูปที่ 4.1 การทดลองอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10%











จากปัญหาที่พบจากสัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10% ที่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ กรณีการผลิตด้วยเครื่องอัดเม็ดชีวมวลกำลังผลิตสูง เช่น แบบวงแหวน อาจต้องปรับสภาพด้วยไอน้ำ (Steam Conditioning) ก่อนขั้นตอนการอัดเม็ด เพื่อเพิ่มความสามารถของเครื่องอัดเม็ด







ซึ่งวัตถุดิบจะถูกพ่นด้วยไอน้ำแห้งก่อน ซึ่งหลังจากผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำแล้ว จะช่วยให้ลิกนิน (Lignin) เกิดการอ่อนตัวลง ซึ่งอุณหภูมิขณะการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดควรอยู่ประมาณ 75-85 °C เพราะเป็นอุณหภูมิที่ลิกนินของชีวมวลจะละลายและออกจากเส้นใยผนังเซลล์มาผสมกับอนุภาคอื่นๆ ของชีวมวลขณะทำการอัด อีกทั้งมีผลให้แรงเสียดทานที่หัวอัด (Die) น้อยลงเพราะวัตถุดิบนั้นอยู่ในสถานะที่อ่อนตัว (Brebu, and Vasile, 2010) โดยผลการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

กากหม้อ กรอง	ความชื้น 10%	ความชื้น 15%	ผลการขึ้นรูป
0%			ไม่สามารถขึ้นรูป เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้
10%			ไม่สามารถขึ้นรูป เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้
20%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้

กากหม้อ กรอง	ความชื้น 10%	ความชื้น 15%	ผลการขึ้นรูป
30%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
40%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
50%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
60%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
70%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้

กากหม้อ กรอง	ความชื้น 10%	ความชื้น 15%	ผลการขึ้นรูป
80%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
90%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้
100%			สามารถขึ้นรูปเป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



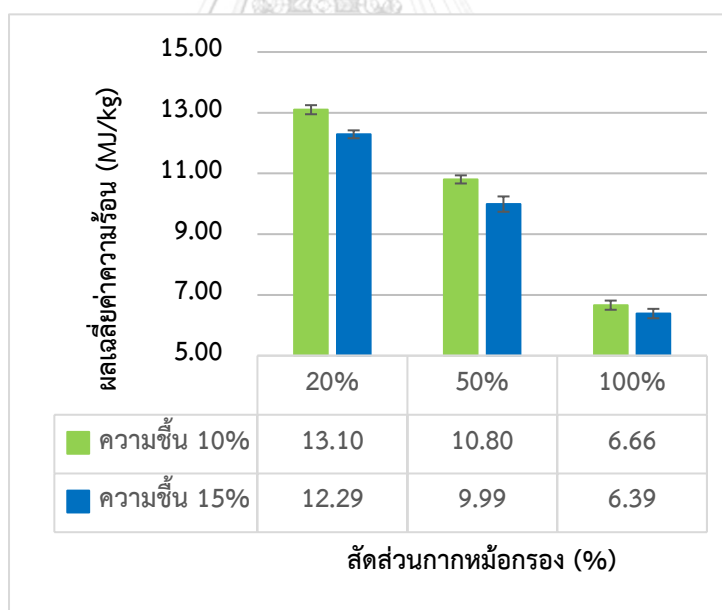
รูปที่ 4.2 การซ่อมบำรุงเครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบวงแหวน

จากการทดสอบผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ยังพบปัญหาด้านการซ่อมบำรุงระหว่างการผลิต เช่น การเปลี่ยนลูกกลิ้งและหัวอัดในเครื่องอัดแบบหัวอัดวงแหวน (Ring Die) เป็นขั้นตอนที่ทำได้ยาก และใช้เวลามากกว่าแบบหัวอัดแนวราบ (Flat Die) จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการเคลื่อนย้าย และเปลี่ยนหัวอัด (Die) อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบไปประมาณ 2-3 ชั่วโมงจะพบปัญหาหัวอัดติดในหัวอัดต้องใช้แรงงานในการเจาะนำหัวอัดที่ติดออกมา ดังรูปที่ 4.2

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 50% และ 100% ที่ความชื้น 10% และ 15% แสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความร้อนซึ่งเป็นตัวแปรตามกับสัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้นที่เป็นตัวแปรต้น จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นดังนี้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ค่าความร้อนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

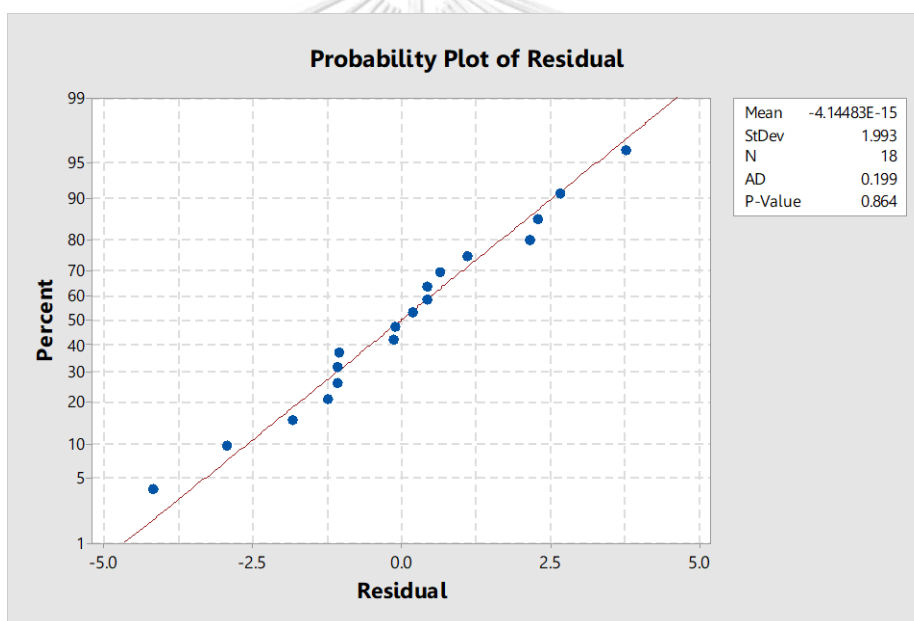
### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling มี P-value เท่ากับ 0.864 ซึ่งมากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.4 Normal probability plot ของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อน ดังตารางที่ 4.2 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อค่าความร้อน)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_A \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อค่าความร้อน)}$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อค่าความร้อน)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความชื้นไม่มีผลต่อค่าความร้อน)}$

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_{A B})_{11} = (\mu_{A B})_{12} = \dots = (\mu_{A B})_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความร้อน)

$H_1 : \text{มีค่า } (\mu_{A B})_{ij} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความร้อน)}$

กำหนดให้  $i = \text{ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง} = 1, 2, \dots, 9$

$j = \text{ระดับของปัจจัยความชื้น} = 1, 2$

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	2	116.884	58.442	3108.62	0.000
Moisture	1	1.804	1.8037	95.89	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	2	0.086	0.0430	2.29	0.132
Error	12	0.226	0.0188		
Total	17	119.000			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.2 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

เมื่อนำผลการทดลองค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.3 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	63.8227	63.8227	5955.91	0.000
Ratio of Filter cake	1	63.8227	63.8227	5955.91	0.000
Error	7	0.0750	0.0107		
Total	8	63.8977			

### Model Summary

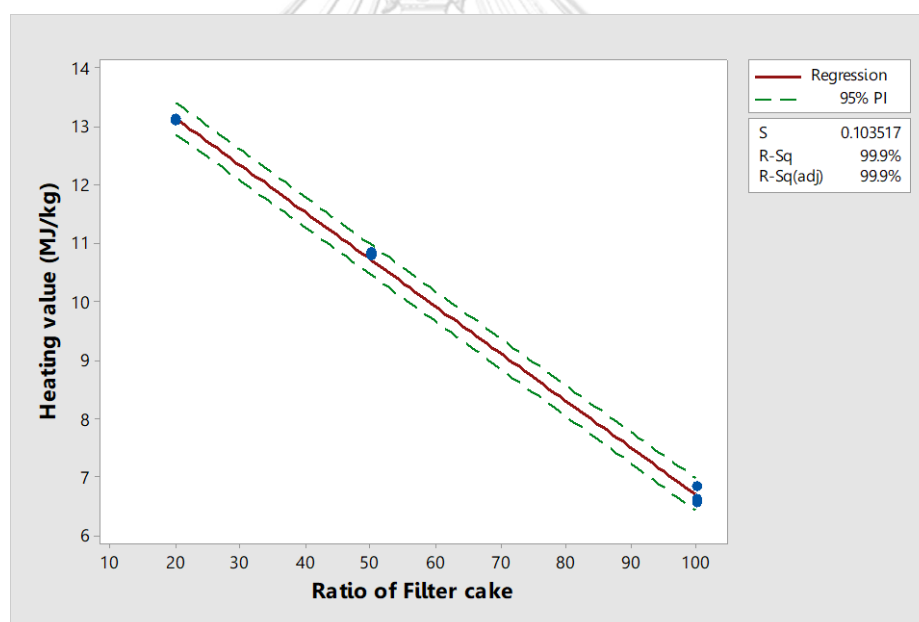
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.103517	99.88%	99.87%	99.79%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	14.7622	0.0686	215.29	0.000	
Ratio of Filter cake	-0.08070	0.00105	-77.17	0.000	1.00

### Regression Equation

ค่าความร้อน (ความชื้น 10%) = 14.762 - 0.08070 Ratio of Filter cake



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในตารางที่ 4.3 พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง ความชื้น 10% มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่



ความชื้น 10% สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.88% สามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.5

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำผลการทดลองค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.4 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ส่วนตัวแปรตาม คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	53.1063	53.1063	1934.09	0.000
Ratio of Filter cake	1	53.1063	53.1063	1934.09	0.000
Error	7	0.1922	0.0275		
Total	8	53.2985			

#### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.165705	99.64%	99.59%	99.46%

## Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	13.728	0.110	125.07	0.000	
Ratio of Filter cake	-0.07361	0.00167	-43.98	0.000	1.00

## Regression Equation

ค่าความร้อน (ความชื้น 15%) = 13.728 - 0.07361 Ratio of Filter cake

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.4 พบว่า สัดส่วนกากหม้อกรอง ความชื้น 15% มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.64% สามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.6

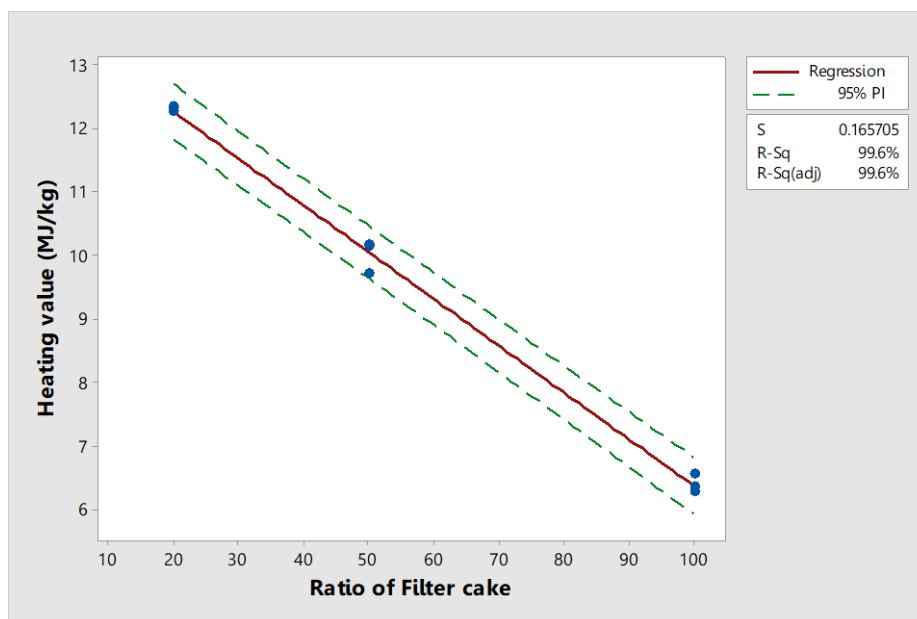
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ของสัดส่วนกากหม้อกรอง มาแทนในสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรองอื่นๆ ซึ่งมีความชื้น 10% และ 15% จะได้สมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\text{ค่าความร้อน (ความชื้น 10\%)} = 14.762 - 0.0807 F_1 \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

$$\text{ค่าความร้อน (ความชื้น 15\%)} = 13.728 - 0.07361 F_2 \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

เมื่อ  $F_1$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

$F_2$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 50% และ 100% ที่ความชื้น 10% และ 15% แสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณเถ้าซึ่งเป็นตัวแปรตามกับสัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้นที่เป็นตัวแปรต้น จึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นดังนี้

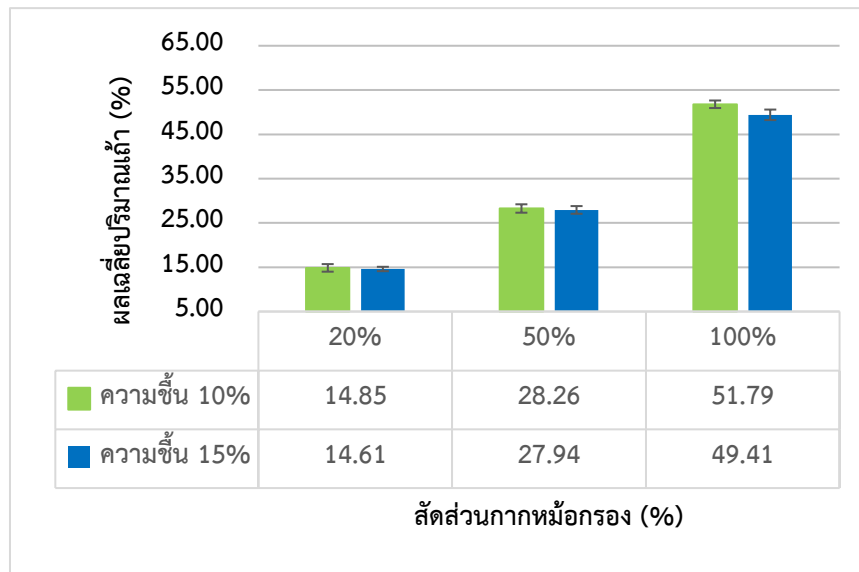
การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

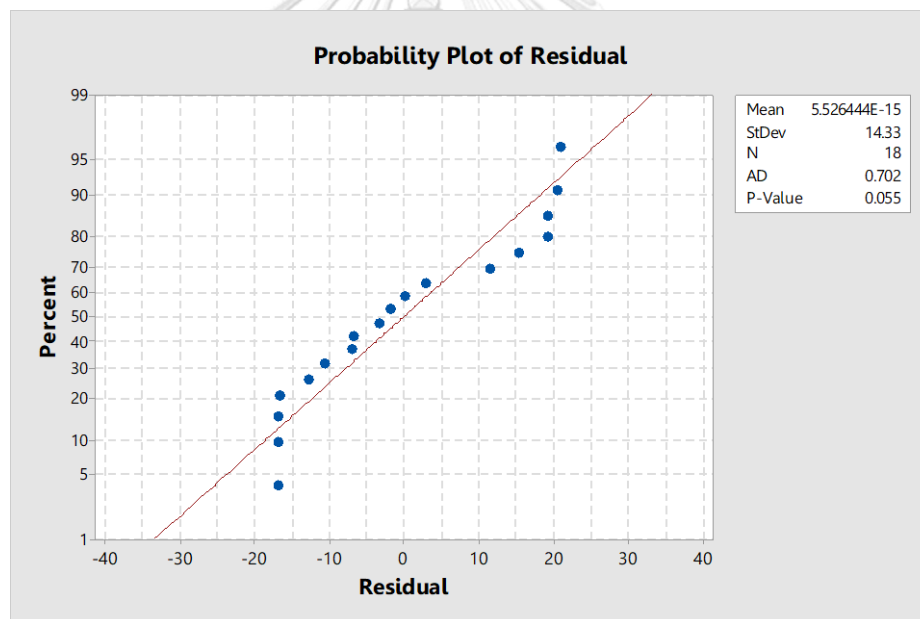
$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.055 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ปริมาณเก่ากับสัดส่วนกากหม้อกรอง



รูปที่ 4.8 Normal probability plot ของปริมาณเก่าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเก่า ดังตารางที่ 4.5 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความชื้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณเก่าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับปริมาณเก่าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อปริมาณเถ้า)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_A \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อปริมาณเถ้า)}$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อปริมาณเถ้า)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความชื้นไม่มีผลต่อปริมาณเถ้า)}$

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อปริมาณเถ้า)

$H_1 : \text{มีค่า } (\mu_A \mu_B)_{ij} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อปริมาณเถ้า)}$

กำหนดให้  $i = \text{ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง} = 1, 2, \dots, 9$

$j = \text{ระดับของปัจจัยความชื้น} = 1, 2$

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	2	3946.487	1973.2435	4384.99	0.000
Moisture	1	4.35	4.35	9.74	0.009
Ratio of Filter cake * Moisture	2	1.173	0.5865	1.30	0.297
Error	12	5.36	0.45		
Total	17	3957.370			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.5 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

เมื่อนำผลการทดลองปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.6 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	2097.27	2097.27	7269.96	0.000
Ratio of Filter cake	1	2097.27	2097.27	7269.96	0.000
Error	7	2.02	0.29		
Total	8	2099.29			

### Model Summary

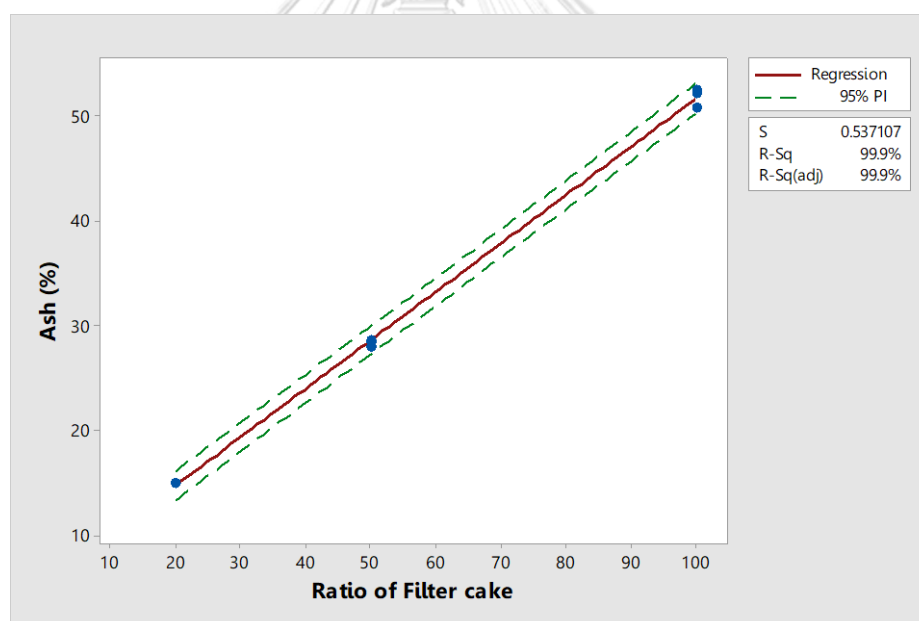
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.537107	99.90%	99.89%	99.82%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5.421	0.356	15.24	0.000	
Ratio of Filter cake	0.46261	0.00543	85.26	0.000	1.00

### Regression Equation

ปริมาณเถ้า (ความชื้น 10%) = 5.421 + 0.46261 Ratio of Filter cake



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.6 พบว่า สัดส่วนกากหม้อกรอง ความชื้น 10% มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยอย่างได้

อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.90% สามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.9

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำผลการทดลองปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.7 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	1849.85	1849.85	3338.09	0.000
Ratio of Filter cake	1	1849.85	1849.85	3338.09	0.000
Error	7	3.88	0.55		
Total	8	1853.73			

#### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.744423	99.79%	99.76%	99.61%



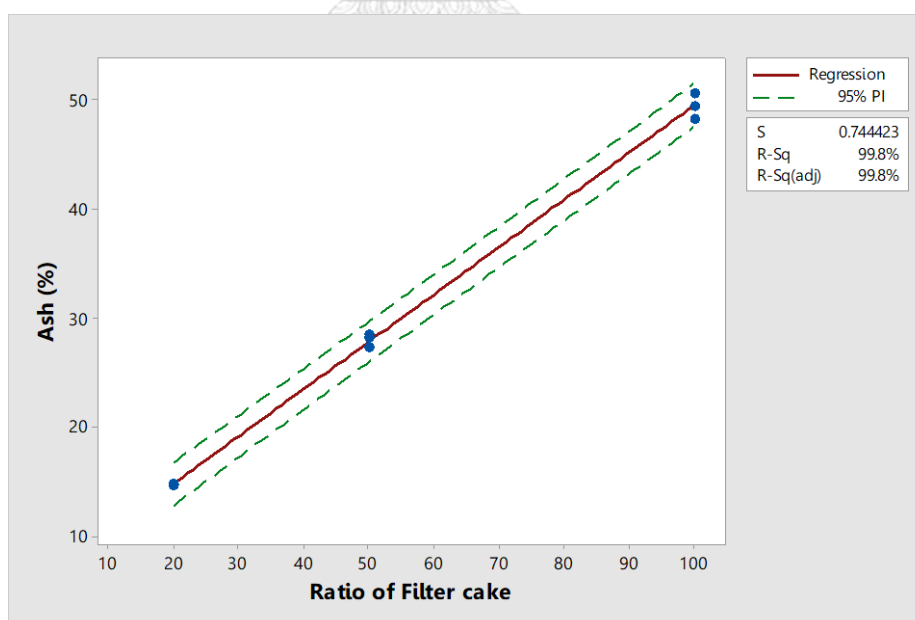
### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	6.032	0.493	12.23	0.000	
Ratio of Filter cake	0.43447	0.00752	57.78	0.000	1.00

### Regression Equation

ปริมาณเถ้า (ความชื้น 15%) = 6.032 + 0.43447 Ratio of Filter cake

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.8 พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง ความชื้น 15% มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.79% สามารถแสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของปริมาณเถ้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสัดส่วนกากหม้อกรอง มาแทนในสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรองอื่นๆ ซึ่งมีความชื้น 10% และ 15% จะได้สมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ความชื้น 10\%)} = 5.421 + 0.46261 F_1 \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

$$\text{ปริมาณเถ้า (ความชื้น 15\%)} = 6.032 + 0.43447 F_2 \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

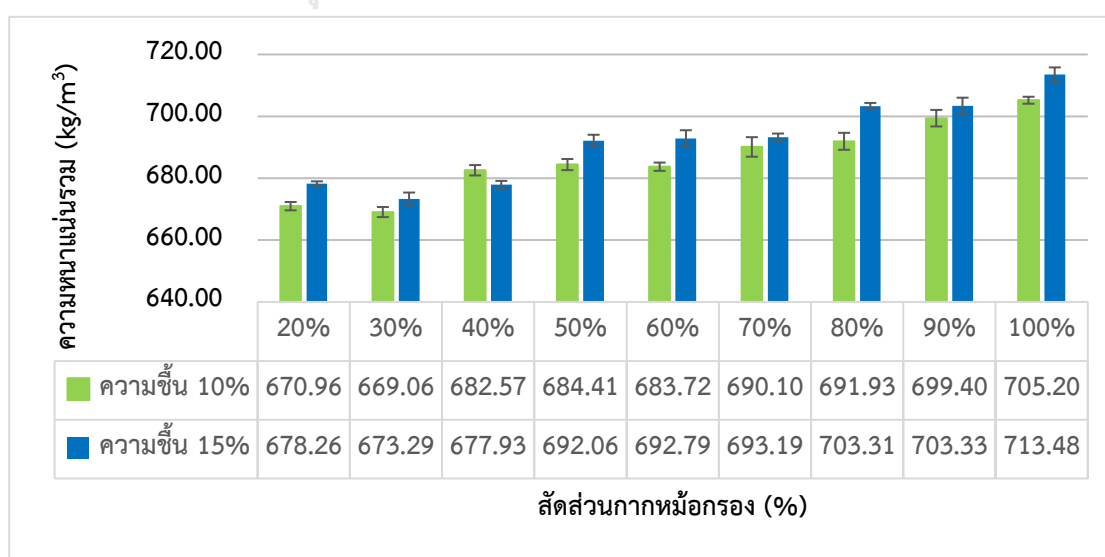
เมื่อ  $F_1$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

$F_2$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

##### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ตามรูปที่ 4.11 พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีตั้งแต่  $669.06 \pm 1.61 \text{ kg/m}^3$  ถึง  $713.48 \pm 2.35 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มอก. 2772-2560 ชั้นคุณภาพที่ 1 และ 2 ซึ่งกำหนดไว้  $600 \text{ kg/m}^3$  ความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนกากหม้อกรองลดลง เนื่องจากความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรองที่มีค่าประมาณ  $310 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งสูงกว่ากากอ้อยที่มีค่าประมาณ  $170 \text{ kg/m}^3$  (Wang, 2015) (Gil, et al., 2010)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

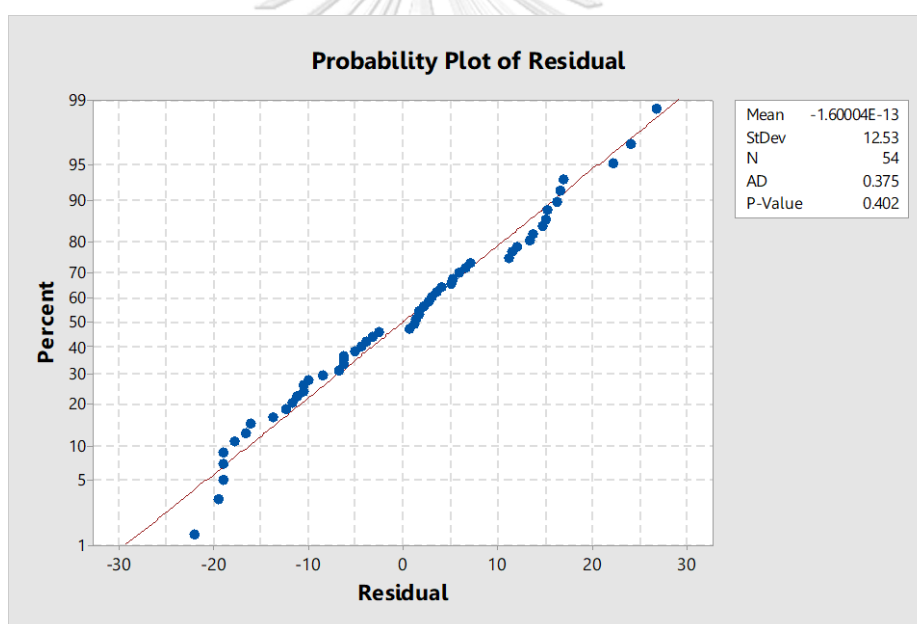
### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.12 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.402 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.12 Normal probability plot ของความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นรวม ดังตารางที่ 4.8 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้นส่วนตัวแปรตาม คือ ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวม)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_A \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความหนาแน่นรวม)}$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวม)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความชื้นไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวม)}$

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อความหนาแน่นรวม)

$H_1 : \text{มีค่า } (\mu_A \mu_B)_{ij} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวม)}$

กำหนดให้  $i =$  ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง  $= 1, 2, \dots, 9$

$j =$  ระดับของปัจจัยความชื้น  $= 1, 2$

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	7700.2	962.525	243.49	0.000
Moisture	1	421.6	421.626	106.66	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	8	63.2	7.9000	2.00	0.065
Error	36	142.3	3.953		
Total	53	8327.3			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความหนาแน่นรวมเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.8 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของความหนาแน่นรวม

เมื่อนำผลการทดลองความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% และ 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.9 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้นคือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความหนาแน่นรวมเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	7583.9	3791.97	260.17	0.000
Ratio of Filter cake	1	7162.3	7162.31	491.41	0.000
Moisture	1	421.6	421.63	28.93	0.000
Error	51	743.3	14.57		
Total	53	8327.3			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.81771	91.07%	90.72%	89.99%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	648.43	2.91	222.74	0.000	
Ratio of Filter cake	0.4460	0.0201	22.17	0.000	1.00
Moisture	1.118	0.208	5.38	0.000	1.00

### Regression Equation

$$\text{Bulk density} = 648.43 + 0.4460 \text{ Ratio of Filter cake} + 1.118 \text{ Moisture}$$

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.9 พบว่าตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความหนาแน่นรวม อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดและความชื้น สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 91.07% โดยมีสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ความหนาแน่นรวมดังสมการที่ 4.5

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = 648.43 + 0.4460 F + 1.118 M \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

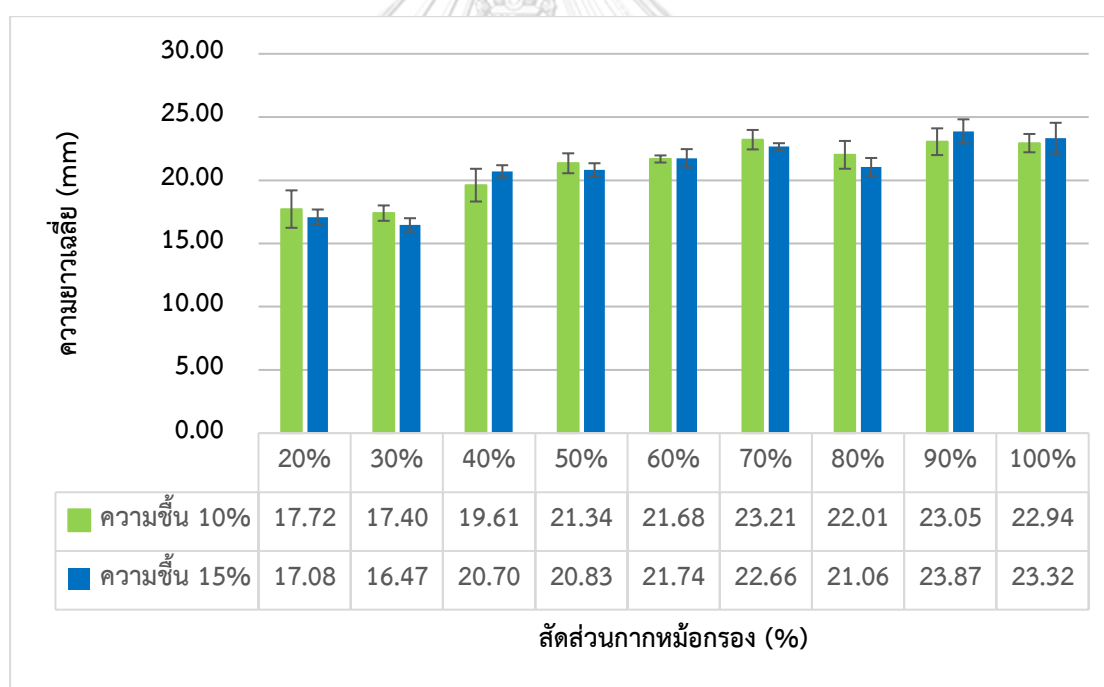
เมื่อ F คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

M คือ ความชื้น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากการวิเคราะห์ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ พบว่ามีความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ดตั้งแต่  $16.47 \pm 1.27$  mm ถึง  $23.87 \pm 2.49$  mm ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มอก. 2772-2560 ชั้นคุณภาพที่ 1 และ 2 ซึ่งกำหนดไว้ตั้งแต่ 3.15 mm ถึง 40 mm ตามรูปที่ 4.13

ความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงขึ้นกับความสามารถยึดเกาะของวัตถุดิบ เมื่อสัดส่วนของกากหม้อกรองเพิ่มขึ้น ความยาวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากกากหม้อกรองมีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน (Binder) จึงยึดเกาะได้ดีกว่ากากอ้อย ทำให้ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่าและเชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่หักใน Die โดยความชื้นไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความยาวเฉลี่ยกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

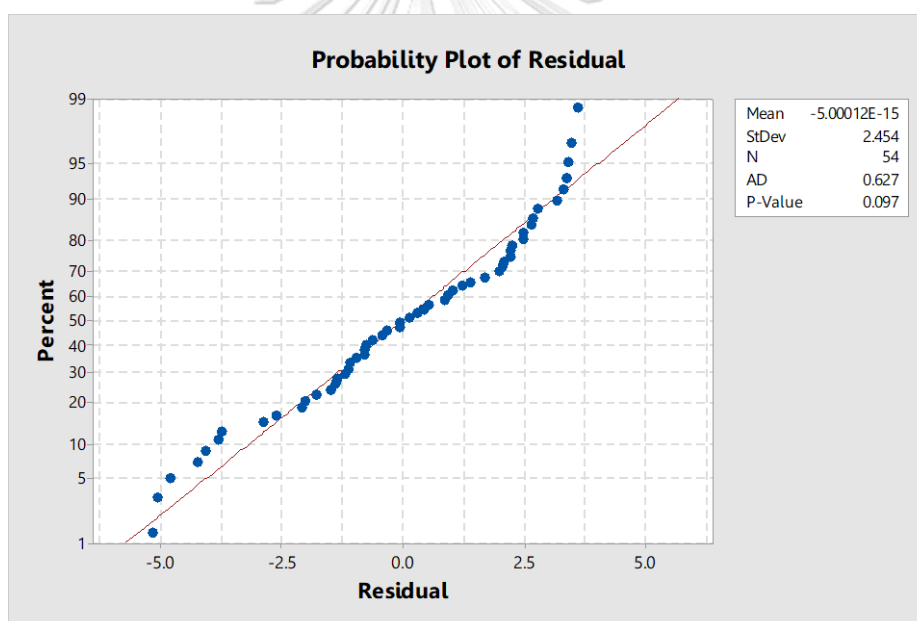
### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality Test) ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normality probability plot) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.097 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.14 Normal probability plot ของความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความยาวเฉลี่ย ดังตารางที่ 4.10 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้นส่วนตัวแปรตาม คือ ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้



1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

$H_1$  : มีค่า  $\mu_A$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

$H_1$  : มีค่า  $\mu_B$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความชื้นไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

$H_1$  : มีค่า  $(\mu_A \mu_B)_{ij}$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ย)

กำหนดให้  $i$  = ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง = 1,2,...,9

$j$  = ระดับของปัจจัยความชื้น = 1,2

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	271.651	33.9564	9.60	0.000
Moisture	1	0.254	0.2535	0.07	0.790
Ratio of Filter cake * Moisture	8	6.886	0.8607	0.24	0.979
Error	36	127.280	3.5355		
Total	53	406.070			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวเฉลี่ยเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.10 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความยาวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
2. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความยาวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของความยาวเฉลี่ย

เมื่อนำผลการทดลองความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% และ 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.11 กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด ส่วนตัวแปรตาม คือ ความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย (Significance of regression) และสัมประสิทธิ์ถดถอย (Regression Coefficient) ของความยาวเฉลี่ยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความยาวเฉลี่ยเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	221.75	221.747	62.56	0.000
Ratio of Filter cake	1	221.75	221.747	62.56	0.000
Error	51	184.32	3.545		
Total	53	406.07			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.88273	54.61%	53.74%	51.25%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	16.219	0.648	25.02	0.000	
Ratio of Filter cake	0.07848	0.00992	7.91	0.000	1.00

### Regression Equation

$$\text{Average length} = 16.219 + 0.07848 \text{ Ratio of Filter cake}$$

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในตารางที่ 4.11 พบว่าตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนกากหม้อกรอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความยาวเฉลี่ย อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 54.61% โดยมีสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ความยาวเฉลี่ยดังสมการที่ 4.6

$$\text{ความยาวเฉลี่ย} = 16.219 + 0.07848 F \quad \text{สมการที่ 4.6}$$

เมื่อ  $F$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

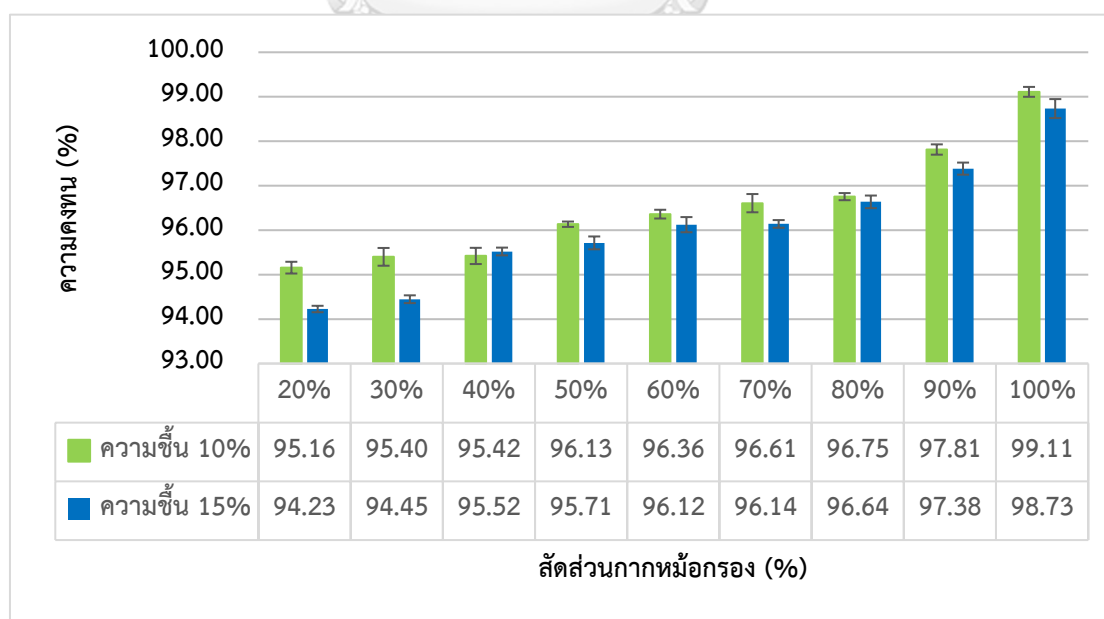
จากการวิเคราะห์ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าความคงทนมีค่าตั้งแต่  $94.23 \pm 0.08\%$  จนถึง  $99.11 \pm 0.11\%$  ตามรูปที่ 4.15 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มอก. 2772-2560 พบว่ามีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ถึง 100% ความชื้น 10% และ สัดส่วนกากหม้อกรอง 60% ถึง 100% ความชื้น 15% ผ่านตามเกณฑ์มอก. 2772-2560 ชั้นคุณภาพ ที่ 1 และ 2 กำหนดไว้ 96% ซึ่งความคงทนมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนกากหม้อกรองลดลง เนื่องจาก กากอ้อยมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ากากหม้อกรอง เมื่อผ่านการอัดขึ้นรูปจึงแตกหักง่ายและไม่คงทน เชื้อเพลิงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะยึดเกาะกันน้อยกว่าขนาดอนุภาคที่เล็ก และความชื้นที่ เพิ่มขึ้นก็เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ค่าความคงทนของเชื้อเพลิงลดลง

#### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็น ของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

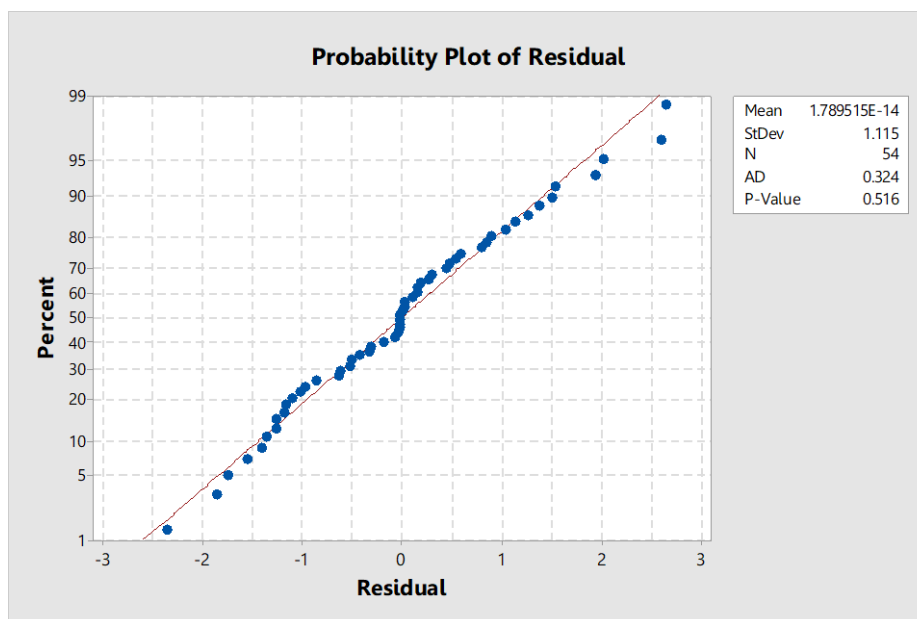
$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความคงทนกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

จากรูปที่ 4.16 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.516 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.16 Normal probability plot ของความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความคงทน ดังตารางที่ 4.12 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0 \text{ (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อความคงทน)}$$

$$H_1 : \text{มีค่า } \mu_A \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความคงทน)}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความขึ้น

$$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0 \text{ (ความขึ้นไม่มีผลต่อความคงทน)}$$

$$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความขึ้นไม่มีผลต่อความคงทน)}$$

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อความคงทน)

$H_1 : \text{มีค่า } (\mu_A \mu_B)_{ij} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความคงทน)}$

กำหนดให้  $i =$  ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง  $= 1, 2, \dots, 9$

$j =$  ระดับของปัจจัยความชื้น  $= 1, 2$

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	85.3819	10.672738	564.70	0.000
Moisture	1	2.4448	2.4448	129.24	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	8	0.24	0.0300	1.59	0.151
Error	36	0.681	0.0189		
Total	53	88.748			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนความคงทนเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.12 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อความคงทนอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อความคงทนอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อความคงทนอย่างมีนัยสำคัญ

### การวิเคราะห์สมการถดถอยของความคงทน

เมื่อนำผลการทดลองความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% และ 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.13 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย (Significance of regression) และสัมประสิทธิ์ถดถอย (Regression Coefficient) ของความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความคงทนเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	79.9792	39.9896	232.59	0.000
Ratio of Filter cake	1	77.5344	77.5344	450.96	0.000
Moisture	1	2.4448	2.4448	14.22	0.000
Error	51	8.7685	0.1719		
Total	53	88.7477			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.414647	90.12%	89.73%	88.71%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	94.595	0.316	299.17	0.000	
Ratio of Filter cake	0.04641	0.00219	21.24	0.000	1.00
Moisture	-0.0851	0.0226	-3.77	0.000	1.00

### Regression Equation

$$\text{Durability} = 94.595 + 0.04641 \text{ Ratio of Filter cake} - 0.0851 \text{ Moisture}$$

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในตารางที่ 4.13 พบว่าตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความคงทน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดและความชื้น สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 90.12% โดยมีสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ความคงทน ดังสมการที่ 4.7

$$\text{ความคงทน} = 94.595 + 0.04641 F - 0.0851 M \quad \text{สมการที่ 4.7}$$

เมื่อ F คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

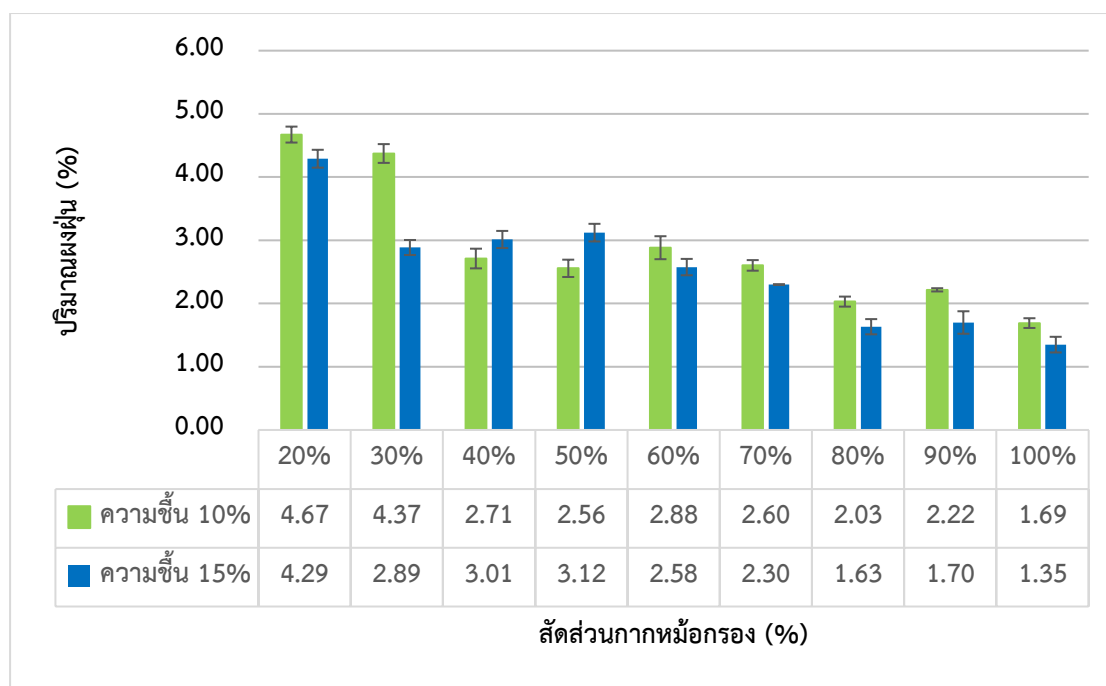
M คือ ความชื้น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากการวิเคราะห์ปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ สัดส่วนกากหม้อกรองตั้งแต่ 20% ถึง 100% ความชื้น 10% และ 15% มีค่าตั้งแต่ 1.35±0.12% ถึง 4.67±0.12% ตามรูปที่ 4.17 ผ่านตามเกณฑ์มอก. 2772-2560 ชั้นคุณภาพที่ 2 ทั้งหมด ซึ่งกำหนดไว้ร้อยละ 6 จากการวิเคราะห์ลักษณะของผงฝุ่นจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าผงฝุ่นที่รอด



ผ่านตะแกรงทดสอบรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.15 mm ส่วนใหญ่เป็นผงกากอ้อย หรือ Bagacillo ดังนั้น สัดส่วนกากอ้อยที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลโดยตรงกับปริมาณผงฝุ่นที่จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยความชื้นไม่มีผลต่อ ปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงฝุ่นกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

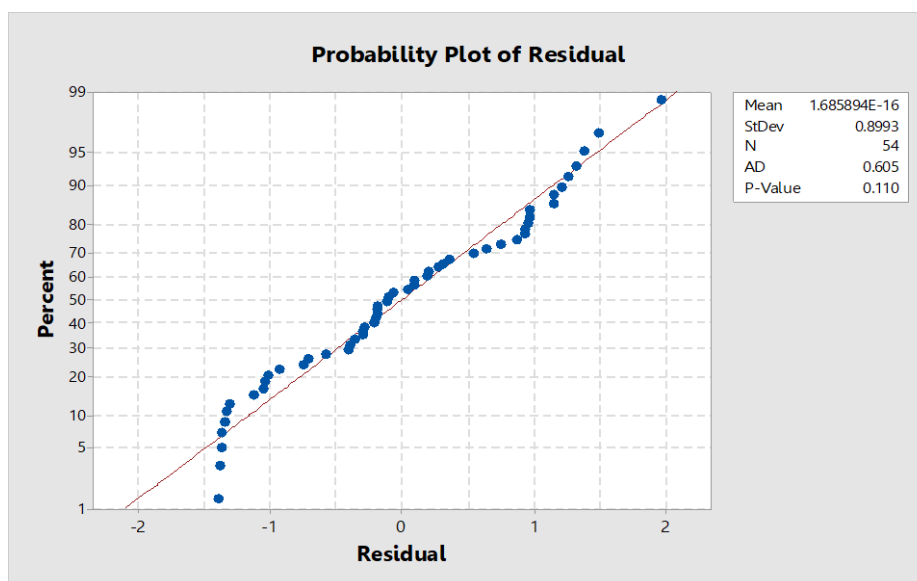
#### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.18 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนผลทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% มี P-value เท่ากับ 0.516 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าส่วนเหลือของข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.18 Normal probability plot ของปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผงฝุ่น ดังตารางที่ 4.14 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$$H_0 : \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0 \text{ (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)}$$

$$H_1 : \text{มีค่า } \mu_A \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความขึ้น

$$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0 \text{ (ความขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)}$$

$$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)}$$

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0 \text{ (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)}$$

$H_1$  : มีค่า  $(\mu_A \mu_B)_{ij}$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อปริมาณผงฝุ่น)

กำหนดให้  $i$  = ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง = 1,2,...,9

$j$  = ระดับของปัจจัยความชื้น = 1,2

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	44.8035	5.6004375	354.01	0.000
Moisture	1	1.3678	1.36783	86.48	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	8	0.14	0.0175	1.11	0.374
Error	36	0.5694	0.01582		
Total	53	46.881			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณผงฝุ่นเชื้อเพลิงอัดเม็ดในตารางที่ 4.14 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อปริมาณผงฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อปริมาณผงฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อปริมาณผงฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณผงฝุ่น

เมื่อนำผลการทดลองปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% และ 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.15 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ปริมาณผงฝุ่น

ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของปริมาณผงฝุ่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณผงฝุ่นเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	38.6600	19.3300	119.92	0.000
Ratio of Filter cake	1	37.2921	37.2921	231.35	0.000
Moisture	1	1.3678	1.3678	8.49	0.005
Error	51	8.2208	0.1612		
Total	53	46.8807			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.401487	82.46%	81.78%	80.25%

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5.427	0.306	17.73	0.000	
Ratio of Filter cake	-0.03219	0.00212	-15.21	0.000	1.00
Moisture	-0.0637	0.0219	-2.91	0.005	1.00

### Regression Equation

$$\text{Fines} = 5.427 - 0.03219 \text{ Ratio of Filter cake} - 0.0637 \text{ Moisture}$$

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.15 พบว่าตัวแปรต้น ได้แก่ สัดส่วนกากหม้อกรอง และความชื้น มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปริมาณผงฝุ่น อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดและความชื้น สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 82.46% โดยมีสมการถดถอยเพื่อพยากรณ์ปริมาณผงฝุ่น ดังสมการที่ 4.8

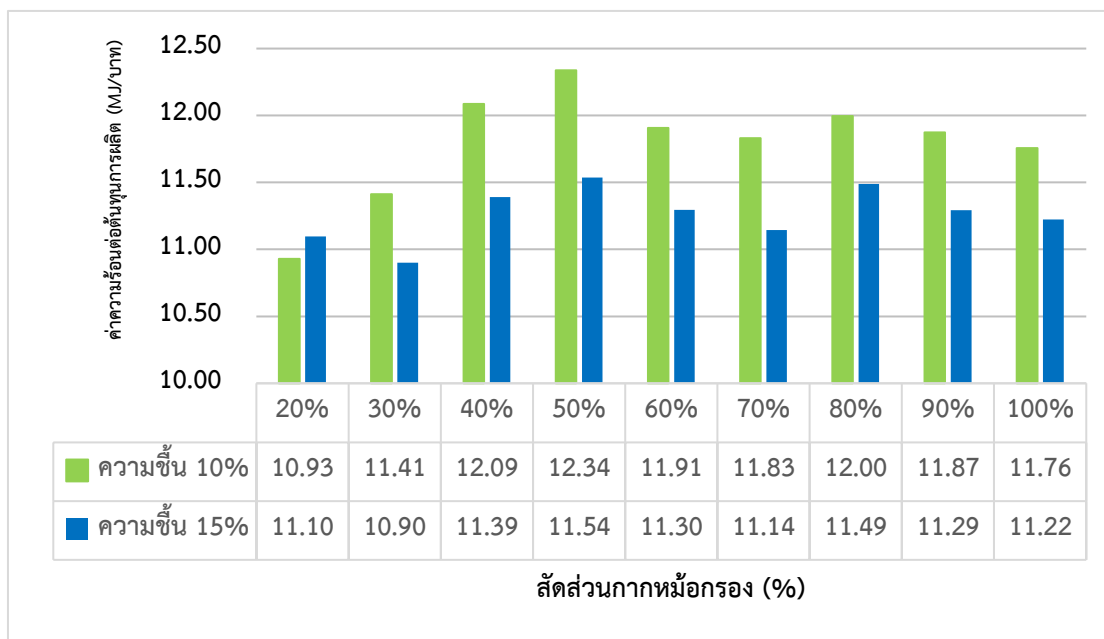
$$\text{ปริมาณผงฝุ่น} = 5.427 - 0.03219 F - 0.0637 M \quad \text{สมการที่ 4.8}$$

เมื่อ F คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

M คือ ความชื้น หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.4 ผลการศึกษาค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ตามรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 12.34 MJ/บาท ซึ่งต้นทุนการผลิตเป็นส่วนวัตถุดิบมากที่สุด 73.14% รองลงมาคือ ต้นทุนไฟฟ้าในการอัดขึ้นรูป 18.79% และ ต้นทุนค่าแรงงาน 8.04%

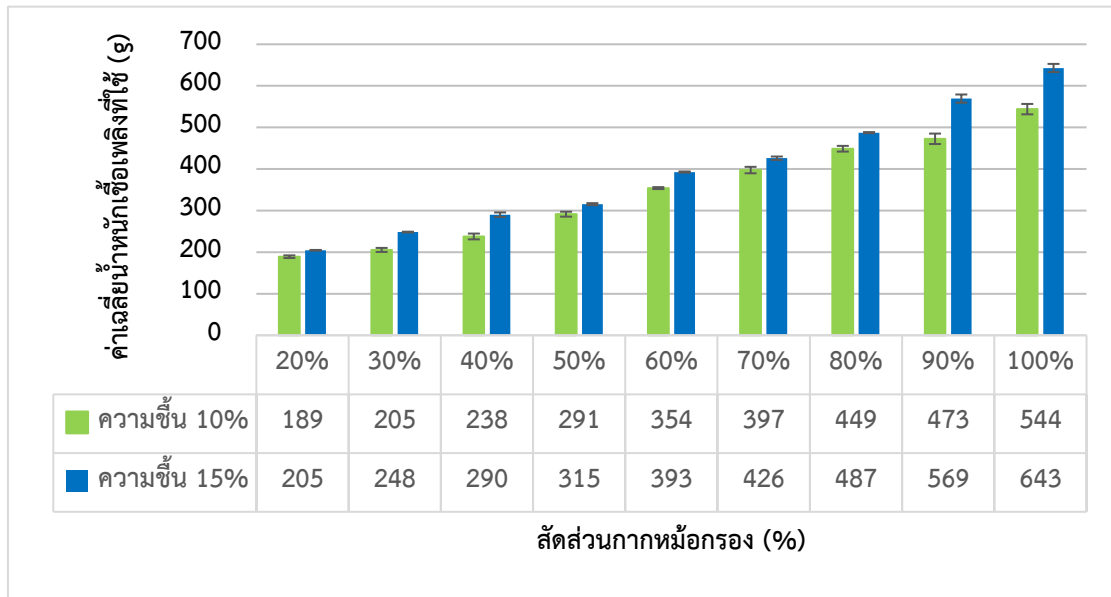


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

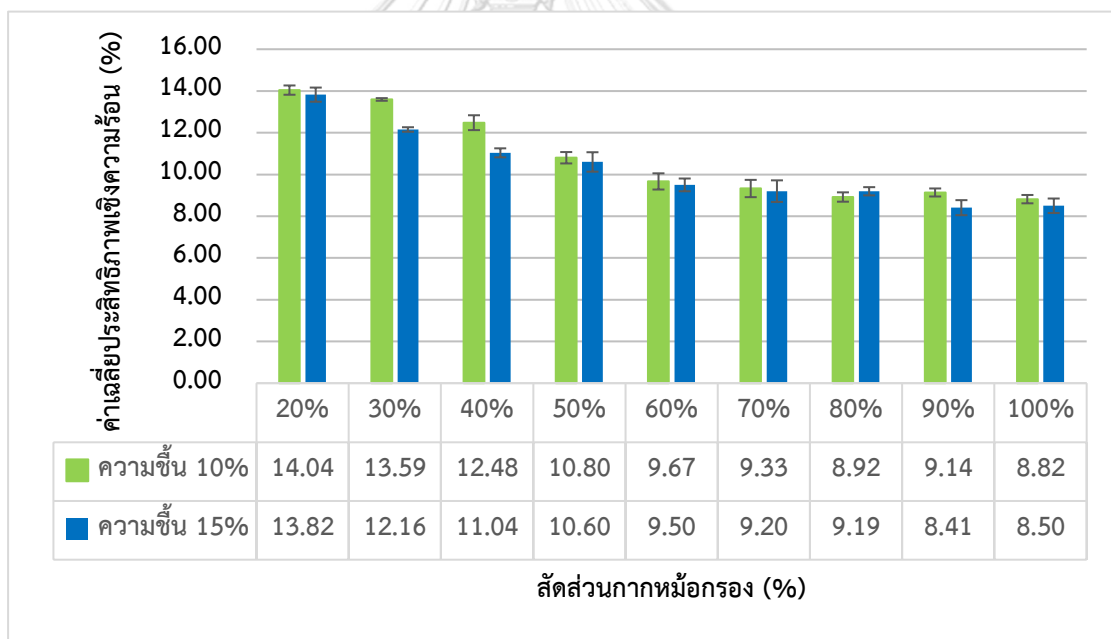
#### 4.5 ผลการศึกษาการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน

##### 4.5.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากการศึกษาการทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน พบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยต่ำสุด  $189 \pm 3.17$  กรัม ตามรูปที่ 4.20 และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสูงสุดเท่ากับ  $14.04 \pm 0.22\%$  ตามรูปที่ 4.21 โดยจะลดลงเมื่อสัดส่วนกากหม้อกรองเพิ่มขึ้น อีกทั้งมีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบพหุนาม (Polynomial) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบในเชื้อเพลิง จากกรณีนี้กากอ้อยมีปริมาณเถ้าที่ต่ำกว่ากากหม้อกรองจึงจุดติดไฟได้ง่ายและคุมอัตราการเผาไหม้ได้ดีกว่า อีกทั้งการสูญเสียความร้อนระหว่างการเผาไหม้น้อยกว่ากากหม้อกรอง (Miller, 2017) และกากอ้อยมีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ที่สูงกว่ากากหม้อกรองจึงจุดติดไฟได้ง่ายและคุมอัตราการเผาไหม้ได้ดีกว่า (Devia-Orjuela, et al., 2019)



รูปที่ 4.20 ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบต้มน้ำเดือด



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดสัดส่วนต่างๆ

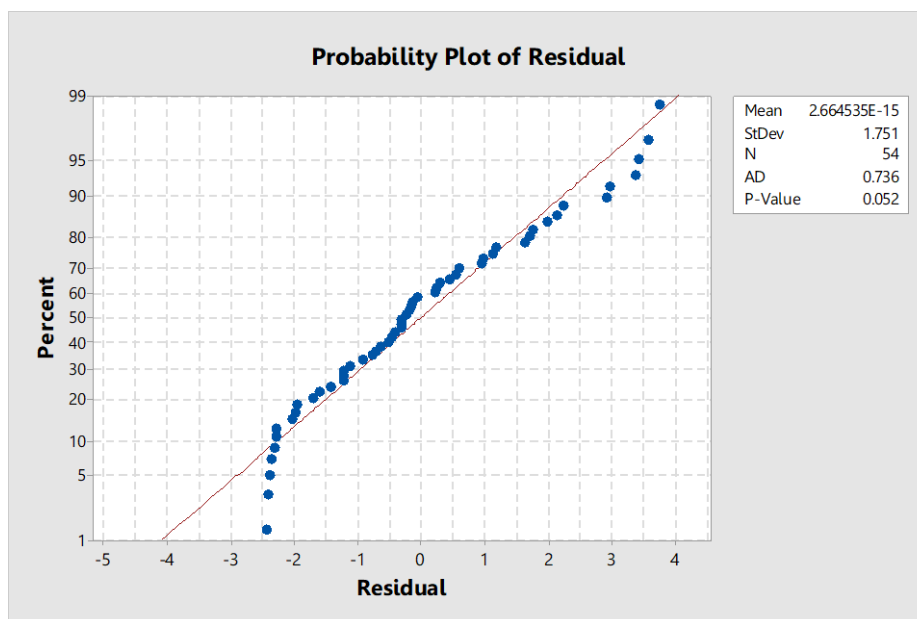
การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบการกระจายแบบปกติ ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.22 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.052 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.22 Normal probability plot ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน ดังตารางที่ 4.16 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้นส่วนตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0$  :  $\mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)



$H_1$  : มีค่า  $\mu_A$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0$  :  $\mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)

$H_1$  : มีค่า  $\mu_B$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (ความชื้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0$  :  $(\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)

$H_1$  : มีค่า  $(\mu_A \mu_B)_{ij}$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน)

กำหนดให้  $i$  = ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง = 1,2,...,9

$j$  = ระดับของปัจจัยความชื้น = 1,2

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	182.395	22.799375	235.29	0.000
Moisture	1	3.173	3.1735	32.76	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	8	1.13	0.1413	1.46	0.195
Error	36	3.488	0.0969		
Total	53	190.186			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนประสิทธิภาพเชิงความร้อนในตารางที่ 4.16 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ
3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

#### การวิเคราะห์สมการถดถอยของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

เมื่อนำผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.17 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ว่าเป็นการถดถอยแบบพหุนามเชิงเส้นหรือไม่ และหากำลังที่เหมาะสมของตัวแปร

- การทดสอบกำลังสาม กำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

- การทดสอบกำลังสอง กำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

จากนั้นจึงตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมพันธ์ถดถอยของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 10%)

#### Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	70.7337	169.40	0.000
Quadratic	1	7.0266	49.42	0.000
Cubic	1	0.4202	3.23	0.085

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	101.130	50.5648	257.63	0.000
Ratio of Filter cake	1	22.737	22.7368	115.85	0.000
Ratio of Filter cake <sup>2</sup>	1	9.259	9.2590	47.18	0.000
Error	24	4.710	0.1963		
Total	26	105.840			

#### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.443021	95.55%	95.18%	94.33%

#### Coefficients

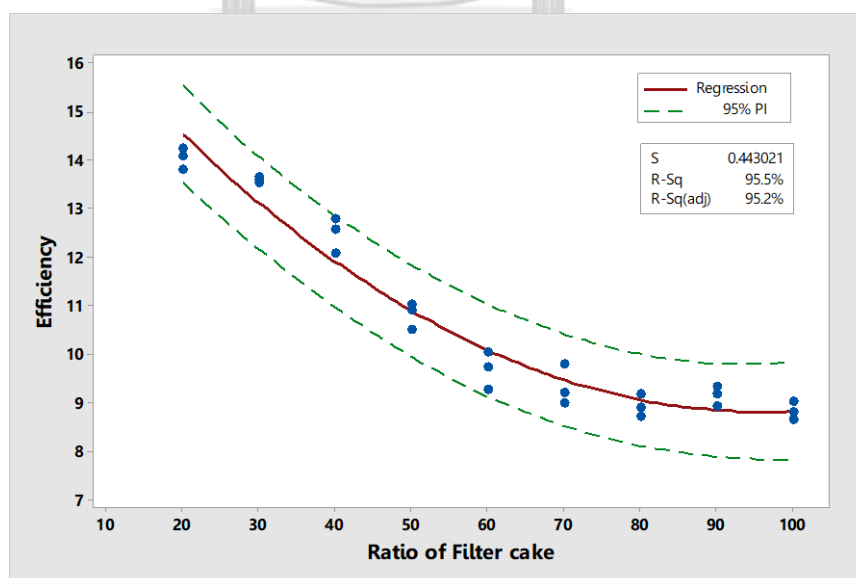
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	17.976	0.479	37.54	0.000	
Ratio of Filter cake	-0.1916	0.0178	-10.76	0.000	29.05
Ratio of Filter cake <sup>2</sup>	0.001001	0.000146	6.87	0.000	29.05

### Regression Equation

$$\text{Efficiency (ความชื้น 10\%)} = 17.976 - 0.1916 \text{ Ratio of Filter cake} + 0.001001 \text{ Ratio of Filter cake}^2$$

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.17 พบว่า P-value ของตัวแบบกำลังสอง (Quadratic model) มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานรอง ซึ่งสรุปได้ว่า โพลีโนเมียลกำลังสองมีความเหมาะสมกับข้อมูลนี้ ส่วน P-value ของตัวแบบกำลังสาม (Cubic model) มีค่าเท่ากับ 0.085 เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก และปฏิเสธสมมติฐานรอง ซึ่งสรุปได้ว่า โพลีโนเมียลกำลังสามไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลนี้

จากนั้นจึงตรวจสอบสมการถดถอย พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง ความชื้น 10% มีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมพันธ์การถดถอย ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ที่กำลังหนึ่งและสอง สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 95.55% แสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10%

การวิเคราะห์สมการถดถอยของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำผลการทดลองประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.18 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ส่วนตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อทดสอบสมมติฐานความสัมพันธ์ว่าเป็นการถดถอยแบบพหุนามเชิงเส้นหรือไม่ และหากำลังที่เหมาะสมของตัวแปร

- การทดสอบกำลังสาม กำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_3 = 0$$

$$H_1 : \beta_3 \neq 0$$

- การทดสอบกำลังสอง กำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_2 \neq 0$$

จากนั้นจึงตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอย ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 15%)

### Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	91.8705	164.41	0.000
Quadratic	1	9.2590	47.18	0.000

Source	DF	SS	F	P
Cubic	1	0.6142	3.75	0.064

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	77.760	38.8802	273.46	0.000
Ratio of Filter cake	1	17.348	17.3482	122.02	0.000
Ratio of Filter cake <sup>2</sup>	1	7.027	7.0266	49.42	0.000
Error	24	3.412	0.1422		
Total	26	81.173			

#### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.377066	95.80%	95.45%	94.68%

#### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	16.588	0.408	40.70	0.000	
Ratio of Filter cake	-0.1673	0.0151	-11.05	0.000	29.05
Ratio of Filter cake <sup>2</sup>	0.000872	0.000124	7.03	0.000	29.05

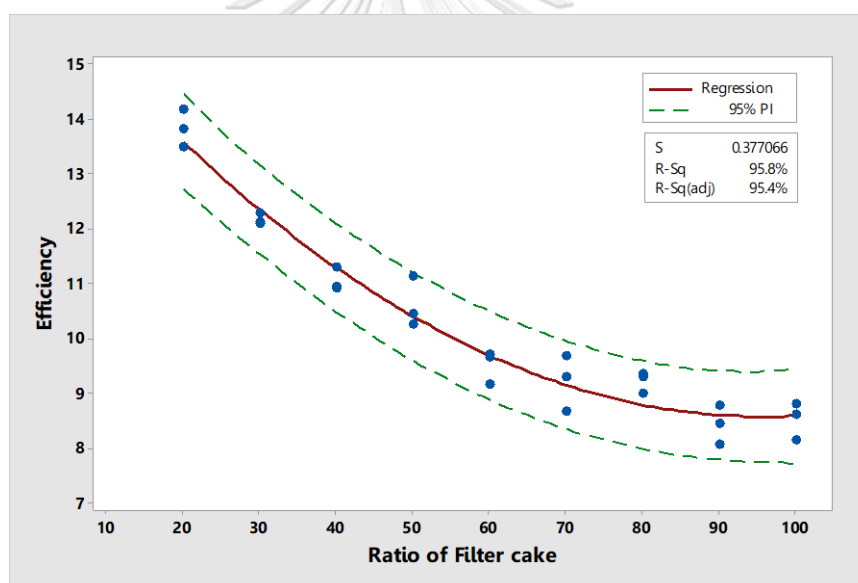
#### Regression Equation

$$\text{Efficiency (ความชื้น 15\%)} = 16.588 - 0.1673 \text{ Ratio of Filter cake} + 0.000872 \text{ Ratio of Filter cake}^2$$

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในตารางที่ 4.18 พบว่า P-value ของตัวแบบกำลังสอง (Quadratic model) มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานรอง ซึ่งสรุปได้ว่า โพลีโนเมียลกำลังสองมีความเหมาะสม

กับข้อมูลนี้ ส่วน P-value ของตัวแบบกำลังสาม (Cubic model) มีค่าเท่ากับ 0.064 เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก และปฏิเสธสมมติฐานรอง ซึ่งสรุปได้ว่า โพลีโนเมียลกำลังสามไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลนี้

จากนั้นจึงตรวจสอบสมการถดถอย พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรองความชื้น 15% มีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมพันธ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ที่กำลังหนึ่งและสอง สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 95.80% แสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15%

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสัดส่วนกากหม้อกรอง มาแทนในสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนที่สัดส่วนกากหม้อกรองอื่นๆ ซึ่งมีความชื้น 10% และ 15% จะได้สมการที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 10\%)} = 17.976 - 0.1916 F_1 + 0.001001 F_1^2 \quad \text{สมการที่ 4.9}$$

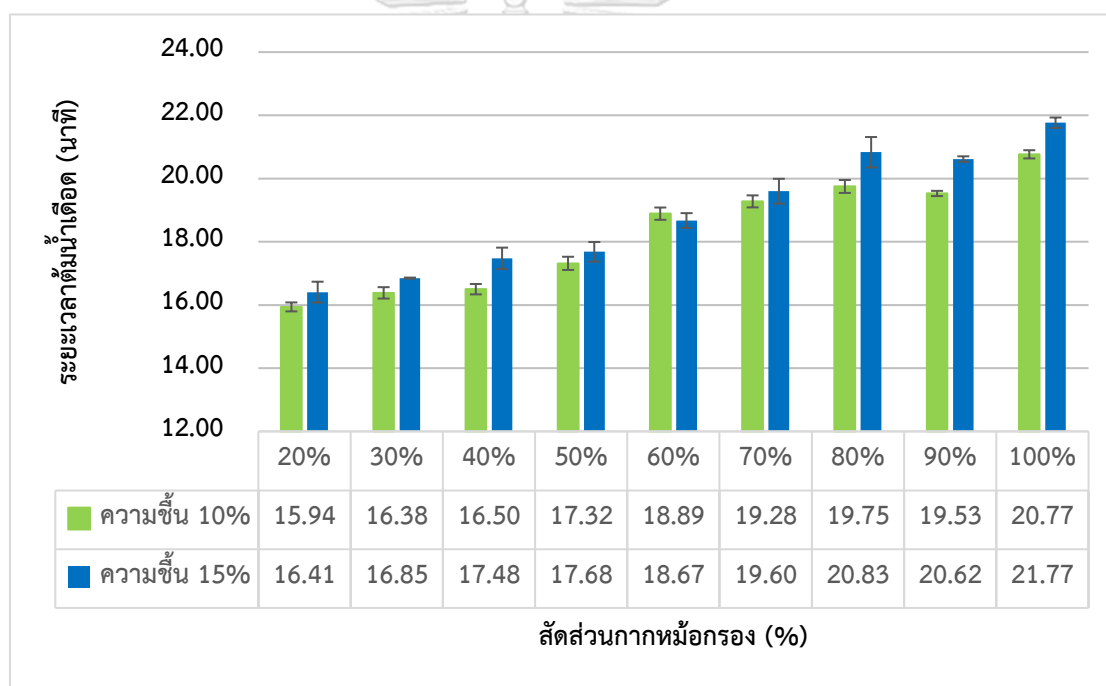
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (ความชื้น 15\%)} = 16.588 - 0.1673 F_2 + 0.000872 F_2^2 \quad \text{สมการที่ 4.10}$$

เมื่อ  $F_1$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

$F_2$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.5.2 ผลการทดลองระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด

ผลการทดลองระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $15.94 \pm 0.14$  นาที ตามรูปที่ 4.25 เนื่องจากกากอ้อยมีปริมาณ Volatile matter 39.01% ซึ่งมากกว่ากากหม้อกรองที่มีปริมาณ Volatile matter 26.74% จึงส่งผลให้มีการจุดติดไฟที่ง่าย และความเสถียรของเปลวไฟที่ดี



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระยะเวลาต้มน้ำเดือดกับสัดส่วนกากหม้อกรอง

#### การทดสอบการกระจายแบบปกติของผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

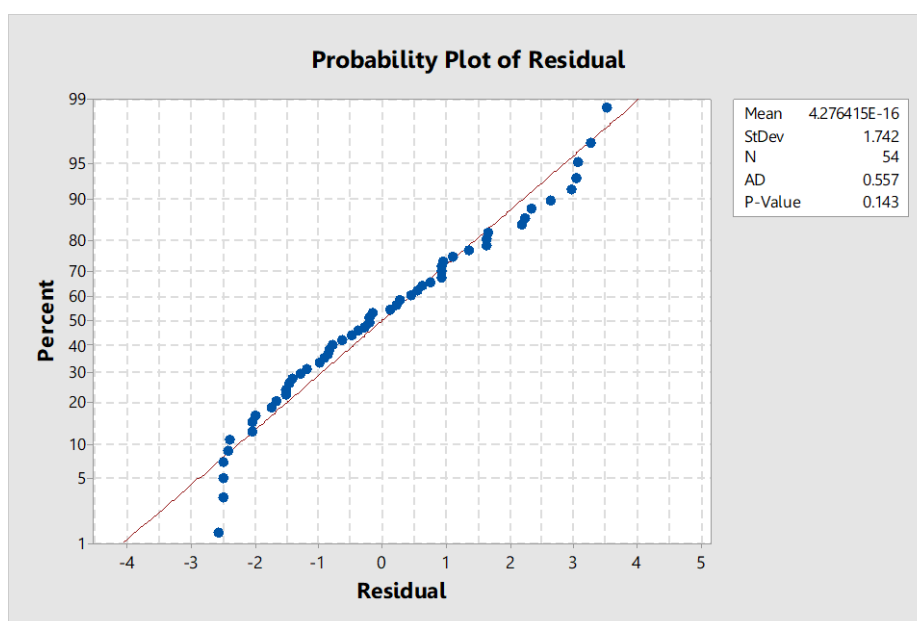
การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality Test) ด้วยการวิเคราะห์ส่วนเหลือด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normality probability plot) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จะมีการตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบดังนี้

$H_0$  : ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ



$H_1$  : ข้อมูลมีการกระจายไม่ปกติ

จากรูปที่ 4.26 พบว่าส่วนเหลือมีแนวโน้มเรียงตัวกันในเชิงเส้นตรง 45 องศา ส่วนการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของ Anderson – Darling กับระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด มี P-value เท่ากับ 0.143 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าส่วนเหลือของข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.26 Normal probability plot ของระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระยะเวลาต้มน้ำเดือด โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และความขึ้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของตัวแปรต้นและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นกับระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของสัดส่วนกากหม้อกรอง

$H_0$  :  $\mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \dots = \mu_{Ai} = 0$  (สัดส่วนกากหม้อกรองไม่มีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

$H_1$  : มีค่า  $\mu_A$  อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน (สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความชื้น

$H_0 : \mu_{B1} = \mu_{B2} = \dots = \mu_{Bj} = 0$  (ความชื้นไม่มีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

$H_1 : \text{มีค่า } \mu_B \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน}$  (ความชื้นไม่มีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

3. การตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลัก (Interaction)

$H_0 : (\mu_A \mu_B)_{11} = (\mu_A \mu_B)_{12} = \dots = (\mu_A \mu_B)_{ij} = 0$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักมีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

$H_1 : \text{มีค่า } (\mu_A \mu_B)_{ij} \text{ อย่างน้อย 1 คู่ที่ไม่เท่ากัน}$  (อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือด)

กำหนดให้  $i = \text{ระดับของปัจจัยสัดส่วนกากหม้อกรอง} = 1, 2, \dots, 9$

$j = \text{ระดับของปัจจัยความชื้น} = 1, 2$

ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ratio of Filter cake	8	161.05	20.13125	343.54	0.000
Moisture	1	5.144	5.144	87.78	0.000
Ratio of Filter cake * Moisture	8	0.37	0.0463	0.79	0.614
Error	36	2.11	0.0586		
Total	53	168.674			

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระยะเวลาต้มน้ำเดือดในตารางที่ 4.19 จะได้ว่า

1. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า สัดส่วนกากหม้อกรองมีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือดอย่างมีนัยสำคัญ
2. ปฏิเสธ  $H_0$  สรุปได้ว่า ความชื้นมีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือดอย่างมีนัยสำคัญ

3. ยอมรับ  $H_0$  สรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักไม่มีผลต่อระยะเวลาต้มน้ำเดือดอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

เมื่อนำผลการทดลองระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.20 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% ส่วนตัวแปรตาม คือ ระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอย ของระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	69.2127	69.2127	373.75	0.000
Ratio of Filter cake	1	69.2127	69.2127	373.75	0.000
Error	25	4.6296	0.1852		
Total	26	73.8422			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.430328	93.73%	93.48%	92.91%

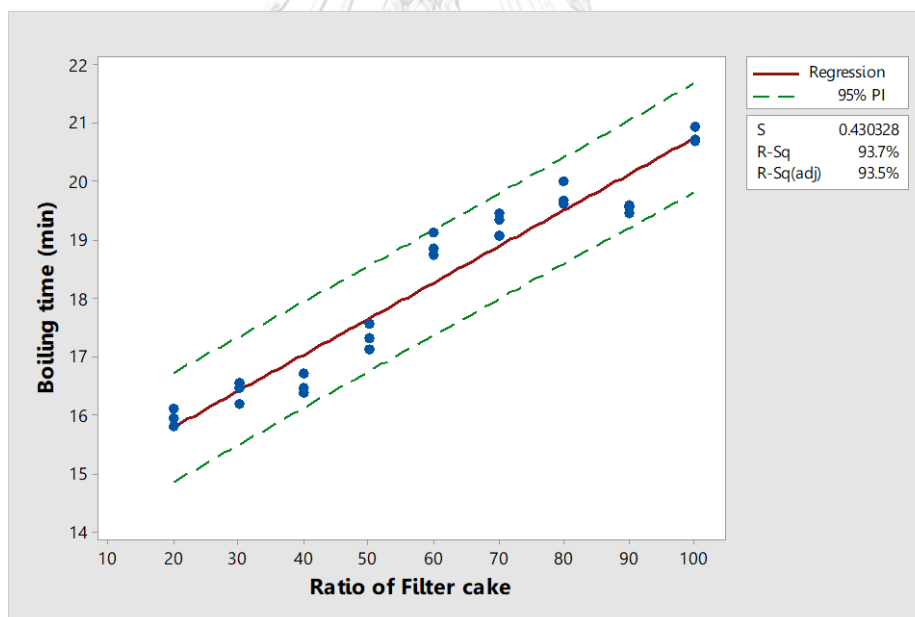
### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	14.541	0.210	69.40	0.000	
Ratio of Filter cake	0.06201	0.00321	19.33	0.000	1.00

### Regression Equation

Boiling time (ความชื้น 10%) = 14.541 + 0.06201 Ratio of Filter cake

จากการวิเคราะห์การถดถอยในตารางที่ 4.20 พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับระยะเวลาต้มน้ำเดือด (ความชื้น 10%) อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10% สามารถใช้คำนวณหาสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและ



ยอมรับสมมติฐานรอง โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 93.73% แสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.27

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำผลการทดลองระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% มาวิเคราะห์ความแปรปรวนจะได้ผลดังตารางที่ 4.21 โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 กำหนดตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ส่วนตัวแปรตาม คือ ระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งการตั้งสมมติฐานเพื่อศึกษานัยสำคัญของความสัมพันธ์หรือความถดถอย และสัมประสิทธิ์ถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะเป็นดังนี้

1. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอย

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad H_1 : \beta_k \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว}$$

2. การตั้งสมมติฐานเพื่อทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ถดถอย

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_1 : \beta_j \neq 0$$

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์สมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

**Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	85.583	85.5830	521.19	0.000
Ratio of Filter cake	1	85.583	85.5830	521.19	0.000
Error	25	4.105	0.1642		
Total	26	89.688			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.405225	95.42%	95.24%	94.76%

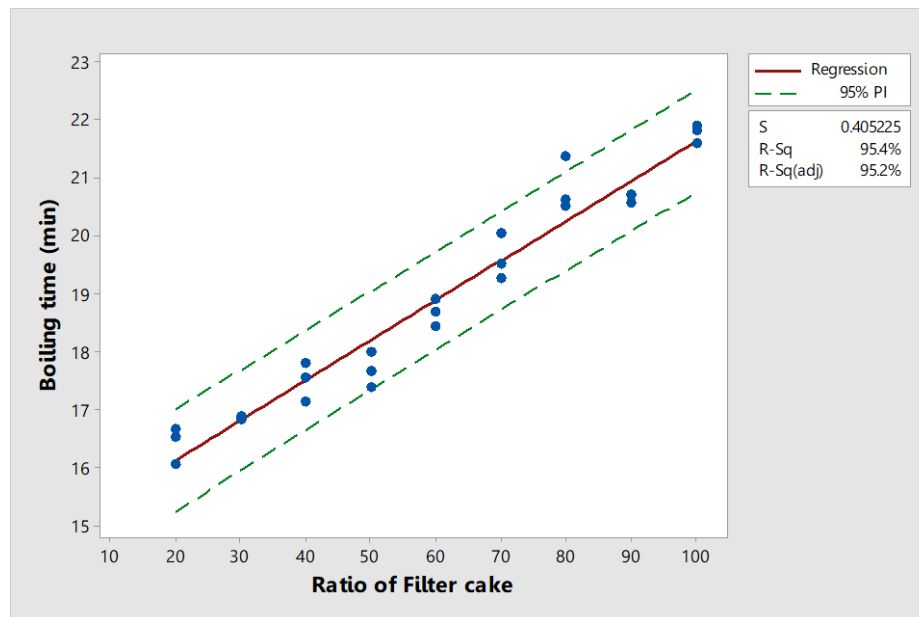
### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	14.741	0.197	74.72	0.000	
Ratio of Filter cake	0.06895	0.00302	22.83	0.000	1.00

### Regression Equation

Boiling time (ความชื้น 15%) = 14.741 + 0.06895 Ratio of Filter cake

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในตารางที่ 4.21 พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับระยะเวลาต้มน้ำเดือด (ความชื้น 15%) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) ของตัวแปรต้น คือ สัดส่วนกากหม้อกรองในเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15% ใช้ในสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรอง และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 95.42% แสดงความสัมพันธ์จากสมการถดถอยได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์จากสมการถดถอยของระยะเวลาต้มน้ำเดือดเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของสัดส่วนกากหม้อกรอง มาแทนในสมการถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ระยะเวลาต้มน้ำเดือดที่สัดส่วนกากหม้อกรองอื่นๆ ซึ่งมีความชื้น 10% และ 15% จะได้สมการที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

$$\text{ระยะเวลาต้มน้ำเดือด (ความชื้น 10\%)} = 14.541 + 0.06201 F_1 \quad \text{สมการที่ 4.11}$$

$$\text{ระยะเวลาต้มน้ำเดือด (ความชื้น 15\%)} = 14.741 + 0.06895 F_2 \quad \text{สมการที่ 4.12}$$

เมื่อ ระยะเวลาต้มน้ำเดือด หน่วยเป็น นาที

$F_1$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

$F_2$  คือ สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15% หน่วยเป็น % หรือ ร้อยละโดยน้ำหนัก

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล ได้แก่ กากหม้อกรอง และกากอ้อยมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งช่วยแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากปริมาณกากหม้อกรองที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและขนส่ง อีกทั้งปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นระหว่างการจัดเก็บรอส่งกำจัด ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการลดความชื้นวัตถุดิบ จากนั้นจึงทำการผสมและอัดขึ้นรูปที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าสัดส่วนกากหม้อกรอง 0% และ 10% ไม่สามารถอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบหัวอัตรวงแหวนได้ จึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ถึง 100% เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความร้อน ปริมาณเถ้า และคุณลักษณะทางกายภาพต่างๆ

จากนั้นจึงทดสอบใช้งานกับเตาในครัวเรือน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิง และระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด เมื่อทราบถึงความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการใช้งานกับเตาในครัวเรือนและต้นทุนการผลิต จึงวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยประเมินจากต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำจนเดือด และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากส่วนผสมกากหม้อกรองและกากอ้อย

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะค่าความร้อนและปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อยเปรียบเทียบกับเกณฑ์ มอก. 2772-2560 จะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดสัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าความร้อนสูงสุด 13.15 MJ/kg ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 ที่กำหนดให้ค่าความร้อนต้องมากกว่า 14.5 MJ/kg และปริมาณเถ้าต่ำสุด 14.67% ซึ่งผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 ชั้นคุณภาพที่ 2 ที่กำหนดให้ปริมาณเถ้าต้องน้อยกว่า 18% จึงสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับค่าความร้อนและปริมาณเถ้าได้ดังนี้ เมื่อสัดส่วนกากหม้อกรองลดลง จะทำให้ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นและปริมาณเถ้าลดลง และเมื่อความชื้นลดลง จะทำให้ค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นและปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 5.1



ตารางที่ 5.1 สรุปคุณลักษณะค่าความร้อนและปริมาณเถ้า

คุณลักษณะ	ชั้นคุณภาพ		สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10%								
	1	2	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ค่าความร้อน (MJ/kg)	≥ 14.5		13.15	12.34	11.53	10.73	9.92	9.11	8.31	7.50	6.69
ปริมาณเถ้า (%)	≤ 10	≤ 18	14.67	19.30	23.93	28.55	33.18	37.80	42.43	47.06	51.68
คุณลักษณะ	ชั้นคุณภาพ		สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15%								
	1	2	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ค่าความร้อน (MJ/kg)	≥ 14.5		12.26	11.52	10.78	10.05	9.31	8.57	7.84	7.10	6.37
ปริมาณเถ้า (%)	≤ 10	≤ 18	14.72	19.07	23.41	27.76	32.10	36.44	40.79	45.13	49.48

จากนั้นงานวิจัยจึงศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ส่งผลต่อประโยชน์ด้านการขนส่ง และการจัดเก็บเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความยาวเฉลี่ย ความคงทน และปริมาณผงฝุ่น แสดงผลดังตารางที่ 5.2

เมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพกับเกณฑ์ มอก. 2772-2560 จะพบว่าความหนาแน่นรวมของทุกสัดส่วน มีค่ามากกว่า  $600 \text{ kg/m}^3$  ความยาวเฉลี่ยของทุกสัดส่วน มีค่าอยู่ระหว่าง 3.15 ถึง 40 mm และปริมาณผงฝุ่นของทุกสัดส่วน มีค่าน้อยกว่า 6% จึงผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ชั้นคุณภาพที่ 2 ในทุกสัดส่วน แต่ยังพบว่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 30% และ 40% ที่ความชื้น 10% และสัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 30%, 40% และ 50% ที่ความชื้น 15% มีค่าความคงทนต่ำกว่า 96% จึงไม่ผ่านเกณฑ์ มอก. 2772-2560 เนื่องจากกากหม้อกรองเป็นตัวประสานลดลง จึงส่งผลต่อการยึดเกาะของวัตถุดิบทั้งสองชนิดลดลงเช่นกัน



### 5.1.2 การพยากรณ์วัตถุดิบที่เหมาะสมตามเป้าหมายเกณฑ์ มอก. 2772-2560

จากการศึกษาคุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากส่วนผสมกากหม้อกรองและกากอ้อยในแต่ละสัดส่วน พบว่าตัวแปรสัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้นมีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดอย่างมีนัยยะสำคัญ จึงสามารถนำผลวิเคราะห์มาสร้างสมการถดถอยพยากรณ์สัดส่วนกากหม้อกรองและความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้คุณลักษณะอยู่ตามเป้าหมายตามเกณฑ์ มอก. 2772-2560 โดยมีรายละเอียดมาตรฐานและวัตถุดิบที่เหมาะสม ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การพยากรณ์เป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากสมการถดถอย

คุณลักษณะ	เกณฑ์ มอก.		สมการถดถอยที่ใช้พยากรณ์เป้าหมายวัตถุดิบ	วัตถุดิบที่เหมาะสม			
	ชั้นคุณภาพ			ชั้นคุณภาพ 1		ชั้นคุณภาพ 2	
	1	2	กากหม้อกรอง (%)	ความชื้น (%)	กากหม้อกรอง (%)	ความชื้น (%)	
ค่าความร้อน (%)	≥ 14.5		สมการที่ 4.1	≤ 3.25	≤ 10	≤ 3.25	≤ 10
ปริมาณเถ้า (%)	≤ 10	≤ 18	สมการที่ 4.4	≤ 9.13	≤ 15	≤ 27.55	≤ 15
ความหนาแน่นรวม (kg/m <sup>3</sup> )	≥ 600		สมการที่ 4.5	ผ่านทุกสัดส่วนของกากหม้อกรองและความชื้นต่ำกว่า 15%			
ความยาวเฉลี่ย (mm)	3.15 - 40		สมการที่ 4.6	ผ่านทุกสัดส่วนของกากหม้อกรองและความชื้นต่ำกว่า 15%			
ความคงทน (%)	≥ 96		สมการที่ 4.7	≥ 57.78	≤ 15	≥ 57.78	≤ 15
ปริมาณผงฝุ่น (%)	≤ 3	≤ 6	สมการที่ 4.8	≤ 45.71	≤ 15	≤ 47.48	≤ 15

### 5.1.3 การทดสอบต้มน้ำเดือด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อน และระยะเวลาต้มน้ำเดือด ในตารางที่ 5.4 จะพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ที่ความชื้น 10% มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 14.04% และระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดต่ำสุด 15.94 นาที โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปร

ตามสัดส่วนกากอ้อยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกากอ้อยมีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ที่สูงกว่า กากหม้อกรอง เป็นผลให้จุดติดไฟได้ง่ายและคุมการเผาไหม้ได้ดีกว่า

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและระยะเวลาต้มน้ำเดือด

รายละเอียด	สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10%								
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)	14.04	13.59	12.48	10.80	9.67	9.33	8.92	9.14	8.82
ระยะเวลาต้มน้ำเดือด (นาท)	15.94	16.38	16.50	17.32	18.89	19.28	19.75	19.53	20.77
รายละเอียด	สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15%								
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)	13.82	12.16	11.04	10.60	9.50	9.20	9.19	8.41	8.50
ระยะเวลาต้มน้ำเดือด (นาท)	16.41	16.85	17.48	17.68	18.67	19.60	20.83	20.62	21.77

#### 5.1.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ ดังตารางที่ 5.5 ต้นทุนการผลิตของเชื้อเพลิงที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 40% มีค่าต่ำสุด 0.93 บาท/kg ในขณะที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีความร้อนสูงสุด 13.15 MJ/kg จึงใช้เชื้อเพลิงในการต้มน้ำน้อยที่สุด 0.21 kg ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ 1,000 ml จนกระทั่งเดือด ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20%, 30% และ 40% ที่ความชื้น 10% และสัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 0.22 ถึง 0.23 บาท แต่หากพิจารณาเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย จะพบว่าสัดส่วน 20% ความชื้น 10% จะมีความเหมาะสมที่สุด เพราะมีปริมาณเถ้าที่น้อยที่สุด 14.67% จึงมีค่าใช้จ่ายในการจัดการเถ้าหลังการเผาไหม้น้อยที่สุดเช่นกัน

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงพิจารณาได้จากการลดค่าใช้จ่ายในกำจัดการหม้อกรอง (ซึ่งอ้างอิงจากค่าใช้จ่ายในอดีตของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา) คิดเป็น 1,300 บาท/ตัน แต่หากเป็นการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองที่สัดส่วน 20% ความชื้น 10% จะมีต้นทุนการผลิต 1,200

บาท/ตัน และจะสามารถจำหน่ายได้ที่ราคา 2,000 บาท/ตัน (คิดจากราคาของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกถั่วลิสง ซึ่งให้ค่าพลังงานความร้อนที่ใกล้เคียงกัน (Indiamart, 2021) ดังนั้นจะมีกำไร 800 บาท/ตัน และผลประโยชน์รวมเป็น 2,100 บาท/ตัน จึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นอย่างยิ่ง

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์จากการทดสอบต้มน้ำเดือด

รายละเอียด	สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 10%								
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ต้นทุนการผลิต (บาท/kg)	1.20	1.08	0.93	0.89	0.83	0.77	0.69	0.63	0.57
ค่าความร้อน (MJ/kg)	13.15	12.34	11.53	10.73	9.92	9.11	8.31	7.50	6.69
ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)	10.93	11.41	12.34	12.09	11.91	11.83	12.00	11.87	11.76
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ (kg)	0.19	0.21	0.24	0.29	0.35	0.40	0.45	0.47	0.54
ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ (บาท)	0.23	0.22	0.22	0.26	0.29	0.31	0.31	0.30	0.31
ปริมาณเถ้า (%)	14.67	19.30	23.93	28.55	33.18	37.80	42.43	47.06	51.68
รายละเอียด	สัดส่วนกากหม้อกรอง ที่ความชื้น 15%								
	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
ต้นทุนการผลิต (บาท/kg)	1.10	1.06	0.93	0.88	0.82	0.77	0.68	0.63	0.57
ค่าความร้อน (MJ/kg)	12.26	11.52	10.78	10.05	9.31	8.57	7.84	7.10	6.37
ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)	11.10	10.90	11.54	11.39	11.30	11.14	11.49	11.29	11.22
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ (kg)	0.21	0.25	0.29	0.32	0.39	0.43	0.49	0.57	0.64
ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงที่ใช้ต้มน้ำ (บาท)	0.23	0.26	0.27	0.28	0.32	0.33	0.33	0.36	0.36
ปริมาณเถ้า (%)	14.72	19.07	23.41	27.76	32.10	36.44	40.79	45.13	49.48

### 5.1.5 การเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ จะพบว่าที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงถ่านซังข้าวโพดประมาณเท่าตัว มีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทางมะพร้าว แต่น้อยกว่าเชื้อเพลิงอีกสองประเภทที่เหลือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองและกากอ้อย จึงเป็นอีกทางเลือกของการทดแทนเชื้อเพลิงชีวมวลเดิมได้ แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียด	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
เชื้อเพลิงอัดเม็ดกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10%	14.04
เชื้อเพลิงถ่านกะลาเผา (กันยาพร ไซวงค์ และคณะ, 2559)	19.41
เชื้อเพลิงถ่านเมล็ดมะไฟจีน (กันยาพร ไซวงค์ และคณะ, 2559)	16.23
เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทางมะพร้าว (ธนาพล ต้นดีสัตยกุล และคณะ, 2558)	13.40
เชื้อเพลิงถ่านซังข้าวโพด (กันยาพร ไซวงค์ และคณะ, 2559)	7.88

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้สามารถเป็นแนวทางลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียประเภทชีวมวลจากอุตสาหกรรมเกษตรอื่นๆ

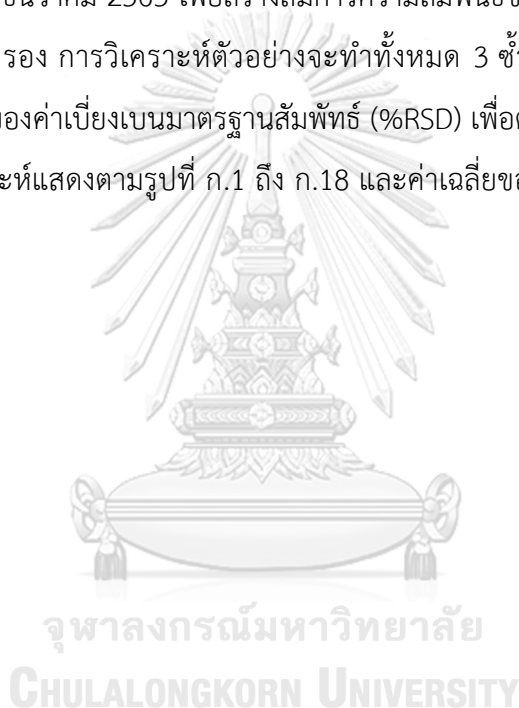
2. การศึกษานี้สามารถนำไปทดสอบการใช้งานกับเครื่องจักรผลิตไอน้ำในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ซึ่งจะเป็นประโยชน์ด้านการลดต้นทุนการผลิตไอน้ำ และการผลิตไฟฟ้าสำหรับการจำหน่ายในอนาคต อีกทั้งยังเป็นการศึกษาพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดของหม้อไอน้ำจากชีวมวล



## ภาคผนวก ก

### ผลวิเคราะห์ค่าความร้อนและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในส่วนของค่าความร้อน (Heating value) และองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) จัดทำที่ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ซึ่งทำการส่งตัวอย่างวิเคราะห์ ณ วันที่ 21 ธันวาคม 2563 เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ของค่าความร้อนและปริมาณเถ้ากับสัดส่วนกากหม้อกรอง การวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยของผลวิเคราะห์และร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เพื่อตรวจสอบความผันแปรจากการทดลอง ผลการวิเคราะห์แสดงตามรูปที่ ก.1 ถึง ก.18 และค่าเฉลี่ยของผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ ก.1 ถึง ก.2 ดังนี้





ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สภาวะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	13.09	0.14
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.69	2.39
ปริมาณสารระเหย		wt. %	63.99	0.36
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.92	1.44
คาร์บอนคงตัว		wt. %	11.40	2.05

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)

นักวิทยาศาสตร์

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )

ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.1 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สภาวะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	13.11	1.04
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.73	0.83
ปริมาณสารระเหย		wt. %	64.32	0.09
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.83	0.14
คาร์บอนคงตัว		wt. %	11.12	2.76

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.รชพงษ์ วิทิตสานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.2 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 3

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สภาวะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	13.10	0.41
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.78	2.38
ปริมาณสารระเหย		wt. %	64.32	0.95
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.81	0.10
คาร์บอนคงตัว		wt. %	11.09	0.64

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์

(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)

นักวิทยาศาสตร์

วันที่ 21 ธันวาคม 2563



( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์ )

ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น

2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.3 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	12.25	1.51
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.46	2.65
ปริมาณสารระเหย		wt. %	61.42	2.75
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.64	0.14
คาร์บอนคงตัว		wt. %	9.48	1.92

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ทุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ทุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.4 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

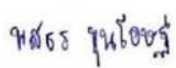
มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)


ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	12.30	2.08
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.52	1.43
ปริมาณสารระเหย		wt. %	61.61	1.47
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.60	0.42
คาร์บอนคงตัว		wt. %	9.27	0.22

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

  
(นางสาวพัชร์ พุนโซย)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

  
( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.5 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 3

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	12.32	2.51
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.23	2.08
ปริมาณสารระเหย		wt. %	61.85	2.20
ปริมาณเถ้า		wt. %	14.58	0.83
คาร์บอนคงตัว		wt. %	9.34	2.33

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.6 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	10.81	1.83
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.61	1.61
ปริมาณสารระเหย		wt. %	53.03	1.72
ปริมาณเถ้า		wt. %	28.38	0.81
คาร์บอนคงตัว		wt. %	8.98	2.24

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.7 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	10.83	0.80
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.86	2.40
ปริมาณสารระเหย		wt. %	53.67	1.41
ปริมาณเถ้า		wt. %	27.93	0.07
คาร์บอนคงตัว		wt. %	8.54	1.42

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ทุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ทุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.8 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2



ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 3

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	10.77	0.39
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.74	0.67
ปริมาณสารระเหย		wt. %	53.14	1.09
ปริมาณเถ้า		wt. %	28.48	0.82
คาร์บอนคงตัว		wt. %	8.64	2.57

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.9 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	10.12	1.72
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.80	2.33
ปริมาณสารระเหย		wt. %	49.14	2.67
ปริมาณเถ้า		wt. %	28.18	1.35
คาร์บอนคงตัว		wt. %	7.88	0.10

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.10 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	10.15	2.29
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.49	1.27
ปริมาณสารระเหย		wt. %	49.99	1.44
ปริมาณเถ้า		wt. %	27.18	0.83
คาร์บอนคงตัว		wt. %	8.34	1.79

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.11 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 3

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
 2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
 3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
 4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	9.70	0.77
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.65	0.13
ปริมาณสารระเหย		wt. %	49.31	2.65
ปริมาณเถ้า		wt. %	28.46	1.68
คาร์บอนคงตัว		wt. %	7.58	0.37

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
 (นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
 ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
 วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
 2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.12 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
 2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
 3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
 4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)


ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.60	2.43
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.73	0.20
ปริมาณสารระเหย		wt. %	33.66	1.30
ปริมาณเถ้า		wt. %	52.12	1.17
คาร์บอนคงตัว		wt. %	4.49	0.85

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
 (นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 21 ธันวาคม 2563

  
 ( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์ )  
 ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
 วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
 2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.13 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 1

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สภาวะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.83	1.91
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.63	2.01
ปริมาณสารระเหย		wt. %	35.04	0.96
ปริมาณเถ้า		wt. %	50.82	2.73
คาร์บอนคงตัว		wt. %	4.51	2.46

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พศธร ชุนโฮษฐ์

(นางสาวพศธร ชุนโฮษฐ์)

นักวิทยาศาสตร์

วันที่ 21 ธันวาคม 2563



( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์ )

ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น

2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.14 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 2

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

- ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 3  
เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.55	0.74
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	9.89	0.41
ปริมาณสารระเหย		wt. %	33.14	2.78
ปริมาณเถ้า		wt. %	52.43	0.11
คาร์บอนคงตัว		wt. %	4.54	2.50

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.15 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10% ครั้งที่ 3

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 1

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ยี่ห้อ CARBOLITE

2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ยี่ห้อ CARBOLITE

3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ยี่ห้อ BINDER

4. Bomb Calorimeter AC500 ยี่ห้อ Leco

สภาวะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.26	2.47
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.53	2.21
ปริมาณสารระเหย		wt. %	31.49	1.71
ปริมาณเถ้า		wt. %	50.63	2.42
คาร์บอนคงตัว		wt. %	3.35	0.77

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ทุนโษษฐ์  
(นางสาวพัสธร ทุนโษษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.16 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 1



ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 2

เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.35	0.77
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.80	2.28
ปริมาณสารระเหย		wt. %	32.68	1.89
ปริมาณเถ้า		wt. %	49.34	0.46
คาร์บอนคงตัว		wt. %	3.18	2.20

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.17 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 2

ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสารเลขที่ FEB-2020-111	ลำดับการแก้ไข 0
	แบบรายงาน ผลการวิเคราะห์และทดสอบ	หน้าที่ 1

วันที่ 21 ธันวาคม 2563

## รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์ Heating Value และ Proximate Analysis

- ผู้ส่งตัวอย่าง : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ชนิดตัวอย่าง : กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% การทดลองครั้งที่ 3  
เครื่องมือวิเคราะห์/ทดสอบ : 1. Tube Furnace Model CTF12/75/700 ชื่อ CARBOLITE  
2. Ashing Furnace Model AAF 12/18 ชื่อ CARBOLITE  
3. ตู้อบลมร้อน Model FED 260 ชื่อ BINDER  
4. Bomb Calorimeter AC500 ชื่อ Leco

สถานะการวิเคราะห์ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172-3175 (Proximate Analysis)

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิงการทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ	%RSD*
ค่าความร้อน	ASTM D5865	cal/g	6.56	1.03
ความชื้น	ASTM D3172-31	wt. %	14.46	2.72
ปริมาณสารระเหย		wt. %	34.07	1.06
ปริมาณเถ้า		wt. %	48.26	2.37
คาร์บอนคงตัว		wt. %	3.21	2.98

\*RSD = Relative Standard Deviation (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์)

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

พัสธร ชุนโฮษฐ์  
(นางสาวพัสธร ชุนโฮษฐ์)  
นักวิทยาศาสตร์  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

( ศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิศานต์ )  
ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล  
วันที่ 21 ธันวาคม 2563

- หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ ใช้อ้างอิงสำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
2. ห้ามทำสำเนารายงานฉบับนี้เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการ

รูปที่ ก.18 ค่าความร้อนและองค์ประกอบที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15% ครั้งที่ 3

ตารางที่ ก.1 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนและองค์ประกอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 10%

รายละเอียด	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ผลวิเคราะห์	%RSD
กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	13.10±0.01	0.08
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	9.73±0.05	0.46
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	14.85±0.06	0.39
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	64.21±0.19	0.30
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	11.20±0.17	1.53
กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 10%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	10.80±0.03	0.28
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	9.74±0.13	1.28
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	28.26±0.29	1.04
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	53.28±0.34	0.64
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	8.72±0.23	2.65
กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 10%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	6.66±0.15	2.24
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	9.75±0.13	1.35
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	51.79±0.85	1.65
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	33.95±0.98	2.89
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	4.51±0.03	0.56

ตารางที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนและองค์ประกอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ความชื้น 15%

รายละเอียด	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ผลวิเคราะห์	%RSD
กากหม้อกรอง 20% ความชื้น 15%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	12.29±0.04	0.29
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	14.40±0.15	1.06
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	14.61±0.03	0.21
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	61.63±0.22	0.35
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	9.36±0.11	1.14
กากหม้อกรอง 50% ความชื้น 15%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	9.99±0.25	2.52
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	14.65±0.16	1.06
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	27.94±0.67	2.41
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	49.48±0.45	0.91
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	7.93±0.38	4.83
กากหม้อกรอง 100% ความชื้น 15%	ค่าความร้อน	ASTM D5865	MJ/kg	6.39±0.15	2.41
	ความชื้น	ASTM D3173	wt. %	14.60±0.18	1.23
	ปริมาณเถ้า	ASTM D3174	wt. %	49.41±1.19	2.40
	ปริมาณสารระเหย	ASTM D3175	wt. %	32.75±1.29	3.94
	คาร์บอนคงตัว	ASTM D3172	wt. %	3.25±0.09	2.79

## ภาคผนวก ข

### ผลวิเคราะห์คุณสมบัติกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ จัดทำที่โรงงาน ภูมิศึกษา ณ วันที่ 10 - 19 มกราคม 2564 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ สัตส่วนต่างๆ การทดลองและการวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยและร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เพื่อตรวจสอบความผันแปรจากการทดลอง ตามตาราง ที่ ข.1 ถึง ข.9 ตัวอย่างการคำนวณคุณสมบัติกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัตส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% ในการทดลองครั้งที่ 1 ในแต่ละรายการแสดงไว้ดังนี้

#### ตัวอย่างการคำนวณความหนาแน่นรวม

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นรวม} &= (\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงรวมภาชนะ} - \text{น้ำหนักภาชนะ}) / \text{ปริมาตรภาชนะ} \\ &= (31.07 \text{ kg} - 10.96 \text{ kg}) / 0.03 \text{ m}^3 \\ &= 670.24 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณความยาวเฉลี่ย

$$\begin{aligned} \text{ความยาวเฉลี่ย} &= \text{ความยาวรวมของตัวอย่างแต่ละชิ้น} / \text{จำนวนตัวอย่างทั้งหมด} \\ &= 3,475.17 \text{ mm} / 183 \text{ ชิ้น} = 18.99 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณความคงทน

$$\begin{aligned} \text{ความคงทน} &= (\text{มวลที่เหลือหลังทดสอบ} / \text{มวลที่ร้อนผงฝุ่นออกก่อนการทดสอบ}) \times 100 \\ &= (476.46 \text{ g} / 501.33 \text{ g}) \times 100 = 95.04\% \end{aligned}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณปริมาณฝุ่น

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณฝุ่น} &= \{(\text{มวลตัวอย่างก่อนร้อน} - \text{มวลตัวอย่างหลังร้อน}) / \text{มวลตย.ก่อนร้อน}\} \times 100 \\ &= \{(505.27 \text{ g} - 481.88 \text{ g}) / 505.27 \text{ g}\} \times 100 = 4.63\% \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.1 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	670.24	-	678.72	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	18.99	-	17.11	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.04	-	94.19	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.63	-	4.4	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	670.13	-	678.64	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	15.61	-	17.76	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.3	-	94.18	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.81	-	4.35	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	672.52	-	677.41	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	18.56	-	16.38	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.13	-	94.31	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.57	-	4.13	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	670.96±1.34	0.20	678.26±0.75	0.11
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	17.72±1.84	10.38	17.08±0.69	4.04
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.16±0.13	0.14	94.23±0.08	0.08
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.67±0.12	2.67	4.29±0.14	3.35

ตารางที่ ข.2 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 30%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	669.68	-	673.09	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	14.68	-	16.88	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.63	-	94.52	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.24	-	2.92	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	670.28	-	671.33	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	19.16	-	17.48	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.27	-	94.35	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.35	-	2.75	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	667.21	-	675.46	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	18.37	-	15.04	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.3	-	94.47	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.53	-	2.99	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	669.06±1.61	0.24	673.29±2.09	0.31
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	17.4±2.39	13.74	16.47±1.27	7.72
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.4±0.2	0.21	94.45±0.09	0.09
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	4.37±0.15	3.35	2.89±0.12	4.27

ตารางที่ ข.3 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 40%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	682.98	-	679.14	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.42	-	22.4	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.54	-	95.58	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.6	-	3.05	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	684.01	-	677.93	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.48	-	21.6	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.21	-	95.42	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.65	-	3.13	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	680.73	-	676.73	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	15.94	-	18.11	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.51	-	95.56	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.89	-	2.86	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	682.57±1.71	0.25	677.93±1.22	0.18
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	19.61±3.18	16.22	20.7±2.28	11.02
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	95.42±0.18	0.19	95.52±0.09	0.09
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.71±0.16	5.72	3.01±0.14	4.61



ตารางที่ ข.4 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 50%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	685.97	-	690.53	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.27	-	21.96	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.19	-	95.62	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.66	-	3.02	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	684.82	-	691.36	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.27	-	22.40	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.07	-	95.64	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.61	-	3.07	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	682.44	-	694.30	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	19.49	-	18.12	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.14	-	95.88	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.40	-	3.28	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	684.41±1.78	0.26	692.06±2.01	0.29
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.34±1.6	7.52	20.83±2.35	11.30
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.13±0.06	0.06	95.71±0.14	0.15
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.56±0.14	5.39	3.12±0.14	4.42

ตารางที่ ข.5 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 60%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	685.27	-	690.37	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.65	-	23.45	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.33	-	96.32	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.76	-	2.43	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	682.99	-	692.29	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.84	-	22.81	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.28	-	96.02	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.80	-	2.69	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	682.9	-	695.72	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	19.56	-	18.97	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.47	-	96.03	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	3.09	-	2.61	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	683.72±1.37	0.20	692.79±2.70	0.39
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.68±1.84	8.49	21.74±2.42	11.15
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.36±0.1	0.10	96.12±0.17	0.18
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.88±0.18	6.25	2.58±0.13	5.16

ตารางที่ ข.6 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 70%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	%RSD	ผลวิเคราะห์	%RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	692.78	-	691.94	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	24.60	-	22.91	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.38	-	96.09	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.58	-	2.30	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	690.92	-	693.2	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.41	-	23.25	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.66	-	96.24	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.53	-	2.3	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	686.61	-	694.44	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.62	-	21.82	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.78	-	96.09	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.70	-	2.30	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	690.1±3.17	0.46	693.19±1.25	0.18
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.21±1.5	6.46	22.66±0.75	3.30
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.61±0.2	0.21	96.14±0.09	0.09
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.6±0.09	3.36	2.3±0	0.00

ตารางที่ ข.7 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 80%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	% RSD	ผลวิเคราะห์	% RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	690.83	-	704.48	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.42	-	22.48	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.67	-	96.61	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	1.97	-	1.59	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	695.05	-	702.61	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.14	-	21.25	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.83	-	96.51	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.00	-	1.54	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	689.91	-	702.83	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	20.47	-	19.45	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.76	-	96.79	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.12	-	1.77	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	691.93±2.77	0.40	703.31±1.05	0.15
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.01±1.48	6.72	21.06±1.52	7.24
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	96.75±0.08	0.08	96.64±0.14	0.15
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.03±0.08	3.91	1.63±0.12	7.42

ตารางที่ ข.8 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 90%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	% RSD	ผลวิเคราะห์	% RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	701.15	-	700.31	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.62	-	24.99	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	97.89	-	97.30	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.19	-	1.82	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	696.32	-	704.21	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.65	-	25.60	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	97.68	-	97.31	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.22	-	1.78	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	700.72	-	705.48	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.89	-	21.02	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	97.87	-	97.54	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.24	-	1.50	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	699.4±2.66	0.38	703.33±2.67	0.38
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.05±1.01	4.37	23.87±2.49	10.42
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	97.81±0.12	0.12	97.38±0.14	0.14
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	2.22±0.03	1.13	1.7±0.17	10.26

ตารางที่ ข.9 ผลวิเคราะห์ทางกายภาพที่สกัดส่วนกากหม้อกรอง 100%

ครั้งที่	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ	หน่วย	ความชื้น 10%		ความชื้น 15%	
				ผลวิเคราะห์	% RSD	ผลวิเคราะห์	% RSD
1	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	703.91	-	713.12	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.85	-	24.61	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	99.21	-	98.82	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	1.65	-	1.39	-
2	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	705.68	-	715.97	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	23.42	-	24.23	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	99.13	-	98.89	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	1.78	-	1.45	-
3	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	706.01	-	711.34	-
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	21.54	-	21.12	-
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	98.99	-	98.49	-
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	1.64	-	1.21	-
ค่าเฉลี่ย	ความหนาแน่นรวม	ASTM E873	kg/m <sup>3</sup>	705.2±1.13	0.16	713.48±2.35	0.33
	ความยาวเฉลี่ย	PFI Standard (2018)	mm	22.94±1.23	5.36	23.32±1.91	8.21
	ความคงทน	PFI Standard (2018)	%	99.11±0.11	0.11	98.73±0.22	0.22
	ปริมาณผงฝุ่น	PFI Standard (2018)	%	1.69±0.08	4.62	1.35±0.12	9.25

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

โรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวใช้วัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด 2 ชนิด ได้แก่ กากหม้อกรองและกากอ้อย โดยมีต้นทุนวัตถุดิบของกากอ้อย 900 บาทต่อตัน และกากหม้อกรอง 360 บาทต่อตัน ส่วนด้านแรงงานต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานในจุดดังกล่าว 3 คนต่อกะ ปฏิบัติงาน 8 ชั่วโมงต่อกะ จึงต้องใช้พนักงานทั้งหมด 9 คน เพื่อปฏิบัติงาน 24 ชั่วโมง อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ 325 บาทต่อวัน ด้านต้นทุนพลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูปเชื้อเพลิง เนื่องจากลักษณะการใช้ไฟฟ้าประกอบกิจการในกลุ่มประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ คือ การใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม ซึ่งมีความต้องการพลังงานเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือนก่อนหน้าเกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน จึงมีรายละเอียดการคิดคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าตามประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2 รูปแบบ ดังนี้

#### 4.1 อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of Day Rate : TOD)

ตารางที่ ค.1 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน

แรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)			ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Partial	Off Peak		
ตั้งแต่ 69 ขึ้นไป	224.30	29.91	0	3.1097	312.24
22 – 33	285.05	58.88	0	3.1471	312.24
ต่ำกว่า 22	332.71	68.22	0	3.1751	312.24

หมายเหตุ : Peak คือ เวลา 18.30 – 21.30 น.

Partial คือ เวลา 08.00 – 18.30 น.

Off Peak คือ เวลา 21.30 – 08.00 น.

## 4.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

ตารางที่ ค.2 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้

แรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Peak	Off Peak	
ตั้งแต่ 69 ขึ้นไป	74.14	4.1025	2.5849	312.24
22 – 33	132.93	4.1839	2.6037	312.24
ต่ำกว่า 22	210.00	4.3297	2.6369	312.24
ค่า FT	-0.1532 บาท/หน่วย			

หมายเหตุ : Peak คือ เวลา 09.00 – 22.00 น. วันจันทร์ -ศุกร์ และวันพืชมงคล  
 Off Peak คือ เวลา 22.00 น. - 09.00 น. วันเสาร์-อาทิตย์, วันแรงงานแห่งชาติ,  
 วันพืชมงคลที่ตรงกับวันเสาร์ – อาทิตย์ และ  
 วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)

เมื่อพิจารณารายละเอียดอัตราค่าไฟฟ้าทั้ง 2 รูปแบบ โรงงานดังกล่าวมีการทำสัญญาแบบ  
 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) โดยกำหนดให้การอัดขึ้นรูป  
 เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดขึ้น 24 ชั่วโมงต่อวัน จึงสามารถคำนวณค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย ดังนี้

ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย = (ค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วง Peak \* ช่วงเวลา Peak) + (ค่าพลังงานไฟฟ้า ช่วง  
 Off Peak \* ช่วงเวลา Off Peak) + ค่า FT

$$= (4.1839 * 13) + (2.6037 * 11) + (-0.1532)$$

$$= 3.31 \text{ บาท/หน่วย หรือ บาท/kWh}$$

จากข้อมูลต้นทุนวัตถุดิบ ไฟฟ้า และแรงงาน ผลการทดลองนำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตกับ  
 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้แสดงในตาราง ค.3 ถึง ค.4 และผลการคำนวณค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต  
 แสดงในตาราง ค.5 ถึง ค.6 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตของเชื้อเพลิงอัดเม็ด  
 ที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% แสดงได้ดังนี้



### ตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนวัตถุดิบ} &= (\text{สัดส่วนกากหม้อกรอง} \times \text{ราคากากหม้อกรอง}) + (\text{สัดส่วนกากอ้อย} \times \text{ราคากากอ้อย}) \\ &= (20\% \times 360 \text{ บาท/ตัน}) + (80\% \times 900 \text{ บาท/ตัน}) \\ &= 0.79 \text{ บาท/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} / \text{น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิต}) \times (10 \text{ นาที}/60 \text{ นาที}) \times 3.3 \text{ บาท/kWh} \\ &= (87.22 \text{ kWh} / 166.33 \text{ kg}) \times (1/6) \times 3.3 \text{ บาท/kWh} \\ &= 0.29 \text{ บาท/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนแรงงาน} &= (\text{จำนวนพนักงานต่อวัน} \times \text{ค่าแรงพนักงาน}) / (\text{นน.เชื้อเพลิงที่ผลิต} \times \text{เวลาทำงาน}) \\ &= (9 \text{ คน} \times 325 \text{ บาท/คน}) / (166.33 \text{ kg}/10 \text{ นาที} \times 60 \text{ นาที/ชั่วโมง} \times 24 \text{ ชั่วโมง}) \\ &= 0.12 \text{ บาท/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิต} &= \text{ต้นทุนวัตถุดิบ} + \text{ต้นทุนไฟฟ้า} + \text{ต้นทุนแรงงาน} \\ &= 0.79 \text{ บาท/kg} + 0.29 \text{ บาท/kg} + 0.12 \text{ บาท/kg} \\ &= 1.20 \text{ บาท/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต} &= \text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง} / \text{ต้นทุนการผลิต} \\ &= 13.15 \text{ MJ/kg} / 1.20 \text{ บาท/kg} \\ &= 10.93 \text{ MJ/บาท} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค.3 นำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ความชื้น 10%

สัดส่วนภาค หม้อกรอง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	นำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	นำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	นำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	นำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)
0%	-	-	-	-	-	-	-	-
10%	-	-	-	-	-	-	-	-
20%	182	87.49	167	87.08	150	87.10	166.33	87.22
30%	208	86.21	210	86.40	175	86.42	197.67	86.34
40%	258	86.03	280	86.05	273	86.43	270.33	86.17
50%	269	85.52	267	85.51	250	85.65	262.00	85.56
60%	273	85.52	262	85.36	251	85.28	262.00	85.39
70%	280	85.68	275	85.47	260	85.49	271.67	85.55
80%	300	84.47	298	85.37	299	84.83	299.00	84.89
90%	306	83.66	303	83.93	308	83.82	305.67	83.80
100%	312	82.13	312	83.00	318	81.87	314.00	82.33

ตารางที่ ค.4 น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ผลิตกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ความชื้น 15%

สัดส่วนภาค หม้อกรอง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ค่าเฉลี่ย	
	น้ำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	น้ำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	น้ำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)	น้ำหนักเชื้อเพลิง ที่ผลิตได้ (kg)	พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ (kWh)
0%	-	-	-	-	-	-	-	-
10%	-	-	-	-	-	-	-	-
20%	216	85.52	220	85.43	211	85.15	215.67	85.37
30%	220	85.93	201	86.04	215	85.31	212.00	85.76
40%	266	85.99	268	85.94	275	85.51	269.67	85.81
50%	267	84.38	263	83.30	261	83.42	263.67	83.70
60%	273	82.88	262	82.25	262	83.30	265.67	82.81
70%	273	82.70	267	83.98	262	82.84	267.33	83.17
80%	308	83.24	313	83.91	307	83.08	309.33	83.41
90%	307	82.78	310	82.92	303	82.57	306.67	82.76
100%	318	82.55	324	82.95	311	82.31	317.67	82.60

ตารางที่ ค.5 ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตที่ความชื้น 10%

สัดส่วนกากหม้อ กรอง	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ต้นทุนการผลิต (บาท/kg)				รวมต้นทุนการผลิต (บาท/kg)	ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)
		ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/kg)	ต้นทุนไฟฟ้า (บาท/kg)	ต้นทุนค่าแรง (บาท/kg)	ต้นทุนค่าแรง (บาท/kg)		
0%	-	-	-	-	-	-	-
10%	-	-	-	-	-	-	-
20%	13.15	0.79	0.29	0.12	1.20	10.93	
30%	12.34	0.74	0.24	0.10	1.08	11.41	
40%	11.53	0.68	0.18	0.08	0.93	12.34	
50%	10.73	0.63	0.18	0.08	0.89	12.09	
60%	9.92	0.58	0.18	0.08	0.83	11.91	
70%	9.11	0.52	0.17	0.07	0.77	11.83	
80%	8.31	0.47	0.16	0.07	0.69	12.00	
90%	7.50	0.41	0.15	0.07	0.63	11.87	
100%	6.69	0.36	0.14	0.06	0.57	11.76	

ตารางที่ ค.6 ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิตที่ความชื้น 15%

สัดส่วนกากหม้อ กรอง	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ต้นทุนการผลิต (บาท/kg)				ค่าความร้อนต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท)
		ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/kg)	ต้นทุนไฟฟ้า (บาท/kg)	ต้นทุนค่าแรง (บาท/kg)	รวมต้นทุนการผลิต (บาท/kg)	
0%	-	-	-	-	-	-
10%	-	-	-	-	-	-
20%	12.26	0.79	0.22	0.09	1.10	11.10
30%	11.52	0.74	0.22	0.10	1.06	10.90
40%	10.78	0.68	0.18	0.08	0.93	11.54
50%	10.05	0.63	0.17	0.08	0.88	11.39
60%	9.31	0.58	0.17	0.08	0.82	11.30
70%	8.57	0.52	0.17	0.08	0.77	11.14
80%	7.84	0.47	0.15	0.07	0.68	11.49
90%	7.10	0.41	0.15	0.07	0.63	11.29
100%	6.37	0.36	0.14	0.06	0.57	11.22

## ภาคผนวก ง

### ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดกับเตาในครัวเรือน

การทดสอบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดกับเตาในครัวเรือน จัดทำที่โรงงานกรณีศึกษา ณ วันที่ 10 - 19 มกราคม 2564 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด ด้วยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากกากหม้อกรอง การทดสอบตัวอย่างจะทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้นบันทึกค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือด น้ำหนักของภาชนะก่อนและหลังต้ม อุณหภูมิน้ำก่อนและหลังต้ม และอุณหภูมิของน้ำเดือด เพื่อคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) แสดงตามตารางที่ ง.1 ถึง ง.6 และตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนกากหม้อกรอง 20% ความชื้น 10% การทดลองครั้งที่ 1 แสดงไว้ดังนี้

#### ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน} &= \frac{M_{wi}C_p(T_b-T_i)+ M_{we}H_1}{M_mH_m} \times 100 \\ &= \frac{[1.0053 \text{ kg} \times 0.0042 \text{ MJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C}) \times (102.90 \text{ } ^\circ\text{C} - 34.5 \text{ } ^\circ\text{C})] + (0.0300 \text{ kg} \times 2.256 \text{ MJ}/\text{kg})}{(0.1905 \text{ kg} \times 13.15 \text{ MJ}/\text{kg})} \times 100 \\ &= 14.23\% \end{aligned}$$

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 1

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4150	1.3850	1.0053	0.0300	34.5	102.9	13.1480	0.1905	14.23	15.80
30	0.4097	1.4107	1.3822	1.0010	0.0285	34.1	102.5	12.3410	0.2107	13.96	16.43
40	0.4097	1.4135	1.3809	1.0038	0.0326	34.8	101.5	11.5340	0.2445	12.58	16.37
50	0.4097	1.4114	1.3933	1.0017	0.0181	34.6	102.1	10.7270	0.2886	10.49	17.53
60	0.4097	1.4132	1.3940	1.0035	0.0192	35.0	101.8	9.9200	0.3541	9.25	18.72
70	0.4097	1.4160	1.3826	1.0063	0.0334	34.6	101.7	9.1130	0.4025	9.48	19.33
80	0.4097	1.4128	1.3896	1.0031	0.0232	34.8	102.1	8.3060	0.4546	8.90	19.98
90	0.4097	1.4109	1.3960	1.0012	0.0149	34.5	102.9	7.4990	0.4797	8.93	19.43
100	0.4097	1.4168	1.4031	1.0071	0.0137	34.9	101.7	6.6920	0.5320	8.80	20.70

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 2

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4101	1.3815	1.0004	0.0286	34.6	101.8	13.1480	0.1912	13.80	16.08
30	0.4097	1.4122	1.3867	1.0025	0.0255	34.1	102.1	12.3410	0.2040	13.66	16.53
40	0.4097	1.4115	1.3872	1.0018	0.0243	33.9	101.6	11.5340	0.2305	12.78	16.68
50	0.4097	1.4104	1.3890	1.0007	0.0214	34.2	102.6	10.7270	0.2872	10.90	17.30
60	0.4097	1.4116	1.3865	1.0019	0.0251	33.8	102.1	9.9200	0.3563	9.73	19.10
70	0.4097	1.4175	1.3971	1.0078	0.0204	34.0	102.7	9.1130	0.4013	9.21	19.43
80	0.4097	1.4134	1.3899	1.0037	0.0235	35.0	102.0	8.3060	0.4412	9.15	19.60
90	0.4097	1.4157	1.3994	1.0060	0.0163	34.9	101.9	7.4990	0.4581	9.31	19.58
100	0.4097	1.4170	1.3988	1.0073	0.0182	34.8	102.6	6.6920	0.5430	9.02	20.92



ตารางที่ ๓.3 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 10% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 3

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4142	1.3902	1.0045	0.0240	34.4	103.0	13.1480	0.1854	14.09	15.93
30	0.4097	1.4125	1.3881	1.0028	0.0244	34.8	101.9	12.3410	0.2013	13.59	16.18
40	0.4097	1.4125	1.3914	1.0028	0.0211	34.2	101.7	11.5340	0.2381	12.09	16.45
50	0.4097	1.4106	1.3829	1.0009	0.0277	33.9	102.8	10.7270	0.2981	11.01	17.12
60	0.4097	1.4164	1.3897	1.0067	0.0267	34.3	102.7	9.9200	0.3517	10.02	18.85
70	0.4097	1.4138	1.3992	1.0041	0.0146	35.0	102.6	9.1130	0.3885	8.98	19.07
80	0.4097	1.4166	1.3985	1.0069	0.0181	35.0	102.4	8.3060	0.4505	8.71	19.67
90	0.4097	1.4163	1.3961	1.0066	0.0202	34.2	101.5	7.4990	0.4801	9.17	19.57
100	0.4097	1.4109	1.3959	1.0012	0.0150	34.3	102.7	6.6920	0.5570	8.62	20.68

ตารางที่ ง.4 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 1

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4104	1.3855	1.0007	0.0249	34.4	103.0	12.2556	0.2036	13.81	16.03
30	0.4097	1.4171	1.3900	1.0074	0.0271	34.8	101.9	11.5194	0.2472	12.12	16.85
40	0.4097	1.4132	1.3858	1.0035	0.0274	34.2	101.7	10.7832	0.2846	11.28	17.12
50	0.4097	1.4106	1.3818	1.0009	0.0288	33.9	102.8	10.0471	0.3172	11.13	17.67
60	0.4097	1.4112	1.3818	1.0015	0.0294	34.3	102.7	9.3109	0.3920	9.70	18.68
70	0.4097	1.4168	1.3949	1.0071	0.0219	35.0	102.6	8.5747	0.4213	9.28	20.03
80	0.4097	1.4170	1.3848	1.0073	0.0322	35.0	102.4	7.8385	0.4886	9.34	20.62
90	0.4097	1.4177	1.3858	1.0080	0.0319	34.2	101.5	7.1023	0.5739	8.76	20.57
100	0.4097	1.4117	1.3809	1.0020	0.0308	34.3	102.7	6.3661	0.6386	8.79	21.58

ตารางที่ ๓.5 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 2

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4114	1.3892	1.0017	0.0222	34.4	103.0	12.2556	0.2048	13.49	16.52
30	0.4097	1.4113	1.3809	1.0016	0.0304	34.8	101.9	11.5194	0.2481	12.28	16.83
40	0.4097	1.4104	1.3850	1.0007	0.0254	34.2	101.7	10.7832	0.2896	10.92	17.53
50	0.4097	1.4124	1.3959	1.0027	0.0165	33.9	102.8	10.0471	0.3126	10.42	17.38
60	0.4097	1.4163	1.3965	1.0066	0.0198	34.3	102.7	9.3109	0.3919	9.15	18.90
70	0.4097	1.4144	1.3830	1.0047	0.0314	35.0	102.6	8.5747	0.4294	9.67	19.50
80	0.4097	1.4153	1.3844	1.0056	0.0309	35.0	102.4	7.8385	0.4876	9.27	20.50
90	0.4097	1.4104	1.3946	1.0007	0.0158	34.2	101.5	7.1023	0.5580	8.04	20.72
100	0.4097	1.4149	1.3983	1.0052	0.0166	34.3	102.7	6.3661	0.5961	8.60	21.82

ตารางที่ ๖.6 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดความชื้น 15% กับเตาในครัวเรือน ครั้งที่ 3

สัดส่วน กากหม้อ กรอง (%)	น้ำหนัก สถานะ (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ ก่อนต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำ+ สถานะ หลังต้ม (kg)	น้ำหนัก น้ำก่อน ต้ม (kg)	น้ำหนัก ของน้ำที่ หายไป (kg)	อุณหภูมิ ของน้ำ ก่อนต้ม (°C)	อุณหภูมิ ของน้ำ เดือด (°C)	ค่าความ ร้อนของ เชื้อเพลิง (MJ/kg)	น้ำหนัก ของ เชื้อเพลิง ใช้ (kg)	ประสิทธิภาพ การใช้งานเชิง ความร้อน (%)	ระยะเวลา ต้มน้ำเดือด (นาที)
20	0.4097	1.4111	1.3811	1.0014	0.0300	34.4	103.0	12.2556	0.2051	14.17	16.67
30	0.4097	1.4144	1.3863	1.0047	0.0281	34.8	101.9	11.5194	0.2492	12.07	16.87
40	0.4097	1.4124	1.3843	1.0027	0.0281	34.2	101.7	10.7832	0.2957	10.90	17.78
50	0.4097	1.4137	1.3981	1.0040	0.0156	33.9	102.8	10.0471	0.3164	10.25	18.00
60	0.4097	1.4132	1.3839	1.0035	0.0293	34.3	102.7	9.3109	0.3943	9.65	18.43
70	0.4097	1.4124	1.3983	1.0027	0.0141	35.0	102.6	8.5747	0.4269	8.65	19.27
80	0.4097	1.4161	1.3909	1.0064	0.0252	35.0	102.4	7.8385	0.4860	8.97	21.38
90	0.4097	1.4102	1.3826	1.0005	0.0276	34.2	101.5	7.1023	0.5761	8.43	20.57
100	0.4097	1.4139	1.3828	1.0042	0.0311	34.3	102.7	6.3661	0.6942	8.12	21.90

## รายการอ้างอิง

- ASTM International. (2013). *ASTM D3172-13 Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*. West Conshohocken: PA.
- ASTM International. (2015). *ASTM D3176-15 Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke*. West Conshohocken: PA.
- ASTM International. (2017). *ASTM D3173 / D3173M-17a Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. West Conshohocken: PA.
- ASTM International. (2018). *ASTM D3174-12(2018)e1 Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. West Conshohocken: PA.
- ASTM International. (2019). *ASTM D5865 / D5865M-19 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. West Conshohocken: PA.
- ASTM International. (2020). *ASTM D3175-20 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. West Conshohocken: PA.
- Brebu, M., & Vasile, C. (2010). *Thermal degradation of lignin*. Cellulose Chemistry and Technology.
- Campiteli, L., Santos, R. M., Lazarovits, G., & Rigobelo, E. C. (2018). The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having four different crop rotations practices in Brazil. *Cientifica*, 42-48.
- Cruz, C. H., Souza, G. M., & Cortez, L. A. (2013). *Future Energy* (2 ed.). Durban: Elsevier Science.
- Devia-Orjuela, J. S., Alvarez-Pugliese, C. E., Victoria, D. D., Cabrales, N. M., & Ho, L. E. (2019). *Evaluation of Press Mud, Vinasse Powder and Extraction Sludge with Ethanol in a Pyrolysis Process*. Energies.

- Dotaniya, M. L., Datta, S. C., Biswas, D. R., Dotaniya, C. K., Meena, B. L., Rajendiran, S., . . . Lata, M. (2016). Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 185–194.
- George, P. A., Eras, J. J., Gutierrez, A. S., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2010). Residue from Sugarcane Juice Filtration (Filter Cake): Energy Use at the Sugar Factory. *Waste Biomass Valor*, 407-413.
- Gil, M. V., Oulego, P., Casal, M. D., Pevida, C., & P, J. J. (2010). *Mechanical durability and combustion characteristics of pellets*. Bioresource Technology.
- Helmenstine, A. M. (2020, August 27). <https://www.thoughtco.com/definition-of-calorimeter-in-chemistry-604397>. Retrieved from <https://www.thoughtco.com>.
- Indiamart. (2021, July 17). [www.indiamart.com](http://www.indiamart.com). Retrieved from <https://www.indiamart.com/proddetail/groundnut-shell-biomass-pellet-22594621833.html>.
- Karp, S., Woiciechowski, A., Soccol, V., & Soccol, C. (2013). Pretreatment Strategies for Delignification of Sugarcane Bagasse: A Review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 679-689.
- Merlan, M. (2016). Study and realization of a microwaves system to estimate the moisture content in wood biomass.
- Miller, B. G. (2017). *Introduction to coal utilization technologies*. Clean coal engineering technology.
- Rossel, C., Costa, A., & Rabelo, S. (2015). *Sugarcane*. Brazil: School of Chemical Engineering, State University of Campinas.
- Salmeia, K., Jovic, M., Ragaisiene, A., Rukuiziene, Z., Milasius, R., Mikucioniene, D., & Gaan, S. (2016). Flammability of Cellulose-Based Fibers and the Effect of

Structure of Phosphorus Compounds on Their Flame Retardancy. *Polymers*, 1-15.

Sun, J. X., Liu, C. F., Ren, J. L., Xu, F., Liu, J. J., & Sun, R. C. (2004). *Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. Polymer Degradation and Stability*. Polymer Degradation and Stability.

The Carbon Trust. (2012). *Biomass Fuel Procurement Guide: Key Considerations for Successful Procurement*. UK: The Carbon Trust.

Wang, J. J. (2015). *Effect of moisture absorption on Compression properties of Bagasse composites*. University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy.

Wongkoon, T., Boonlue, S., & Riddech, N. (2014). Effect of Compost Made from Filter Cake and Distillery Slop on Sugarcane Growth. *KKU Res. J.*, 250-255.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). *โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กฤติย์ภรณ์ ตรังคประสิทธิ์. (2553). *การเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทางใบและเปลือกนอกต้นปาล์มน้ำมัน*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กษิเดช สาลีพัฒนา. (2560). *การศึกษาความคุ้มค่าของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทะลายปาล์มเปล่า*. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กันยาพร ไชยวงศ์, ญัฐพล วิชาญ, อาริยะ แสนทวีสุข, จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล, และ ธีรภรณ์ จันทร์หอม. (2559). ผลของอากาศป้อนต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา*, 37-42.

- กิตตินันท์ มลิวรรณ, ฐานันตร์ศักดิ์ เทพญา, ชยุต นันทคุสิต, นันทพันธ์ นภัทรานันท์, และ ศักตินันท์ โอแก้ว. (2556). การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบอัดเม็ดกับซีลี้อย อัดเม็ดในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- กิตติวุฒิ เกษมวงศ์. (2560). การผลิตไข่และแยกสารโกลนเกล็ดจากกากหม้อกรองโรงงานน้ำตาลเพื่อการสร้างมูลค่าเพิ่ม. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- เจตน์สิทธิ์ สาสิทธิ์. (2559). เชื้อเพลิงชีวมวลจากกากเหลือใช้ทางการเกษตร : ลักษณะสมบัติและอัตราส่วนการใช้. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนาพล ตันดีสัตยกุล, สุริยา พงษ์เกษม, ปรีชญ์ปวีณ ภูหญ้า, และ ภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. (2558). ผลงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 418-431.
- ธีรารัตน์ จีระมะกร, กมลวรรณ แสนคณิง, ผกาวิ สัตริวงศ์, และ กุลธิดา ธรรมรัตน์. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับใบอ้อย. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14, (หน้า 1040-1047). ระยอง.
- ปริญญ์รัฐ หนูสงค์. (2560). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเบียร์ร่วมกับวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรพรรณ เล่าประวัติชัย. (2561). กรณีศึกษาพลังงานชีวมวลด้วยเศษไม้ยางพาราจังหวัดระนอง. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- ยุวรรตน์ เงินเย็น, ชนิภรณ์ อุตสำห, และ กนกวรรณ ฤทธิวิธ. (2561). เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากมูลสุกรและมูลไก่โดยไม่ใช้ตัวประสาน. การเกษตรราชภัฏ, 8-16.
- วัชร คตินันท์กุล. (2562). เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด พลังงานจากธรรมชาติ. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.



- ศิริชัย ต่อสกุล, จงกล สุภารัตน์, และ นทีชัย ผัสดี. (2558). การออกแบบและสร้างเครื่องอัดเม็ด  
เชื้อเพลิงชีวมวลด้วยระบบตายน์อัด. *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทน  
สู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8* (หน้า 91-94). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2563). *รายงานประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลทราย ฤดู  
การผลิต 2562/63*. กรุงเทพมหานคร: สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวง  
อุตสาหกรรม.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2561). *รายงานประจำปี 2561*. กรุงเทพมหานคร:  
สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.
- เสริมศักดิ์ เกิดวัน, รุ่งโรจน์ จินต์วง, และ สุธำพร เกตุพันธ์. (2561). *การผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือก  
ต้นสาคุ*. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดี, ณัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ, และ นิภา  
วรรณ ชูชาติ. (2554). การนำเปลือกทุเรียน และ เปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูป เชื้อเพลิง  
อัดแท่ง. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49: สาขา  
วิทยาศาสตร์* (หน้า 162-168). กรุงเทพมหานคร: คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อาภรณ์ วงษ์วิจารณ์, นงพงา คุณจักร, พูลพันธ์ ศิววรรณ, และ ่องอาจ วัฒนชัยยิ่งยง. (2543). *การ  
วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และจุลชีววิทยาของ Filter Press Cake จากโรงงาน  
น้ำตาลในประเทศไทย ระยะที่ 1-2*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิโรจน์ โสภณอรุณรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	11 กันยายน 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	บัญชีบัณฑิต สาขาวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ปีการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2554
ที่อยู่ปัจจุบัน	148 ถนนพะเนียง แขวงวัดโสมนัส เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพมหานคร 10100