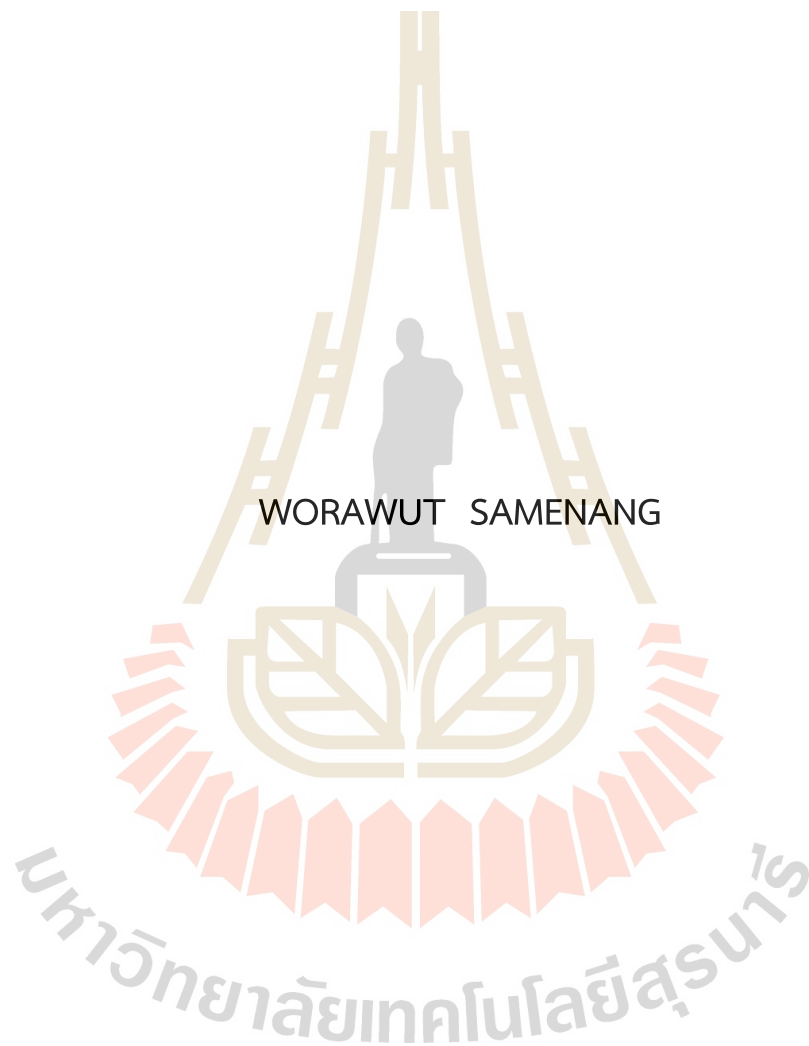


การผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

PRODUCTION OF CASSAVA RHIZOME BRIQUETTE MIXED
WITH GLYCERIN



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การผลิตถ่านอัดแท่งจากเห้้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอริน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



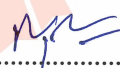
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล วงศ์เยาว์)
ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รองศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์)
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
ประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรุฒิ สมีนาง: การผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน (PRODUCTION OF CASSAVA RHIZOME BRIQUETTE MIXED WITH GLYCERIN)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค, 192 หน้า.

คำสำคัญ : กลีเซอริน เหง้ามันสำปะหลัง แม่แรงไฮดรอลิก ค่าความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอัดถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินและศึกษาผลของอัตราส่วนกลีเซอรินและความดันการกดอัดต่อสมบัติของถ่านอัดแท่งรวมถึงเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ สมรรถนะเชิงความร้อนและค่ามลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ ทดสอบอัดถ่านด้วย อัตราส่วนผสมผงถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน 100 : 0, 80 : 20, 75 : 25, 70 : 30 และ ความดันการกดอัด 120, 150, 180 kg/cm² ถ่านอัดแท่งที่ได้พบว่ามีสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความชื้นอยู่ในช่วง 0.968 – 2.579 % w.b. ความหนาแน่นรวม 0.416 – 0.514 g/cm³ ความแข็งแรงเมื่อทดสอบแรงกดอัดมีค่าเป็น 1.80 – 9.96 kg/cm² และมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 5,570 – 6,164 cal/g ทดสอบการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งที่ได้พบว่ามีพฤติกรรมการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 3 ช่วงชัดเจน ช่วงก่อนการเผาไหม้ ช่วงการเผาไหม้หลักของถ่าน และช่วงมอดดับ โดยมีค่ามลพิษจากการเผาไหม้ได้แก่ ค่าความเข้มข้น CO สูงสุด 167 ppm อยู่ในช่วงปลอดภัยต่ำกว่าค่ามาตรฐาน IRBEA (มีค่าน้อยกว่า 1,310 ppm) ผลการทดสอบสมรรถนะเชิงความร้อนเมื่อใช้อากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % ในการเผาไหม้ พบว่า ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศอยู่ในช่วง 45.2 – 63.0 °C และ 42.3 – 61.3 °C ตามลำดับ อัตราการเผาไหม้อยู่ในช่วง 0.883 – 1.042 g/min และ 0.872 – 1.013 g/min ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการเผาไหม้อยู่ในช่วง 10.843 – 14.901 % และ 20.828 – 28.828 % ตามลำดับ ผลการพัฒนาเครื่องอัดถ่านอัดแท่งขนาดแรงกด 20 ตัน นี้สามารถผลิตถ่านอัดแท่งได้จำนวน 384 ก้อนต่อวัน โดยถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินมีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้อย่างดี โดยผลการทดลองทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา วรุฒิ สมีนาง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กระวี ตรีอำนรรค

WORAWUT SAMENANG: PRODUCTION OF CASSAVA RHIZOME BRIQUETTE MIXED
WITH GLYCERIN

THESIS ADVISOR: THESIS ADVISOR: ASST.PROF. KRAWEE TREEAMNUK, 192 PP.

Keyword : Glycerin/ Cassava rhizome/ Hydraulic jack/ Heating value/ Thermal efficiency

This research aimed to develop a briquette pressing machine for producing charcoal briquettes from cassava rhizomes mixed with glycerin. The study also investigated the effects of glycerin mixing ratios and compression pressure on the physical properties of the briquettes, as well as their combustion behavior, thermal performance, and pollutant emissions. The briquettes were produced using charcoal powder from cassava rhizomes mixed with glycerin at ratios of 100:0, 80:20, 75:25, and 70:30. The compression pressures applied were 120, 150, and 180 kg/cm². The physical properties of the obtained briquettes were as follows: moisture content ranged from 0.968–2.579% (w.b.), bulk density ranged from 0.416–0.514 g/cm³, compressive strength ranged from 1.80–9.96 kg/cm², and heating value ranged from 5,570–6,164 cal/g. Combustion testing showed that the briquettes exhibited three distinct combustion stages: preheating, briquette combustion, and burnout. The maximum CO concentration measured was 167 ppm, which is within the safe range and below the IRBEA standard (less than 1,310 ppm). Thermal performance testing under 100% and 200% theoretical air supply revealed that the maximum temperature differences between air outlet and inlet ranged from 45.2–63.0 °C and 42.3–61.3 °C, respectively. The burning rates ranged from 0.883–1.042 g/min and 0.872–1.013 g/min, respectively. The thermal efficiencies ranged from 10.843–14.901% and 20.828–28.828%, respectively. The developed briquette press machine, with a compression capacity of 20 tons, was capable of producing 384 briquettes per day. The cassava rhizome–glycerin briquettes demonstrate strong potential as an alternative fuel. All experimental results met relevant standards and were consistent with related research findings.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature Worawut Samenang.
Advisor's Signature Krawee Treeamnu

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ฉบับนี้ สำเร็จ
ลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายหน่วยงานและหลายท่าน
ซึ่งข้าพเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย
ตลอดระยะเวลา จนทำให้ผลงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล วงศ์เยาว์ ประธานกรรมการ รอง
ศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การุญ พิงสุวรรณรักษ์
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันมีคุณค่าในการปรับปรุงและ
พัฒนางานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และ
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงขอขอบคุณ ครอบครัว ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในทุก
ขั้นตอนของการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

วรุฒิ สมีนาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เหง้ามันสำปะหลัง (Cassava rhizome)	6
2.2 ถ่านชีวมวล (Biomass charcoal)	7
2.3 กลีเซอริน (Glycerin)	8
2.4 ตัวยึดประสานถ่านอัดแท่ง (Binder for briquette)	9
2.5 วิธีการอัดถ่านอัดแท่ง (Briquette production)	10
2.5.1 การอัดแบบสกรู (Screw press extruder)	10
2.5.2 การอัดแบบลูกสูบกลเชิงกล (Mechanical piston press)	11
2.5.3 การอัดแบบลูกสูบระบบไฮดรอลิก (Hydraulic piston press)	12
2.5.4 การอัดแบบลูกกลิ้ง (Roller press)	13
2.5.5 การอัดด้วยมือ (Manual press)	14
2.5.6 ถ่านอัดแท่ง (Briquetted charcoal)	15
2.6 การเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง (Combustion of briquettes)	21
2.6.1 สูตรทางเคมีของการเผาไหม้ถ่าน	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.2	สูตรทางเคมีของการเผาไหม้กลีเซอริน	22
2.6.3	สูตรทางเคมีของการเผาไหม้แป้งมันสำปะหลัง	22
2.6.4	สูตรทางเคมีถ่านอัดแท่งเห้งน้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินและแป้ง มันสำปะหลัง	22
2.7	สมดุลของพลังงาน (Energy balance)	24
2.8	การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	24
2.8.1	การนำความร้อน (Conduction)	25
2.8.2	การพาความร้อน (Convection)	25
2.8.3	การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	26
2.9	การทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง (Testing the properties of briquettes)	26
2.9.1	การหาปริมาณความชื้น (Moisture content)	27
2.9.2	ความหนาแน่นรวม (Bulk density)	27
2.9.3	การทดสอบความแข็งแรงการกด (Compression test)	28
2.9.4	การหาค่าความร้อน (Heating value)	29
2.9.5	ระยะเวลาการติดไฟ (Ignition time)	30
2.9.6	อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate)	31
2.10	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	31
2.10.1	ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency %)	31
2.10.2	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)	32
2.11	ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงและการวัดมลพิษ	33
2.12	มาตรฐานถ่านอัดแท่ง (Briquette Standards)	34
2.12.1	คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547	34
2.12.2	มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งสากลและการอ้างอิงจากงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง	35
2.12.3	มาตรฐานการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวล	35
2.13	การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.13.1	Duncan's Multiple Range Test (DMRT)	36
2.13.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance)	36
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	37
3.1	แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.2	ส่วนผสมในการทดลอง.....	38
3.2.1	เหง้ามันสำปะหลังในการทดลอง.....	38
3.2.2	ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในการทดลอง	38
3.2.3	กลีเซอรินในการทดลอง	39
3.2.4	แป้งมันสำปะหลังในการทดลอง.....	41
3.3	การทดลองขั้นต้น.....	41
3.3.1	ออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้น	41
3.3.2	กำหนดระดับของตัวแปรต้นการทดลองขั้นต้น	42
3.3.3	ผลิตถ่านอัดแท่งการทดลองขั้นต้น	42
3.3.4	ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	45
3.3.5	ออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น	47
3.3.6	วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองขั้นต้น.....	49
3.4	การทดลองเชิงลึก.....	50
3.4.1	การพัฒนาเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน.....	50
3.4.2	ตัวแปรต้นในการทดลอง.....	51
3.4.3	การผลิตถ่านอัดแท่งจากเครื่องอัดขนาด 20 ตัน	51
3.4.4	ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานถ่านอัดแท่ง	53
3.4.5	ออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อน	55
3.4.6	การคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อน.....	60
3.4.7	วิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง	61
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1	ผลของการเตรียมส่วนผสม.....	62
4.1.1	ผลของการผลิตถ่านห้ำมันสำปะหลัง.....	62
4.1.2	ผลของการผลิตกลีเซอริน.....	63
4.1.3	ค่าความร้อนของส่วนผสม	64
4.2	ผลของการทดลองขั้นต้น.....	65
4.2.1	ผลออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการ ทดลองขั้นต้น.....	65
4.2.2	ผลลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	65
4.2.3	ผลความขึ้นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	68
4.2.4	ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	69
4.2.5	ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	70
4.2.6	ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	72
4.2.7	ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	74
4.2.8	ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	75
4.3	ผลของการทดลองเชิงลึก.....	76
4.3.1	ผลออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการ ทดลอง	77
4.3.2	ผลออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้การทดลอง.....	77
4.3.3	ผลลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งในการทดลอง	78
4.3.4	ผลสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของถ่านอัดแท่งใน การทดลอง	81
4.3.5	ผลสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของถ่านอัดแท่ง ในการทดลอง	84
4.3.6	ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง	85
4.3.7	ผลมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง.....	89
4.3.8	ผลพฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง	94
4.3.9	ผลสมรรถนะเชิงความร้อนการทดลอง	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	115
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	116
5.1 สรุปผลการวิจัย	116
5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก	116
5.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนกลีเซอรินและความการดันกดอัดต่อสมบัติ ของถ่านอัดแท่ง	116
5.1.3 พฤติกรรมการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษของถ่านอัดแท่ง	117
5.1.4 มลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง	117
5.1.5 สมรรถนะเชิงความร้อนถ่านอัดแท่ง	117
5.2 ข้อเสนอแนะ	118
5.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก	118
5.2.2 ลักษณะรูปทรงและอัตราส่วนผสมของถ่านอัดแท่ง	118
5.2.3 การออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้	118
รายการอ้างอิง	119
ภาคผนวก	128
ภาคผนวก ก ขนาดของเครื่องอัดถ่านและการออกแบบระบบทดลอง	129
ก.1 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง ขั้นต้น	130
ก.2 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น	133
ก.3 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง	135
ก.4 ขนาดและตำแหน่งต่างๆ ของห้องเผาไหม้การทดลอง	137
ก.5 การสอบเทียบ Load Cell Straight Bar with Hook HX711 Module	138
ก.6 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อน	140
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ	143
ข.1 อัตราส่วนผสมและผลการสกัดไบโอดีเซล	144
ข.2 ตารางผลของการทดลองขั้นต้น	145

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข.3	ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการใช้ของอากาศ.....	148
	ภาคผนวก ค ผลงานทางวิชาการ	152
ค.1	ผลงานที่ได้รับการจดอนุสิทธิบัตรระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท.....	153
ค.2	ผลงานนำเสนอบทความวิชาการระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท.....	154
ค.3	ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	163
ค.4	ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ TCI กลุ่ม 1 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท.....	176
	ประวัติผู้เขียน	192

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 34
2.2	มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งสากลและการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 35
2.3	มาตรฐานการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวล..... 36
3.1	อัตราส่วนการผสมและความสูงถ่านอัดแท่งการทดลองขั้นต้น..... 43
3.2	อัตราส่วนการผสมและความดันการกดอัดถ่านอัดแท่งการทดลอง..... 52
3.3	อัตราการไหลอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้การทดลอง..... 58
4.1	ค่าความร้อนของส่วนผสม 664
4.2	มวลและขนาดของถ่านอัดแท่งการทดลองขั้นต้น..... 67
4.3	ผลความชื้นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น..... 68
4.4	ลักษณะของถ่านอัดแท่งในการทดลอง 779
4.5	ขนาดของถ่านอัดแท่งจากการทดลอง..... 80
4.6	สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง 82
4.7	สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง..... 84
4.8	ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง..... 86
4.9	ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน..... 88
4.10	ผลลักษณะทางกายภาพของควันการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง..... 89
4.11	ผลของมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง..... 92
4.12	ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ ทฤษฎี 100 %..... 96
4.13	ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ ทฤษฎี 200 %..... 101
4.14	ผลสมรรถนะเชิงความร้อนของอากาศทฤษฎี 100 % 107
4.15	ผลสมรรถนะเชิงความร้อนของอากาศทฤษฎี 200 % 110

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลมาตรฐานกับค่าสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้	139
ข.1 อัตราส่วนผสมการสกัดไบโอดีเซล.....	144
ข.2 ผลของการสกัดไบโอดีเซล	145
ข.3 ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	145
ข.4 ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	146
ข.5 ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น.....	147
ข.6 ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	148



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	9
2.4	10
2.5	11
2.6	12
2.7	13
2.8	14
2.9	15
2.10	24
2.11	25
2.12	27
2.13	28
2.14	29
2.15	31
2.16	33
2.17	34
3.1	37
3.2	38
3.3	39
3.4	39
3.5	40
3.6	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	แป้งมันสำปะหลัง 41
3.8	เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้น 42
3.9	ขั้นตอนการผสมส่วนผสม 43
3.10	ขั้นตอนอัดถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น 44
3.11	การอบถ่านอัดแท่งไล่ความชื้น 44
3.12	การอบหาปริมาณความชื้นถ่านอัดแท่ง 445
3.13	เครื่อง Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG 46
3.14	ระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น 47
3.15	จุดติดไฟถ่านทดลองขั้นต้น 48
3.16	UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager 48
3.17	เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลอง 51
3.18	ขั้นตอนอัดถ่านอัดแท่งในการทดลอง 53
3.19	Universal Testing Machine (UTM) TTR/THAI Model MUL-125 55
3.20	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 ในการทดลอง 556
3.21	ระบบการทดลองเชิงความร้อน 57
3.22	ขั้นตอนการทดลองเชิงความร้อน 59
3.23	แนวคิดการหาพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศจากพื้นที่ได้กราฟ 60
4.1	ผลของการผลิตถ่านแข็งมันสำปะหลัง 63
4.2	กลีเซอรินทั้งหมดที่ได้จากการสกัดไบโอดีเซล 64
4.3	ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้การทดลองขั้นต้น 66
4.4	ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น 69
4.5	ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น 71
4.6	ภาพถ่ายความร้อนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง ก) หลังจากจุดติดไฟ และ ข) หลังจากอุณหภูมิ 60 °C 72
4.7	อุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการทดลองขั้นต้น 73
4.8	ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น	75
4.10 ผลออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้การทดลอง	778
4.11 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 100 % เริ่มต้นการเผาไหม้ จนถ่านอัดแท่งมอดดับ	95
4.12 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 200 % เริ่มต้นการเผาไหม้ จนถ่านอัดแท่งมอดดับ	100
4.13 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออก และทางเข้าอากาศ	112
4.14 การเปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้	113
4.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน	114



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

อักษรย่อ

CO	คือ	คาร์บอนมอนอกไซด์
NO _x	คือ	กลุ่มก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน เช่น NO และ NO ₂
SO ₂	คือ	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์
O ₂	คือ	ออกซิเจน
CO ₂	คือ	คาร์บอนไดออกไซด์
<i>M</i>	คือ	ค่าความชื้น (%)
<i>W</i> ₁	คือ	มวลตัวอย่างทดลองก่อนอบ (g)
<i>W</i> ₂	คือ	มวลตัวอย่างทดลองหลังอบ (g)
w.b.	คือ	มาตรฐานเปียก (Wet basis)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (g/cm ³)
<i>V</i>	คือ	ปริมาตรของถ่านอัดแท่ง (cm ³)
σ_c	คือ	ความแข็งแรงแรงกด (Compressive strength) หน่วย N/mm ² หรือ MPa
<i>F</i>	คือ	แรงที่ทำให้ชิ้นงานเสียหายหรือแตก (Maximum load) หน่วย นิวตัน (N)
<i>A</i>	คือ	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (Cross-sectional area) หน่วย mm ²
<i>m</i> _w	คือ	มวลของน้ำใน bucket (g)
<i>m</i> _{eq}	คือ	water equivalent ของ bomb calorimeter (g)
<i>c</i> _p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (cal/g·°C)
ΔT	คือ	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (°C)
<i>Q</i> ₁	คือ	ความร้อนจากหลอดจุดไฟ (cal)
<i>Q</i> ₂	คือ	ความร้อนจากกรดไนตริก (cal)
<i>Q</i> ₃	คือ	ความร้อนจากกรดซัลฟูริก (cal)
<i>m</i> _{fuel}	คือ	มวลของเชื้อเพลิงตัวอย่าง (g)
$\dot{m}$	คือ	อัตราการเผาไหม้ (g/min)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ

Δm	คือ	การเปลี่ยนแปลงของมวลเชื้อเพลิง (g)
Δt	คือ	การเปลี่ยนแปลงของเวลา (min)
HU	คือ	ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (%)
M_w	คือ	มวลของน้ำ (kg)
c_p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.°C)
T_b	คือ	อุณหภูมิน้ำเดือด (°C)
T_i	คือ	อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (°C)
M_c	คือ	มวลของน้ำที่ระเหย (kg)
L	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
M_f	คือ	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
H_f	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
m_{air}	คือ	มวลของอากาศ (g)
$c_{p,air}$	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/g °C)
ΔT_{air}	คือ	$T_{out,air} - T_{in,air}$ (°C)
$T_{out,air}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศออก (°C)
$T_{in,air}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศเข้า (°C)
Δm_{fuel}	คือ	มวลของเชื้อเพลิงที่สูญเสียไป (g)
Q_{HV}	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (J/g)
PB	คือ	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งภาครัฐไม่สามารถจัดหาให้เพียงพอต่อความต้องการได้ การหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยได้มีนโยบายส่งเสริมการผลิตและใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศเพิ่มขึ้น เพื่อบูรณาการการใช้พลังงานของชาติ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) และจากการขยายตัวของสังคมและจำนวนประชากร รวมถึงการเข้าสู่สังคมผู้สูงวัยส่งผลให้การบริโภคพลังงานเพิ่มสูงขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันได้ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นตามอัตราการขยายตัวของประชากร ซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตและสุขภาพของประชาชน ความต้องการพลังงานหลักประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าที่พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 80 % ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ก่อให้เกิดการปล่อยมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมในระดับค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบอื่น ๆ (Bunyamanid et al., 2016) ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีบทบาทสำคัญต่อระบบพลังงานโลกมาตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยทั่วโลกนิยมใช้ถ่านหินเนื่องจากใช้งานได้ง่าย มีปริมาณสำรองสูง และคาดว่าจะสามารถนำมาใช้ได้อีกไม่น้อยกว่า 200 ปี จากการสำรวจพบว่าแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ทั่วโลก อีกทั้งราคายังมีความผันผวนน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทอื่น เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ด้วยลักษณะที่เป็นของแข็ง จึงสะดวกต่อการขนส่งและการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันถ่านหินถูกใช้ผลิตไฟฟ้าคิดเป็นประมาณร้อยละ 40 ของการผลิตไฟฟ้าทั่วโลก อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลรวมถึงถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้าก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดความกังวลด้านภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ ยังอาจมีสารปนเปื้อนจากโลหะหนัก เช่น ไอปรอท เป็นต้น (สมชาย พุ่มอิม และ เฉลิมเกียรติ ปลาทอง, 2543) และการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นในทุก ๆ วัน ปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อนที่เกี่ยวข้องนั้นเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หลายประการ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเกษตร การขนส่ง และกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้น เชื้อเพลิงสีเขียวทางเลือกอื่น ๆ เช่น ชีวมวล จึงได้รับความสนใจมากขึ้น U.S. Energy Information Administration (EIA) คาดการณ์ว่าการใช้ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในอนาคตอันใกล้ โดยพบว่าการใช้ชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 3,851 ล้านล้านบีทียู

(trillion Btu) ในปี 2008 เป็น 4,765 ล้านล้านปีเทียม ในปี 2016 ซึ่งในจำนวนนี้ 4,262 ล้านล้านปีเทียม มาจากไม้และเชื้อเพลิงชีวภาพ (U.S. Energy Information Administration, 2018)

การใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น ลม น้ำ แสงอาทิตย์ และชีวมวลได้รับความสนใจ โดยเฉพาะ เชื้อเพลิงอัดแท่งที่เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่ง (Yoddamnern & Yotwinyuwong, 2020) เชื้อเพลิงชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งมีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ถ่านอัดแท่ง (Briquette fuel) จัดเป็นหนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้พลังงานสูง เผาไหม้ได้นาน และปล่อยควันน้อย เหมาะสำหรับการใช้งานทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (Sotannde et al., 2010) โดยที่พืชเศรษฐกิจประเภทมันสำปะหลังภายหลังกระบวนการเพาะปลูก เก็บเกี่ยวและแปรรูป มักก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งในส่วนที่เกิดจากกระบวนการปอกหัวมัน นั่นคือ เปลือก (Peels) และส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูก เช่น ลำต้น (Stalk) และเหง้า (Rhizome) โดยเหง้าเป็นส่วนของลำต้นแข็งที่ติดกับหัวมันสด ซึ่งทั้งสามส่วนนี้ไม่สามารถใช้ประโยชน์หรือแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้ (จารุณี เข้มพิลาค์ และ ภูมิรินทร์ คงโต, 2565) เกษตรกรจึงมักทิ้งลำต้นและเหง้าไว้ในพื้นที่ปลูกและเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ แต่เหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบถ่านเนื่องจากมีเนื้อแข็งและค่าความร้อนสูง ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังแห้งมีค่าความร้อนระหว่าง 18.5 ถึง 23.7 MJ/kg (Jongpluempiti & Tangchaichit, 2012) ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับถ่านอัดแท่งจากวัสดุชนิดอื่น ๆ ในเงื่อนไขเดียวกันและเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกัน เช่น ผงถ่านไม้ 28.88 MJ/kg กะลามะพร้าว 25.5 MJ/kg ช้างข้าวโพด 21.8 MJ/kg แกลบ 17.4 MJ/kg และใบสะเดาแห้ง 12.68 MJ/kg (Auntaisong & Maneechot, 2019) กระบวนการไพโรไลซิสคือการแปลงชีวมวลเป็นถ่านโดยการให้ความร้อนในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ (Bernardes et al., 2023) และถ่านนี้สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งได้ อีกหนึ่งวัสดุเหลือทิ้งที่น่าสนใจคือ กลีเซอริน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Srimoon et al., 2014) แม้ว่ากลีเซอรินจะมีค่าความร้อนที่สูง เนื่องจากกลีเซอรินมีคุณสมบัติเป็นน้ำมันและเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก อยู่ในสภาพของเหลวที่สามารถเผาไหม้ได้ แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ การนำกลีเซอรินมาผสมกับวัสดุชีวมวลเพื่อเพิ่มค่าความร้อนและปรับปรุงสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง จึงเป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐกิจ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ายังขาดการวิจัยเกี่ยวกับถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกับกลีเซอริน ซึ่งการผสมกลีเซอรินนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งให้เพิ่มสูงขึ้นได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อน รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้และมลพิษจากการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งถูกนำมาผสมกับกลีเซอรินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและความดันในการกดอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่งที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยในการกำหนดอัตราส่วนผสมและ

ความดันในการกดอัดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก ช่วยในการพัฒนาและเสริมสร้างเทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่งจาก ชีวมวลเพื่อประโยชน์ทั้งด้านเศรษฐกิจ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือรวมถึงวิธีการอัดแท่งถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังที่มี การใช้กลีเซอรินเป็นส่วนผสม

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนของกลีเซอรินและความดันกดอัดของถ่านอัดแท่งที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และค่ามลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การวิจัยครั้งนี้เป็นเชิงการทดลองโดยศึกษาตัวแปรต้น 2 ตัวแปรคือ อัตราส่วนผสมของผงถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน และความดันในการกดอัดถ่านอัดแท่ง ในส่วนของตัวแปรตามที่ต้องการศึกษามีดังนี้ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกด ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน

1.3.2 เหง้ามันสำปะหลังที่ใช้อยู่ในพื้นที่บ้านหนองตบเต่า ตำบลป่าปอ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น

1.3.3 ถ่านเหง้ามันสำปะหลังถูกบดและร่อนถ่านผ่านตะแกรงเบอร์ 30 mesh

1.3.4 แป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นตัวยึดประสาน ทรายปลาไทย 5 ดาว

1.3.5 น้ำมันพืชที่ใช้ในการสกัดไบโอดีเซล น้ำมันปาล์ม ทรายโบนัส ที่ผ่านการทอดมะม่วงแล้ว

1.3.6 สารละลายประกอบด้วยเมทานอล (Methyl Alcohol 100 %) ทราย SENSE และมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟแบบเกล็ด ทราย SW เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปถ่านทำงานแบบงวด (Batch type) โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน เป็นต้นกำลังในการอัด

1.3.8 ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ในการเก็บข้อมูลโดยใช้ Sensor MAX6675 ต่อกับ Thermocouple Type K ค่าความผิดพลาดรวมจะอยู่ประมาณ ± 2 ถึง ± 4 °C เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ และใช้ Load Cell ขนาด 3 kg รูปแบบ Straight Bar with Hook ร่วมกับ HX711 Module ในการชั่งมวลของเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องระหว่างการเผาไหม้

1.3.9 ให้อากาศในห้องเผาไหม้โดยพัดลมหอยโข่ง (Blower) ปรับรอบได้ 12 V DC โดยวัดความเร็วลมจากเครื่อง UNI-T UT363 Mini Digital Anemometer

1.3.10 ใช้ตู้อบลมร้อน แบบมีพัดลม รุ่น UF110 ยี่ห้อ MEMMERT

- 1.3.11 ภาพถ่ายความร้อน จากเครื่อง UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager
- 1.3.12 ใช้เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine; UTM) TTR/THAI Model MUL-125 ขนาด 100 kN
- 1.3.13 วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่อง Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG
- 1.3.14 การวัดค่ามลพิษโดยใช้เครื่องทดสอบมลพิษ Testo 350 โดยศึกษา CO, NO_x, SO₂, O₂ และ CO₂
- 1.3.15 มาตรฐานการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวล ตามข้อกำหนดของ Directive (EU) 2015/2193 และ Commission Regulation (EU) 2015/1185
- 1.3.16 วิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิง ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด ค่าพลังงานความร้อน อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- 1.3.17 มาตรฐานคุณสมบัติเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง โดยอ้างอิง มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 มาตรฐาน DIN EN ISO 17225-3 มาตรฐาน ISO 17225-1:2021 รวมถึงงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.18 งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมทางสถิติ IBM SPSS Statistics และ Minitab Statistical Software ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยทั้งหมดวิเคราะห์ที่ความเชื่อมั่น 95 %
- 1.3.19 ใช้โปรแกรม SolidWorks ในการออกแบบชิ้นรูป รวมถึงจัดทำแบบทางวิศวกรรม (Drawing)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เครื่องผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งและสามารถขึ้นรูปถ่านอัดแท่งแห้งมันสำปะหลังได้โดยแข็งแรงไม่แตกไม่หักง่าย
- 1.4.2 ทราบถึงสมบัติต่าง ๆ รวมถึงพฤติกรรมการเผาไหม้และมลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน
- 1.4.3 ทราบถึงสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน
- 1.4.4 ทราบอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของการเพิ่มขึ้นของกลีเซอรินรวมไปถึงความดันในการกดอัดที่ดีที่สุดสำหรับเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง
- 1.4.5 เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินที่ศึกษาสามารถผ่านมาตรฐานทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนรวมถึงมลพิษจากการเผาไหม้
- 1.4.6 สามารถเพิ่มมูลค่ากลีเซอรินที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

- 1.4.7 สามารถนำของเสียจากวัสดุทางการเกษตรกรรมมาเปลี่ยนเป็นถ่านชีวมวลและเพิ่มมูลค่า
- 1.4.8 สามารถลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลรวมไปถึงลดภาวะโลกร้อน



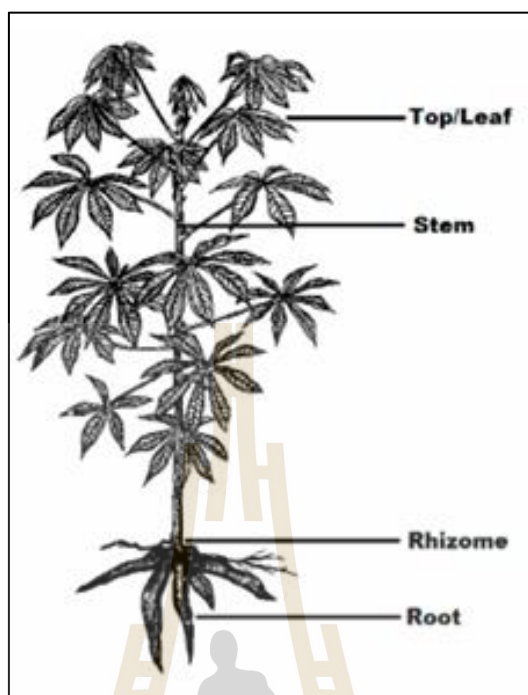
บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับถ่านห้้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินที่นำมาใช้ในงานวิจัย โดยครอบคลุมถึงทฤษฎีและการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านอัดแท่ง ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 เหง้ามันสำปะหลัง (Cassava rhizome)

มันสำปะหลังเป็นพืชในตระกูล Euphorbiaceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculentacrantz* มีชื่อทางการค้าว่า Cassava หรือ Tapioca มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ทางทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาได้ขยายไปสู่แหล่งอื่น ๆ ของโลก สำหรับประเทศไทยมีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกที่ภาคใต้เป็นครั้งแรกเพื่อใช้ทำแป้งและสาคุ ต่อมาได้ขยายพื้นที่ปลูกมายังภาคตะวันออก ได้แก่ ชลบุรี ระยอง และจังหวัดใกล้เคียง เนื่องจากมีสภาพดิน ฟ้า อากาศ และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก ดังนั้นจึงได้มีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วไปสู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้กลายเป็นแหล่งปลูกที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทยเหง้า (Rhizome) โดยเหง้าเป็นส่วนของลำต้นแข็งที่ติดกับหัวมันสด ส่วนนี้ไม่สามารถใช้ประโยชน์หรือแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้ เกษตรกรจึงมักทิ้งลำต้นและเหง้าไว้ในพื้นที่ปลูกและเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ (จารุณี เข้มพิลาค์ และ ภูมินทร์ คงโต, 2565) โดยเหง้ามันสำปะหลังแสดงดังรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลผลิตมันสำปะหลังในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2559 ถึง 2562 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณรวมทั้งประเทศประมาณ 30.89 ล้านตัน โดยมี สัดส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (Residue to Product Ratio, RPR) ของ เปลือก ลำต้น และเหง้ามันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 0.25, 0.062 และ 0.112 ตามลำดับ (Pattiya, 2011)



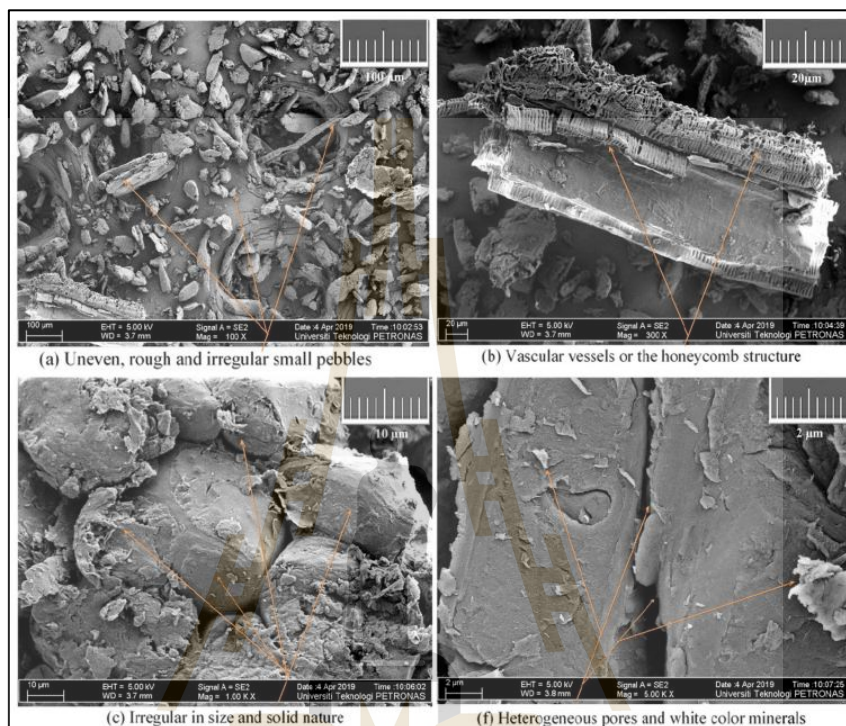
รูปที่ 2.1 เหง้ามันสำปะหลัง (Tippayawong et al., 2017)

อีกทั้งยังเกิดปัญหาขณะกักเก็บเหง้ามันสำปะหลังไว้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จึงนิยมปรับปรุงคุณภาพหรือเปลี่ยนรูป เช่น การนำมาผลิตถ่านอัดแท่งใช้แทนฟืนในระดับครัวเรือน ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังแห้งมีค่าความร้อนระหว่าง 18.5 ถึง 23.7 MJ/kg (Jongpluempiti & Tangchaichit, 2012) และเชื้อเพลิงถ่านหินมีค่าความร้อนอยู่ที่ 25.9 MJ/kg (Potip & Wongwuttanasatian, 2018) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังแห้งนั้นมีค่าสูง สามารถใช้แทนเชื้อเพลิงถ่านหินได้

2.2 ถ่านชีวมวล (Biomass charcoal)

ถ่านชีวมวล เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุอินทรีย์ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน (Basu, 2010) หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิค่อนข้างต่ำในการผลิต คืออยู่ในช่วงประมาณ 300 ถึง 700 °C ซึ่งแตกต่างจากถ่านประเภทอื่นที่มักใช้ความร้อนสูงกว่า 700 °C เช่น ถ่านที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใช้ดูดกลิ่นและกรองน้ำ เนื่องจาก การเผาที่อุณหภูมิต่ำและไม่มีออกซิเจนนี้ ถ่านชีวมวลจึงสามารถผลิตได้อย่างสะอาด และปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาน้อยมาก ซึ่งมีส่วนช่วยลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน โครงสร้างของถ่านชีวมวล มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยคาร์บอนเหล่านี้จะจัดเรียงตัวในลักษณะของสารประกอบแอโรมาติกที่เชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย มีลักษณะเป็นรูพรุนแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของถ่านชนิดนี้ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยธาตุต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ รวมถึงซีเถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตาม สัดส่วน

ขององค์ประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบ รวมถึงปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น ประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ อุณหภูมิในการโพรไลซิส และระยะเวลาที่ใช้ในการเผา เป็นต้น (Yerima & Grema, 2018)

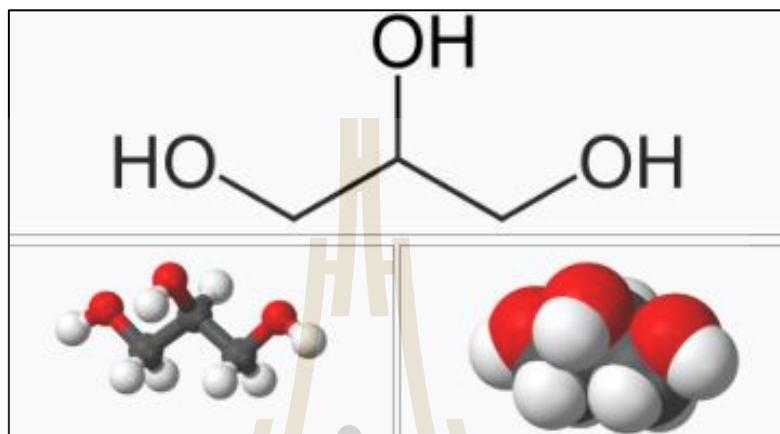


รูปที่ 2.2 พื้นผิวและความหนาแน่นของถ่านชีวมวล (Ahmad et al., 2022)

2.3 กลีเซอริน (Glycerin)

กลีเซอรอล หรือที่มักเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอริน (Glycerin) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกคำว่า Glykys ซึ่งมีความหมายว่า หวาน สารชนิดนี้มีลักษณะเป็นของเหลวใส ความหนืดสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่เป็นพิษ เมื่อสัมผัสจะรู้สึกได้ถึงรสหวานเล็กน้อย เป็นผลพลอยได้หลักจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oils) เพื่อผลิต ไบโอดีเซล (Biodiesel) และในปัจจุบันกลีเซอรินได้รับความสนใจจากงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งหาแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียปริมาณมากนี้ โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้น้ำมันทำปฏิกิริยากับเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Steinmetz et al., 2013) กลีเซอรินจัดอยู่ในกลุ่มของแอลกอฮอล์หลายหมู่ หรือที่เรียกว่า โพลีไฮดรริกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) โดยมีสูตรโมเลกุลคือ $C_3H_8O_3$ น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 92.09 g/mol ชื่อทางเคมีของกลีเซอรินคือ 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-propanetriol) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างโมเลกุลจะพบว่า ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ โดยในจำนวนนั้น 2 หมู่เป็นไฮดรอกซิลปฐมภูมิ และอีก 1 หมู่เป็นไฮดรอกซิลทุติยภูมิ โดยโครงสร้างของกลีเซอรินแสดงดังรูป

ที่ 2.3 ซึ่งลักษณะทางโครงสร้างนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กลีเซอรินสามารถละลายน้ำได้ดี (ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2558) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการเช่น ความหนืดสูง 1 Pa·s ที่ 298 K, อุณหภูมิจุดติด 643 K และ ค่าความร้อนต่ำสูงถึง 15 ถึง 27 MJ/kg (Bohon et al., 2011)

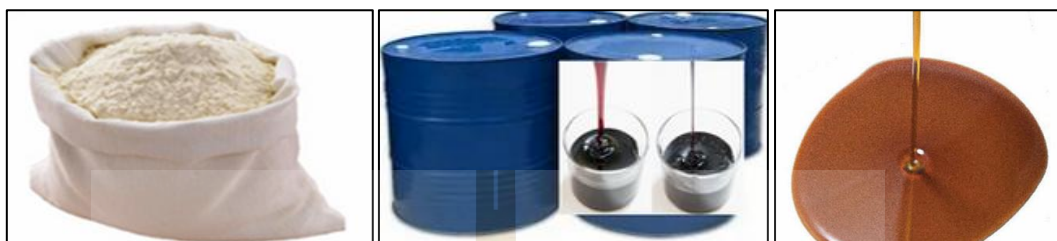


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกลีเซอริน (ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร, 2558)

2.4 ตัวยึดประสานถ่านอัดแท่ง (Binder for briquette)

การใช้ตัวยึดประสาน (Binder) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณภาพของถ่านอัดแท่ง ทั้งในมิติของความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) การคงรูปขณะจัดเก็บและขนย้าย (Handling) และสมบัติการเผาไหม้ (Combustion characteristics) ซึ่งรวมถึงค่าพลังงานที่ปลดปล่อยและการปล่อยมลพิษขณะเผา (Obi et al., 2022) งานวิจัยเชิงทดลองและงานทบทวนหลายฉบับสรุปว่าตัวยึดประสานที่นิยมใช้มีทั้งชนิดที่มาจากแหล่งพืช เช่น แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) และแป้งข้าวโพด (Corn starch) ตลอดจนตัวยึดจากของเหลือเชิงอุตสาหกรรม เช่น กลีเซอรินดิบ (Crude glycerin) และกากน้ำตาล (Molasses) ซึ่งแต่ละชนิดมีผลต่างกันต่อ ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด อัตราการเผาไหม้ และ ค่าความร้อน (Aransiola et al., 2019; Borowski et al., 2017; Ezéchiél et al., 2022) การใช้ แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) เป็นตัวยึดประสานนิยมแพร่หลายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากหาง่าย ราคาถูก และให้แรงยึดเกาะดี ซึ่งงานทดลองหลายชิ้นระบุว่าแป้งมันช่วยเพิ่ม Compressive strength และความคงรูปเมื่อใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสม (Borowski et al., 2017; Aransiola et al., 2019) การใช้แป้งข้าวโพด (Corn starch) เป็นตัวยึดประสานให้ความหนืดสูงและมักถูกเลือกเมื่อจำเป็นต้องการแรงยึดเกาะแบบเฉพา (Aransiola et al., 2019) กลีเซอริน (Crude glycerin) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมไบโอดีเซล ผลการศึกษาพบว่าเมื่อนำมาผสมกับถ่านอัดแท่งสามารถเพิ่มค่าความร้อน (Heating value) และเปลี่ยนลักษณะการเผาไหม้ แต่ก็ต้องระมัดระวังปัญหาการเกิดเถ้าและการปล่อยมลพิษบางชนิดขณะเผา (Steinmetz et al., 2013) และกากน้ำตาล (Molasses) เป็นตัวยึดที่ทำให้อัดตัวได้ดีและให้แรงยึดเกาะสูง แต่หากใช้เกินพอดีอาจเพิ่มความชื้นและปริมาณเถ้า ซึ่งทำให้ค่า

พลังงานโดยรวมลดลงได้ (Obi et al., 2022) โดยที่แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล และกลีเซอริน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล และกลีเซอริน (ตามลำดับ)

(Masse et al., 2023; Potip & Wongwuttanasatian, 2018)

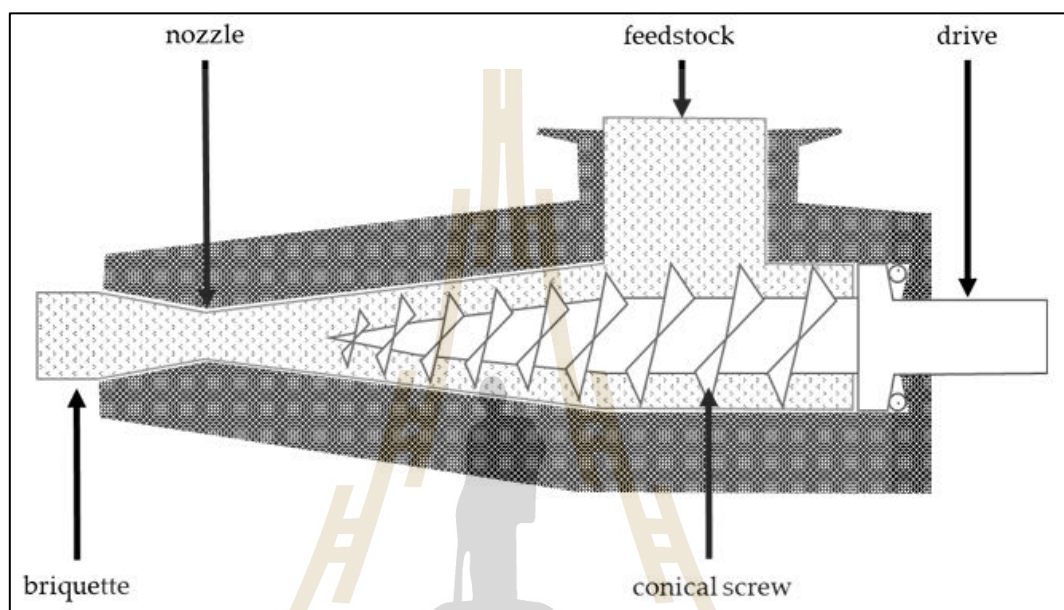
2.5 วิธีการอัดถ่านอัดแท่ง (Briquette production)

การอัดถ่านอัดแท่งเป็นกระบวนการสำคัญในการเพิ่มมูลค่าของวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ชี้เลื่อย เศษไม้ และเปลือกพืช โดยการอัดให้เป็นแท่งหรือก้อนที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถเผาไหม้ได้นานและให้ค่าความร้อนสูงกว่าเดิม การอัดถ่านมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบและระดับการผลิต ได้แก่ อัดแบบสกรู อัดแบบลูกสูบกลเชิงกล อัดแบบลูกสูบระบบไฮดรอลิก อัดแบบลูกกลิ้ง และอัดแบบมือ ซึ่งแต่ละวิธีมีหลักการทำงาน ข้อดี และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน (Kpalo et al., 2020)

2.5.1 การอัดแบบสกรู (Screw press extruder)

เครื่องอัดแบบสกรู (Screw press) ประกอบด้วยสกรูอัด (Screw extruder) และแม่พิมพ์ (Die) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเครื่องอัดสกรูแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องอัดสกรูทรงกรวย (Conical screw press) เครื่องอัดสกรูทรงกระบอกที่มีแม่พิมพ์ให้ความร้อน (Cylindrical screw press with heated die) และเครื่องอัดสกรูทรงกระบอกที่ไม่มีการให้ความร้อนจากภายนอก (Without externally heated die) ภายในเครื่องอัดสกรู วัสดุชีวมวลหรือถ่านชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่สกรูอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะผลักวัสดุเข้าสู่แม่พิมพ์ทรงกระบอกที่ให้ความร้อนจนถึงจุดที่ลิกนิน (Lignin) เริ่มหลอมเหลว (Eriksson & Prior, 1990) เทคโนโลยีนี้อาศัยความดันจากสกรูพิเศษที่ดันวัตถุดิบเข้าไปในห้องที่ค่อย ๆ แคบลง (Solano et al., 2016) ความดันจะค่อย ๆ สร้างขึ้นตามแนวของสกรู ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจุดเดียวเหมือนในเครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston press) ในการอัดด้วยสกรู มักไม่จำเป็นต้องใช้ตัวยึดประสาน (Binder) อย่างไรก็ตาม อาจต้องใช้ตัวยึดประสานในกรณีที่อุณหภูมิที่ใช้อัด ไม่สามารถละลายลิกนินได้ หรือในกรณีที่ชีวมวลผ่านการคาร์บอนไนซ์ (Carbonized) ซึ่งทำให้ลิกนินถูกทำลาย เครื่องอัดสกรูมีต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าเครื่องอัดแบบลูกสูบ แต่มีต้นทุนการบำรุงรักษาสูงกว่า เนื่องจากสกรูสึกหรอมากและต้องมีการซ่อมแซมเป็นประจำ อีกทั้งยังใช้พลังงานจำเพาะสูงกว่า เครื่องอัดสกรูถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกเพื่ออัดขี้เลื่อย (Sawdust) แต่จากข้อมูลภาคสนามพบว่า เครื่องนี้สามารถใช้กับแกลบ (Rice husk) ได้ดีเช่นกัน แม้จะมีปัญหาการสึกหรอสูง (Eriksson

& Prior, 1990) ถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเครื่องอัดสกรูมักมีรูตรงกลาง (Concentric hole) ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติการเผาไหม้ให้ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า อีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอ จุดไฟได้ง่าย เผาไหม้รวดเร็ว และไม่แตกหักง่าย โดยทั่วไป ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งจากเครื่องอัดสกรูอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 1,400 kg/m³ (Grover & Mishra, 1996)

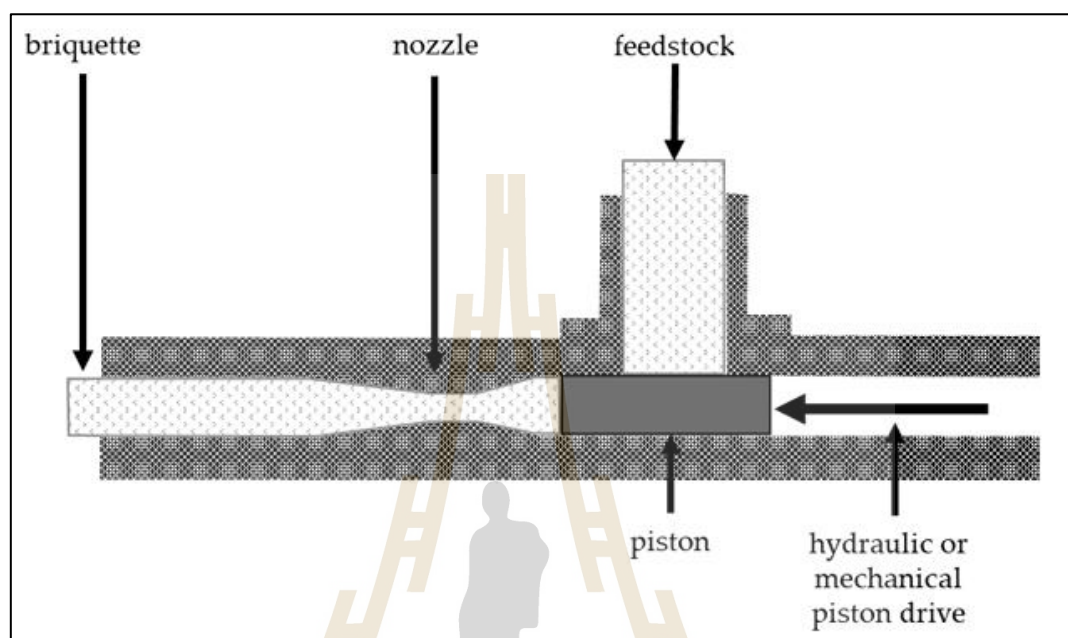


รูปที่ 2.5 อัดแบบสกรู (Christoforou & Fokaides, 2019)

2.5.2 การอัดแบบลูกสูบกลเชิงกล (Mechanical piston press)

เครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกล (Mechanical piston press) ประกอบด้วยลูกสูบ (Ram หรือ Piston) และแม่พิมพ์ (Die) โดยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 วัสดุชีวมวลหรือถ่านชีวมวลจะถูกลูกสูบกระแทกเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยแรงอัดสูงมากเพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่ง เครื่องชนิดนี้สร้างแรงอัดได้ประมาณ 196.1 MPa (Tumuluru et al., 2011) และมักใช้ในระดับการผลิตขนาดใหญ่ ตั้งแต่ 200 ถึง 2,500 kg/h โดยมีความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 1,200 kg/m³ (Solano et al., 2016) กำลังการผลิตของเครื่องอัดแบบลูกสูบขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่สามารถป้อนเข้าสู่ด้านหน้าลูกสูบก่อนแต่ละจังหวะการอัด และจำนวนจังหวะต่อหน่วยเวลา ส่วนกำลังการผลิตตามน้ำหนักขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุก่อนการอัด ความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 15 % โดยช่วงที่เหมาะสมที่สุดคือ 8 ถึง 12 % และค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้คือ 5 % เนื่องจากความชื้นต่ำกว่านี้จะทำให้เกิดแรงเสียดทานและเพิ่มการใช้พลังงาน (Eriksson & Prior, 1990) วัสดุที่สามารถอัดแน่นได้ ได้แก่ ของเสียทางการเกษตร ฝุ่นถ่าน ชี้เลื่อย เศษไม้ เปลือกไม้ เป็นต้น เมื่อเทียบกับเครื่องอัดแบบสกรู เครื่องแบบลูกสูบมีอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่สึกหรอยาวนานกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่า แต่ต้องการการบำรุงรักษามากกว่าและได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพต่ำกว่า

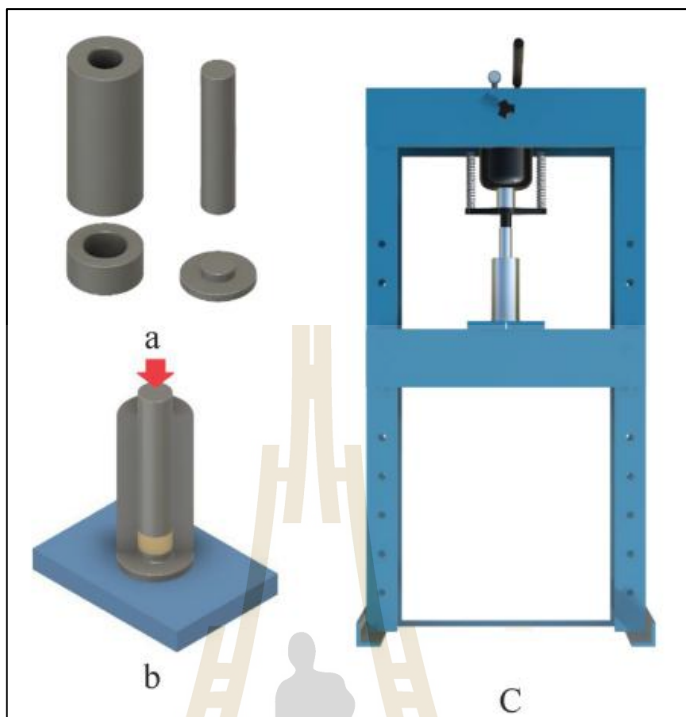
อย่างไรก็ตาม เครื่องชนิดนี้ให้ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) ที่ดีกว่าเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (Tumuluru et al., 2011)



รูปที่ 2.6 อัดแบบลูกสูบกลเชิงกล (Christoforou & Fokaides, 2019)

2.5.3 การอัดแบบลูกสูบระบบไฮดรอลิก (Hydraulic piston press)

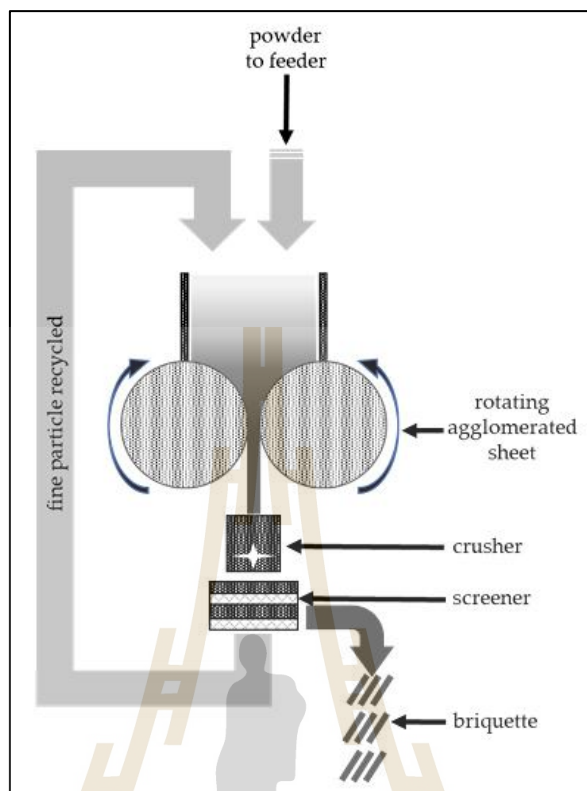
เครื่องอัดแบบลูกสูบไฮดรอลิก (Hydraulic piston press) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำงานในลักษณะเดียวกับเครื่องอัดแบบลูกสูบเชิงกล แต่พลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนลูกสูบจะมาจากกระบอกสูบที่ทำงานด้วยระบบไฮดรอลิก (Eriksson & Prior, 1990) ระบุว่าแรงอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิกมักต่ำกว่าเครื่องแบบเชิงกล เนื่องจากข้อจำกัดของความดันในระบบไฮดรอลิก ซึ่งโดยทั่วไปจำกัดอยู่ที่ประมาณ 30 MPa หัวลูกสูบสามารถสร้างความดันได้สูงขึ้นหากมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ากระบอกไฮดรอลิก แต่ในการใช้งานเชิงพาณิชย์มักเพิ่มความดันได้เพียงเล็กน้อย กำลังการผลิตของเครื่องชนิดนี้อยู่ในช่วงประมาณ 50 ถึง 400 kg/h และสามารถรองรับความชื้นของวัตถุดิบได้สูงกว่า 15 % ซึ่งเป็นค่าที่เครื่องอัดเชิงกลมักทำได้ ถ่านอัดแท่งที่ผลิตโดยทั่วไปมีความหนาแน่นรวมต่ำกว่า 1,000 kg/m³ เนื่องจากความดันที่จำกัด (Tumuluru et al., 2011) อย่างไรก็ตาม ถ่านอัดแท่งที่ผลิตมีรูปทรงและขนาดสม่ำเสมอ โดยทั่วไปอยู่ในลักษณะทรงกระบอกขนาด 40 × 40 mm (Tumuluru et al., 2015) และมีคุณภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องอัดเชิงกล นอกจากนี้ เครื่องอัดไฮดรอลิกยังสามารถใช้แทนเครื่องอัดเชิงกลได้ในบางกรณี วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการอัดด้วยเครื่องชนิดนี้ ได้แก่ กระจาด กระจาดแข็ง มูลสัตว์ เป็นต้น (Eriksson & Prior, 1990)



รูปที่ 2.7 อัดแบบลูกสูบระบบไฮดรอลิก a) Mold parts, b) Mold arrangement and c) Hydraulic press with the mold. (Granado et al., 2020)

2.5.4 การอัดแบบลูกกลิ้ง (Roller press)

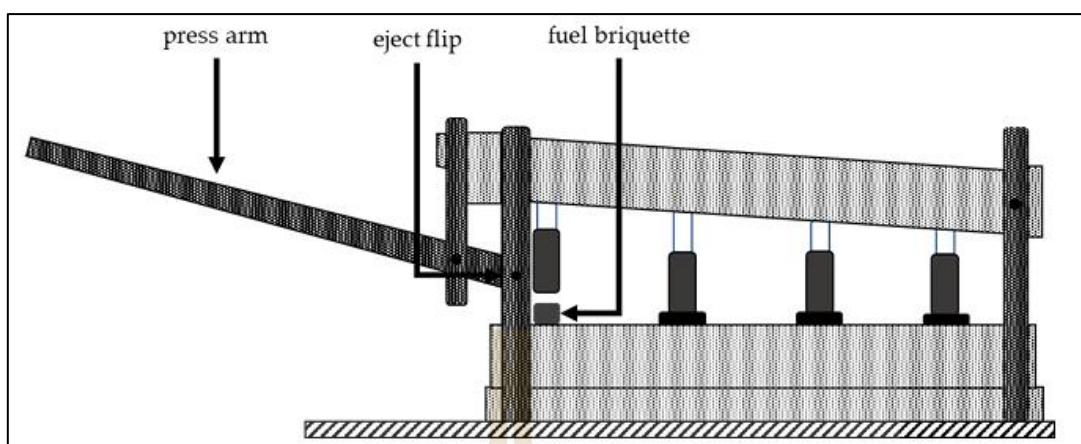
เครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roller press) ถือเป็นเทคโนโลยีมาตรฐานสากลที่ใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่งรูปหมอน (Pillow-shaped briquettes) จากวัสดุชีวมวลหลายประเภท เครื่องอัดชนิดนี้ทำงานตามหลักการของความดันและการเกาะตัวของอนุภาค (Pressure and agglomeration) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยประกอบด้วยลูกกลิ้งทรงกระบอกสองลูกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน หมุนในแนวขนานสวนทางกันบนแกนขนาน (Yehia, 2007) ลูกกลิ้งทั้งสองถูกจัดวางให้มีช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างกัน ซึ่งระยะห่างนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของชีวมวล ขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้น และการเติมตัวยึดประสาน ระหว่างการทำงาน วัตถุดิบจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องอัดและถูกบีบผ่านช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งด้านหนึ่ง จากนั้นจะถูกอัดเข้าแม่พิมพ์จนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง และถูกดันออกมาทางด้านตรงข้าม การผลิตถ่านอัดแท่งให้ได้คุณภาพดีด้วยเทคโนโลยีนี้จำเป็นต้องใช้ลูกกลิ้งคุณภาพสูงที่มีผิวเรียบเนียนซึ่งเป็นบริเวณที่ถ่านอัดแท่งขึ้นรูปได้ดี รูปทรงของถ่านอัดแท่งที่ได้ขึ้นอยู่กับประเภทของลูกกลิ้งหรือแม่พิมพ์ที่ใช้ (Yehia, 2007) โดยทั่วไป ความหนาแน่นรวมของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 450 ถึง 550 kg/m³ (Kaliyan et al., 2009)



รูปที่ 2.8 อัดแบบลูกกลิ้ง (Tumuluru et al., 2011)

2.5.5 การอัดด้วยมือ (Manual press)

มีเครื่องอัดแบบใช้มือหลายประเภทสำหรับการอัดวัสดุชีวมวล บางชนิดเป็นรูปแบบเครื่องอัดลูกสูบหรือสกรูแต่ทำงานด้วยมือแทนการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องอัดแบบใช้มือถูกออกแบบมาเพื่อการทำถ่านอัดแท่งหรือปรับมาจากอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วสำหรับวัตถุประสงค์อื่น (Maninder et al., 2012) ตัวอย่างที่ดีคือเครื่องอัดอิฐดินเหนียวแบบใช้มือ ซึ่งสามารถทำถ่านอัดแท่งจากวัสดุชีวมวลทั้งที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์และไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ได้ อีกตัวอย่างที่พบได้บ่อยคือ WU-Presser ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา (Legacy Foundation, 2003) เครื่องอัดนี้ทำจากโลหะและไม้ โดยไม้เป็นวัสดุที่ใช้กันมากที่สุด เครื่องจักรเหล่านี้ทำงานด้วยแรงกดเพียงเล็กน้อยและต้องเติมตัวยึดประสานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เครื่องอัดแบบใช้มือมีลักษณะเด่นคือมีต้นทุนการลงทุนต่ำ ต้นทุนการดำเนินงานต่ำ และไม่ต้องใช้ทักษะสูงในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม กำลังการผลิตต่ำเพียงประมาณ 5 kg/h (Kristoferson & Bokalders, 1986)



รูปที่ 2.9 อัดแบบมือ (Legacy Foundation, 2003)

2.5.6 ถ่านอัดแท่ง (Briquetted charcoal)

ถ่านอัดแท่ง (Briquetted charcoal) เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากวัสดุชีวมวลหรือถ่านชีวมวลบดละเอียด นำมาอัดแน่นด้วยความดันร่วมกับตัวประสานเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงและขนาดสม่ำเสมอ ถ่านอัดแท่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากให้ค่าความร้อนสูง เผาไหม้ได้นาน คว้นและเก็บน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ถ่านไม้ธรรมชาติ (Kpalo et al., 2020) อีกทั้งยังเป็นแนวทางสำคัญในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย กะลามะพร้าว และเห้งมันสำปะหลัง ซึ่งช่วยลดปัญหาขยะอินทรีย์และส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน (Grover & Mishra, 1996; Sotannde et al., 2010) กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งมักประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ การบดละเอียด การผสมตัวประสาน การอัดแท่ง และการอบแห้ง โดยคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อัตราส่วนผสม ตัวประสานที่ใช้ รวมถึงแรงอัดที่ใช้ในการผลิต (Maninder et al., 2012) ดังนั้น การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตจึงมีความสำคัญเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

Frank and Akhihero (2013) ได้ผลิตถ่านอัดแท่งโดยใช้ผักตบชวาและมูลวัวในอัตราส่วน 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 จากตัวอย่างที่เตรียมไว้ พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีสัดส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว เท่ากับ 70:30 และ 80:20 มีค่าความหนาแน่นสูงกว่า คือ 1,157 และ 1,296 kg/m³ ตามลำดับ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังรายงานว่า ปริมาณความชื้น ความคงตัว ความทนต่อน้ำและความทนทาน เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพของถ่านอัดแท่ง

Bamgboye and Bolufawi (2009) ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเศษพืชข้าวฟ่าง (Guinea corn residue) โดยใช้แป้งมันิลเลจ (Starch mutillage) เป็นตัวประสาน โดยเตรียมตัวอย่างถ่านอัดแท่งจากเศษข้าวฟ่างที่มีความชื้น 9.08 % และเลือกใช้ขนาดอนุภาค 3 ระดับ คือ 4.7, 1.7 และ 0.6 mm ทั้งนี้ได้ใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่มีแม่พิมพ์ทรงกระบอก ภายใต้ความดัน 7.5, 8.5 และ 10.5 MPa จากผลการทดลองพบว่า ถ่านอัดแท่งที่มี

ขนาดอนุภาค 4.7 และ 0.6 mm แสดงค่าความหนาแน่นหลังการคลายตัว (Relaxation density) และความคงตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับขนาดอื่น ๆ

Davies and Davies (2013) ได้ศึกษาศักยภาพของผักตบชวาและคราบแพลงก์ตอนพืช ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำ ในการใช้เป็นตัวประสานสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิง โดยได้ประเมินสมบัติทางกายภาพและสมบัติการเผาไหม้หลายประการ ผักตบชวาที่บดละเอียดและตัวประสาน (คราบแพลงก์ตอนพืช) ถูกนำมาผสมในสัดส่วนร้อยละ 10 (B1), 20 (B2), 30 (B3), 40 (B4) และ 50 (B5) โดยคำนวณตามน้ำหนักของวัตถุดิบแต่ละชนิด จากนั้นจึงอัดในแม่พิมพ์ทรงกระบอกเหล็กที่มีความสูง 14.3 cm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm ด้วยแรงอัด 20 MPa เป็นเวลา 45 วินาที ผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของตัวประสานที่เพิ่มขึ้น โดยคราบแพลงก์ตอนพืชช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงทางกลของถ่านอัดแท่ง ผู้วิจัยสรุปว่าการผลิตถ่านอัดแท่งจากผักตบชวานั้นสามารถทำได้จริง มีต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถแข่งขันได้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่น ๆ

Chin and Siddiqui (2000) ศึกษาวัสดุชีวมวล ได้แก่ ชี้อเลื่อย แกลบ เมล็ดถั่วลิสง เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยจากผลปาล์ม ถูกอัดแน่นเป็นถ่านอัดแท่งภายใต้ความดันปานกลาง 5 ถึง 7 MPa โดยใช้เครื่องอัดแบบลูกสูบและแม่พิมพ์ทรงกระบอก ถ่านอัดแท่งเหล่านี้ถูกทดสอบเพื่อประเมินพฤติกรรมการคลายตัว ความแข็งแรงทางกล และสมบัติการเผาไหม้ พบว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากชี้อเลื่อยมีสมบัติโดยรวมที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ถ่านอัดแท่งจากวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดต้องการเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมแตกต่างกัน และโดยทั่วไปแสดงศักยภาพที่ดีสำหรับการพัฒนาต่อไป

Sharma et al. (2006) ศึกษาผลของชนิดวัสดุและความเข้มข้นของตัวประสานต่อคุณภาพการเก็บรักษาและการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากชีวมวล โดยถ่านอัดแท่งถูกผลิตจากใบไม้ ชี้อเลื่อย และฟางข้าวสาลี ใช้วัสดุตัวประสานสองชนิด ได้แก่ กากน้ำตาลและโซเดียมซัลเฟต ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าค่าพลังงานความร้อน (Heating value) สูงกว่าสำหรับถ่านอัดแท่งที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานเมื่อเทียบกับถ่านอัดแท่งที่ใช้โซเดียมซัลเฟต ความหนาแน่นรวมสูงสุดของถ่านอัดแท่งอยู่ที่ 954 kg/m^3 ทั้งความหนาแน่นรวมและค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งลดลงเมื่อเก็บไว้นานขึ้น โดยพบว่าความหนาแน่นรวมลดลงประมาณ 11 % และค่าพลังงานความร้อนลดลงประมาณ 5 % อย่างไรก็ตาม ถ่านอัดแท่งทั้งหมดยังคงมีความคงตัวได้ดีเมื่อเก็บรักษานานถึง 2 month

Shekh et al. (2023) ศึกษาถ่านอัดแท่งจากใบไม้แห้ง ฟางข้าว และหญ้าแห้ง ถูกผลิตโดยใช้แปรงเป็นตัวประสาน ผ่านเครื่องอัดแบบสกรูที่พัฒนาขึ้นในประเทศสเปน สมบัติของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ถูกประเมินด้วยการวิเคราะห์เชิงใกล้เคียง (proximate analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงลึก (Ultimate analysis) สมบัติด้านเชื้อเพลิง เช่น ค่าพลังงานความร้อน และการวิเคราะห์มลพิษ ผลการทดลองพบว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากใบไม้แห้งมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุด

16.70 $\pm$ 0.14 MJ/kg เมื่อเทียบกับถ่านจากฟางข้าว 14.46 $\pm$ 0.28 MJ/kg และหญ้าแห้ง 14.74 $\pm$ 0.23 MJ/kg ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการทำอาหารและการให้ความร้อนอื่น ๆ

Rath et al. (2023) ได้ศึกษาชีวมวลสามชนิด ได้แก่ ชี้อ้อย กากอ้อย และถ่านไม้ ถูกใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่ง โดยใช้แป้งสาลีเป็นตัวประสาน แป้งสาลีถูกนำมาใช้ในสามความเข้มข้นตามปริมาตร คือ 10 %, 15 % และ 20 % เพื่อผลิตถ่านอัดแท่ง สมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งเหล่านี้ เช่น กำลังอัด ความแข็ง และปริมาณความชื้น ถูกนำมาวิเคราะห์ ปริมาณความชื้นของถ่านอัดแท่งอยู่ในช่วง 4 ถึง 27 % ถ่านอัดแท่งมีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 2.5 N/mm² โดยถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากชี้อ้อยและมีตัวประสาน 20 % มีค่ากำลังอัดสูงสุด 2.561 N/mm² จากการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell พบว่าความแข็งของถ่านอัดแท่งอยู่ระหว่าง 36 ถึง 68 HRB โดยความแข็งสูงสุดพบในถ่านอัดแท่งจากกากอ้อยที่ใช้ตัวประสาน 20 % ถ่านอัดแท่งที่ผลิตขึ้นมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการขนส่งและการเผาไหม้ สามารถนำไปใช้แทนไม้และแหล่งเชื้อเพลิงแข็งอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Mitchell et al. (2020) ได้ทำการประเมินการปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งเศษเหลือจากการเกษตรเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ รวมทั้งถ่านอัดแท่งไม้เชิงพาณิชย์ โดยใช้งานในเตาให้ความร้อนขนาด 5 กิโลวัตต์สำหรับครัวเรือน วัสดุฟางประเภทอื่น ๆ เช่น กากอ้อย และหญ้าไม้ฟาง (Miscanthus) ก็ถูกนำมาศึกษาด้วยเช่นกัน พฤติกรรมของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านอัดแท่ง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเลือกชนิดเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซ ไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (Fuel-N) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการปล่อย NO_x และเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ศึกษาอยู่ต่ำกว่าขีดจำกัดการปล่อย NO_x ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป แม้ว่าเศษเหลือจากการเกษตรอาจมี คลอไรด์ (Cl) และซัลเฟอร์ (S) ในปริมาณสูง แต่มีหลักฐานว่ามีการจับ HCl และ SO₂ ในสถานที่จริงโดยเกลือแคลเซียมในเถ้าเชื้อเพลิง การปล่อยฝุ่นละอองมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิง แต่ก็ได้รับอิทธิพลจากคุณภาพและความคงทนของถ่านอัดแท่งด้วยโดยรวมแล้ว ถ่านอัดแท่งมีประสิทธิภาพดีเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนไม้ และแม้ว่าการปล่อยก๊าซจะได้รับอิทธิพลจากชนิดเชื้อเพลิง แต่ถ่านอัดแท่งที่ผลิตโดยกระบวนการที่เหมาะสมสามารถปล่อยก๊าซน้อยกว่าท่อนไม้ได้

Li et al. (2023) ได้ทำการทดลองถ่านอัดแท่งชีวมวลชนิดใหม่ (Bio-coal briquette) ซึ่งผลิตจากการผสมระหว่างถ่านบิโวมินัสและชีวมวล เพื่อตรวจสอบสมรรถนะและการปล่อยมลพิษ โดยถ่านอัดแท่งชีวมวลสามชนิดถูกผลิตขึ้นจากการผสมถ่านบิโวมินัสกับฟางข้าวโพด น้ำเสียตะกอน (Sewage sludge) และมูลวัว ตามลำดับ การทดสอบแบบ Thermogravimetric (TG) สมรรถนะการเผาไหม้ และตัวบ่งชี้การปล่อยมลพิษ (Emission Factors, EFs) ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับถ่านบิโวมินัสบริสุทธิ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งชีวมวลติดไฟและเผาไหม้ง่ายกว่าถ่านหิน ทั้งประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ปรับปรุงแล้ว (Modified Combustion Efficiency, MCE) และอัตราการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งชีวมวลสูงกว่าถ่านบิโวมินัสอย่างมาก การ

ปล่อยก๊าซ CO_2 และ CH_4 ของถ่านอัดแท่งชีวมวลทั้งสามชนิดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับถ่านบิโทมินัส โดย EFs ของ CO_2 และ CH_4 ลดลงประมาณ 31 ถึง 47 % และ 41 ถึง 51 % ตามลำดับ การลดลงในมลพิษทางอากาศทั่วไป เช่น CO และ NO ก็พบในถ่านอัดแท่งชีวมวลเช่นกัน ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งชีวมวลอาจเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สะอาดและมีศักยภาพสูง หากได้รับการยืนยันเพิ่มเติมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนามจริง ซึ่งสามารถสร้างประโยชน์ร่วมอย่างมีนัยสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้คนในพื้นที่ชนบท

ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และ ชารินี มหายศนันท์ (2548) ศึกษาการอัดถ่านเห้งมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก จากการศึกษาการอัดถ่านด้วยเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกที่สร้างขึ้นด้วย วัตถุประสงค์เพื่อให้เหมาะสมกับเกษตรกรรายย่อย และการผลิตถ่านอัดแท่งในระดับครัวเรือน พบว่า การอัดแท่งถ่านเห้งมันสำปะหลังนั้นสามารถอัดขึ้นรูปได้ดีที่แรงอัดตั้งแต่ 33 kg/cm^2 อัตราส่วนตัวประสานที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ 0.15 : 1 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำ เมื่อใช้ตัวประสานนี้ผสมกับถ่านเห้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก ถ่านอัดแท่งที่ได้มี ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 0.372 g/cm^3 ค่าดัชนีการแตกร่วน 1.07 ค่าการทนแรงกดเฉลี่ย 22.42 kg/cm^2 ค่าความร้อน $6,165.65 \text{ cal/g}$ และประสิทธิภาพการใช้น้ำร้อยละ 28.84 และเมื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ที่กำลังการผลิต $8,400 \text{ kg/year}$ ราคาถ่านอัดแท่งที่ 8.50 Bath/kg จะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 8 month และมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 605 kg/year

Potip and Wongwuttanasatian (2018) ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ทำจากกากกาแฟผสมกับกลีเซอรินดิบในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 100 : 0, 95 : 5 และ 90 : 10 น้ำหนักเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้โดยใช้อากาศในปริมาณตั้งแต่ 550 % ถึง 1,000 % ของอากาศตามทฤษฎี ผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนอยู่ที่ 21.22 ถึง 22.74 MJ/kg การเพิ่มกลีเซอรินดิบช่วยเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และเมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง ควรใช้อากาศมากกว่าร้อยละ 500 ของอากาศตามทฤษฎี องค์ประกอบก๊าซไอเสียที่ตรวจวัดได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ 90 : 10 โดยใช้อากาศเผาไหม้ที่ร้อยละ 850 ซึ่งสามารถแนะนำให้ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Wongwuttanasatian and Sakkampang (2016) ศึกษาลักษณะการเผาไหม้และการปล่อยก๊าซของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากชีวมวล (แกลบและถ่านแกลบ) ผสมกับกากน้ำตาลและกลีเซอรินในสัดส่วนต่าง ๆ โดยทดลองใช้อัตราส่วนชีวมวล:กากน้ำตาล:กลีเซอริน ตั้งแต่ 90 : 10 : 0 ถึง 65 : 10 : 25 น้ำหนักเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในเตาเผาที่มีฉนวนกันความร้อน ภายใต้สภาวะอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 16 และ 24 เท่าของอากาศตามทฤษฎี ผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการผสมอยู่ที่ประมาณ 13.2 ถึง 17.3 MJ/kg การเติมกลีเซอรินช่วยเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้นถึง 22 % และ 33.7 % ตามลำดับ การปล่อยก๊าซไอเสีย เช่น CO_2 , CO, NO_x และก๊าซอะโครลีน อยู่ในระดับที่ปลอดภัยตามมาตรฐาน สัดส่วนกลีเซอรินที่เหมาะสมที่สุดคือ 80:10:10 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีและการปล่อยก๊าซที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ

จึงแนะนำให้นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Seetapong et al. (2024) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านโดยใช้วัสดุฐานสองชนิด คือ เปลือกตาลโตนดและเปลือกปาล์มน้ำมัน พร้อมเปรียบเทียบบทบาทของตัวยัดประสานสามชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง กากน้ำตาล และดินร่วนปลูก (TMC) ผลการวิเคราะห์พบว่าวัสดุฐานและตัวยัดประสานมีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น ปริมาณสารระเหย เถ้า และเวลาการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ใช้เปลือกตาลโตนดให้ผลการเผาไหม้ดีกว่า มีเวลาการเผาไหม้นานและเวลาที่เกิดการอิมตัวช้า ส่วนแป้งมันสำปะหลังช่วยลดปริมาณเถ้าและเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงที่ได้ดีที่สุด ขณะที่การใช้ดินร่วนปลูกทำให้เชื้อเพลิงมีสารระเขยน้อยแต่มีเถ้าสูง มีความเปราะบาง และเวลาการเผาไหม้สั้น ผลวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเลือกตัวยัดประสานที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพและความยั่งยืนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง เพื่อรองรับความต้องการพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

Auntaisong and Maneechot (2019) สร้างเครื่องผลิตถ่านอัดแท่งจากฝักราชพฤกษ์โดยผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ จากนั้นอัดเป็นแท่งด้วยเครื่องอัดเย็น ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดและประสิทธิภาพการใช้งานดีที่สุดคือ 2 : 1 : 0.50 โดยมีค่าความร้อน 22.58 MJ/kg (5,394 kcal/kg) และสามารถเผาไหม้ได้นานถึง 451 min โดยมีประสิทธิภาพทางความร้อน 52.81 % นอกจากนี้ การทดสอบต้มน้ำในภาชนะปิดแสดงว่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทำได้คือ 95 °C งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งจากฝักราชพฤกษ์มีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสำหรับการใช้งานในครัวเรือน

Pukdee-asa and Pimpan (2022) ผลิตและวิเคราะห์เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษถ่านไม้และของเสียจากกระบวนการผลิตสเปรย์ตะไคร้หอมกับกล้วยฉาบอินทรีย์ พบว่ากากตะไคร้และเปลือกกล้วยมีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมสำหรับทำเชื้อเพลิง อัตราความร้อนของถ่านตะไคร้อบแห้งและถ่านเปลือกกล้วยอยู่ที่ประมาณ 5,002 และ 3,856 cal/g ตามลำดับ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ทดลองผสมถ่านไม้กับถ่านเปลือกกล้วยและถ่านตะไคร้ในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่าเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและผ่านมาตรฐานคือถ่านไม้ผสมถ่านเปลือกกล้วยหรือถ่านตะไคร้ในอัตราส่วน 80 : 20 ให้ค่าความร้อนประมาณ 5,200 ถึง 5,390 cal/g เชื้อเพลิงที่ได้มีความชื้นต่ำ รูปทรงและสีสม่ำเสมอ ไม่เปราะง่าย งานวิจัยนี้สรุปว่า ควรใช้ถ่านไม้เป็นส่วนหลักผสมกับถ่านเปลือกกล้วยหรือถ่านตะไคร้ไม่เกิน 20 % เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งคุณภาพดี

ลักขมี สุทธิวิไลรัตน์ และคณะ (2561) ผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากเศษวัสดุของต้นปาล์ม น้ำมัน โดยใช้กากแป้งเปียกเป็นตัวประสาน ศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิง 2 ประเภท คือ แท่งเชื้อเพลิงเขียวและถ่านอัดแท่ง โดยทดลองที่อัตราส่วนของต้นปาล์มน้ำมันต่อทางใบปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วน 5 : 0, 4 : 1, 3 : 2, 2 : 3, 1 : 4 และ 0 : 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และการต้มน้ำเดือด ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับแท่งเชื้อเพลิงเขียว คือ ต้นปาล์มน้ำมันต่อทางใบปาล์มน้ำมันที่อัตราส่วน 4 : 1 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 1.27 g/cm^3 ความชื้น 11.80 % ปริมาณเถ้า 6.53 % และปริมาณสารระเหย 92.60 % การต้มน้ำเดือดอยู่ที่ $80.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่าเศษวัสดุจากต้นปาล์มน้ำมันสามารถนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับการใช้งานในชุมชน

เสริมศักดิ์ เกิดวัน และคณะ (2561) ศึกษาและพัฒนาการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาคุ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเหมาะสมของเปลือกต้นสาคุต่อการใช้เป็นวัสดุการผลิตและหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการอัดขึ้นรูปเป็นถ่านอัดแท่ง มีขั้นตอนหลักในการผลิต 3 ขั้นตอน คือ การเผาถ่าน การบดผงถ่าน และการอัดขึ้นรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยนำเปลือกต้นสาคุที่เหลือจากการผลิตแป้งในชุมชนมาเผาให้เป็นถ่านด้วยเตา 200 L บดให้ละเอียดเป็นผงถ่าน นำตัวอย่างผงถ่านเข้าทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาคุณสมบัติความเหมาะสมเบื้องต้น ได้ผลดังนี้ ค่าความชื้น 6.03 % เถ้า 9.11 % ปริมาณคาร์บอนคงตัว 66.61 % สารระเหยได้ 24.28 % จากนั้นนำผงถ่านไปหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ระหว่างผงถ่านเปลือกต้นสาคุ ตัวประสาน(แป้งมันสำปะหลัง) และน้ำ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบที่ได้กำหนดไว้ ได้แก่ ผงถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ คือ 1 : 1 : 0.50 (โดยน้ำหนัก) ถ่านอัดแท่งที่ได้มีลักษณะทางกายภาพตามรูปทรงที่ต้องการ หน้าตัดรูปหกเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm อัดขึ้นรูปได้ง่าย เกาะตัวกันแน่น ไม่มีรอยแตกร้าว

แพร่ตะวัน จารุตัน และ วิชชุดา ภาโสเม (2567) ผลิตและทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งจากสวนยางพารา และทำการวิเคราะห์ออกแบบการถ่ายทอดกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งผ่านเทคโนโลยีอินโฟกราฟิก ในการผลิตถ่านอัดแท่งนั้นจะใช้เศษกิ่งไม้ยางพารา และเปลือกผลยางพาราที่ตากแห้งแล้ว จากนั้นเผาจนเป็นถ่านและบดให้ละเอียด นำไปผสมกับแป้งมันและน้ำ ทั้งหมด 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 กิ่งไม้ยางพารา : แป้งมัน : น้ำ ในอัตราส่วน คือ 2 kg : 250 g : 1,400 ml, สูตรที่ 2 เปลือกผลยางพารา : แป้งมัน : น้ำ ในอัตราส่วน คือ 2 kg : 250 g : 1,000 ml, และสูตรที่ 3 กิ่งไม้ยางพารา : เปลือกผลยางพารา : แป้งมัน : น้ำ ในอัตราส่วน คือ 1 kg : 1 kg : 250 g : 1,200 ml, ตามลำดับ แล้วอัดขึ้นรูป นำถ่านที่ได้ไปตากแดดให้แห้ง และทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านความร้อนต่าง ๆ คือ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า อุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ย และระยะเวลาการเผาไหม้ ผลการทดสอบพบว่า สูตรที่ 2 คือ มีค่าความร้อน $8,127.21 \text{ kcal/kg}$ มีปริมาณความชื้น 4.37 % มีปริมาณเถ้า 26.250 % มีอุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ย $270.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาการเผาไหม้จนเป็นเถ้าเฉลี่ย 180 min แสดงให้เห็นว่าสูตรที่ 2 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีที่สุด จากทั้ง 3 อัตราส่วนที่ผลิตขึ้นมา เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 238/2547) สามารถใช้หุงต้มได้ดี ไม่มีการแตกประทุ ติดไฟได้ดี มีเขม่า และควันเล็กน้อย

กฤตภาส มงคลธำรงกุล (2567) ได้พัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวลโดยใช้เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในจังหวัดระยอง ได้แก่ เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด โดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานหลักในการขึ้นรูปแท่งถ่าน งานวิจัยได้ทดลองหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดและศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่ง เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรง และค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วน 1 : 4 ระหว่างเปลือกทุเรียนกับเปลือกมังคุด ให้ค่าความร้อนสูงสุดถึง 5,572.78 kcal/kg และมีความหนาแน่นของถ่านอยู่ที่ประมาณ 606.32 kg/m³ ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องอัดแท่งที่พัฒนาขึ้นสามารถผลิตถ่านแท่งที่มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ ตอบโจทย์ความต้องการเชิงพาณิชย์ของชุมชนในพื้นที่ได้ดี นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางการปรับปรุงเครื่องอัดแท่งให้รองรับวัสดุอื่น ๆ ที่หลากหลายและลดต้นทุนการผลิต เพื่อส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

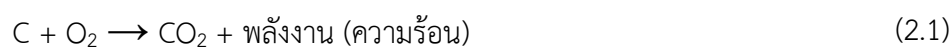
กฤษฎา บุญชม และ นิรุบล ไชยสมปาน (2563) ศึกษาคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากไม้ลำไยในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้กระบวนการเผาถ่านแบบดั้งเดิมและผสมผงถ่านกับน้ำและแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน อัตราส่วนผสมของผงถ่าน น้ำ และแป้งมันอยู่ที่ 0.47 : 0.47 : 0.06 เพื่อให้ได้ถ่านแท่งที่มีความเหนียวและทนทาน ผลการทดสอบพบว่าถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนเฉลี่ย 5,509.85 cal/g และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมอยู่ที่ 17.69 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งจากไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ดีสำหรับชุมชนท้องถิ่น นอกจากนี้บทความยังวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของถ่านแท่งกับอัตราการเผาไหม้ และเสนอแนวทางพัฒนาเครื่องอัดถ่านให้มีความเสถียรและประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.6 การเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง (Combustion of briquettes)

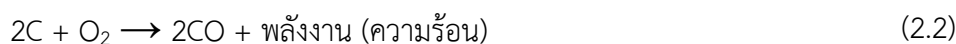
การเผาไหม้ถ่าน (Combustion of Charcoal) คือกระบวนการทางเคมีที่ถ่านซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O₂) ในอากาศ ส่งผลให้เกิดความร้อนและแสง หรือที่เรียกว่า การเกิดเปลวไฟ ถ่านที่ถูกเผาจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นก๊าซ และอาจเหลือเศษขี้เถ้าเป็นของแข็งเล็กน้อย ซึ่งเป็นสิ่งตกค้างจากแร่ธาตุในถ่าน เป็นดังสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2 (Smith et al., 2005)

2.6.1 สูตรทางเคมีของการเผาไหม้ถ่าน

การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion) เมื่อมีออกซิเจนเพียงพอ คาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นก๊าซเรือนกระจก ดังสมการ 2.1



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เมื่อมีออกซิเจนไม่เพียงพอ คาร์บอนจะทำปฏิกิริยาเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ ดังสมการ 2.2



ในบางกรณีที่ออกซิเจนต่ำมาก อาจเกิดเขม่าคาร์บอน (C, Soot) ซึ่งสังเกตได้จากควันดำที่ลอยขึ้นจากถ่าน

2.6.2 สูตรทางเคมีของการเผาไหม้กลีเซอริน

กลีเซอริน ($C_3H_8O_3$) เป็นสารอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ดี มีสูตรเผาไหม้ดังสมการที่ 2.3 เผาไหม้สมบูรณ์ และ 2.4 เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Smith et al., 2005)



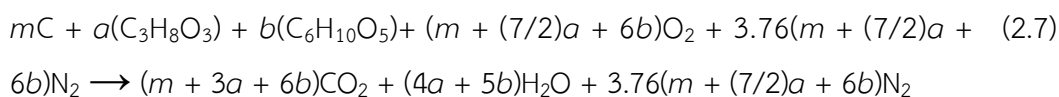
2.6.3 สูตรทางเคมีของการเผาไหม้แป้งมันสำปะหลัง

แป้ง (Starch) ซึ่งโดยประมาณสามารถเขียนเป็นพอลิเมอร์ของหน่วยอนิโอดิกลูโคส มีสูตรโมเลกุลโดยประมาณ ($C_6H_{10}O_5$) ซึ่งจะแสดงองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน สูตรการเผาไหม้ดังสมการที่ 2.5 เผาไหม้สมบูรณ์ และ 2.6 เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Smith et al., 2005)



2.6.4 สูตรทางเคมีถ่านอัดแท่งเห้งน้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินและแป้งมันสำปะหลัง

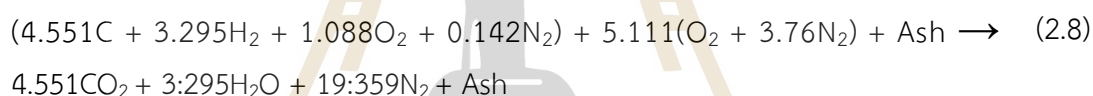
ถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านเห้งน้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินและแป้งมันสำปะหลัง ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือคาร์บอนจากถ่าน กลีเซอริน ($C_3H_8O_3$) และแป้งมันสำปะหลัง ($C_6H_{10}O_5$) ซึ่งทั้งหมดเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถเผาไหม้ได้ เมื่อพิจารณาส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดรวมกัน สามารถเขียนสมการรวมของการเผาไหม้ในเชิงองค์ประกอบได้ดังสมการที่ 2.7 เผาไหม้สมบูรณ์ (Smith et al., 2005) ทั้งนี้ การอ้างอิง ใช้เพื่อรองรับหลักการทางทฤษฎีด้านการเผาไหม้สมบูรณ์ ไม่ใช่อ้างอิงสมการเผาไหม้ของส่วนผสมดังกล่าวโดยตรง



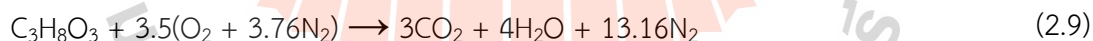
โดยที่ m คือ สัดส่วนของคาร์บอนจากถ่าน (mol)
 a คือ สัดส่วนของกลีเซอริน (mol)
 b คือ สัดส่วนของแป้งมันสำปะหลัง (mol)

ในการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์บอกถึงปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอส่งผลให้เกิด CO และ เชม่า C ซึ่งลดประสิทธิภาพการให้ความร้อนและเพิ่มมลพิษจากการเผาไหม้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้โดย Potip and Wongwuttanasatian (2018) ได้รายงานการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสุดท้ายของกากกาแฟที่ใช้แล้ว Spent Coffee Ground (SCG) และกลีเซอรินดิบ สมการการเผาไหม้ในอากาศทฤษฎี 100 % สำหรับ 100 g SCG และ 1 mol ของกลีเซอรินดิบสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2.8 และ 2.9 ดังนี้



หากเผา SCG 200 กรัมในอากาศทฤษฎี 100 % จะต้องใช้อากาศจำนวน 7.403 kg อากาศหรือ 1.205 m³ (โดยมีความหนาแน่นของอากาศ 1.164 kg/m³) ดังนั้นเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ภายใน 32 min จำเป็นต้องมีการไหลของอากาศที่ 2.259 m³/hr



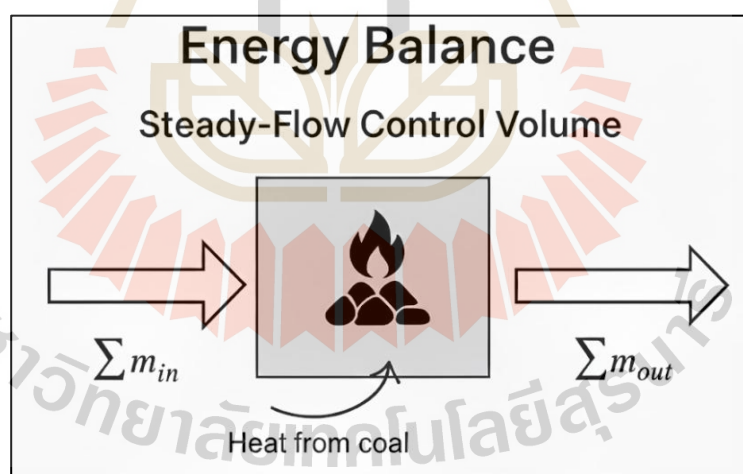
สมการ 2.9 แสดงการเผาไหม้ 1 mol ของกลีเซอรินดิบในอากาศทฤษฎี 100% หากเผากลีเซอรินดิบ 200 g จะต้องใช้อากาศจำนวน 1.045 kg อากาศหรือ 0.898 m³ โดยในการเผาไหม้สมบูรณ์ภายใน 32 min จำเป็นต้องมีอัตราการไหลของอากาศที่ 1.684 m³/hr

เมื่อ SCG และกลีเซอรินดิบถูกผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ การคำนวณอากาศทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการใช้สัดส่วนอากาศที่สอดคล้องกับสัดส่วนของวัสดุ อัตราการไหลของอากาศที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงในอากาศทฤษฎี 100 % และมีอัตราส่วนต่าง ๆ ของ 100:0, 95:5 และ 90:10 จะได้อัตราการไหลของอากาศที่ 2.26, 2.23 และ 2.20 m³/hr ตามลำดับ

มีรายงานว่า การเผาไหม้ของก้อนชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูงระหว่าง 400 ถึง 700 kg/m³ มักจะใช้อากาศทฤษฎี 150 ถึง 250 % (Mitchell et al., 2016; Wakchaure & Sharma, 2007) แต่ความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานนี้คือ 872.12 kg/m³ และอากาศที่จ่ายมีค่าระหว่าง 550 %, 700 %, 850 % และ 1,000 % ของอากาศทฤษฎี โดยอิงจากการเผาไหม้สมบูรณ์ภายใน 32 min

2.7 สมดุลของพลังงาน (Energy balance)

สมดุลพลังงาน (Energy Balance) เป็นการวิเคราะห์พลังงานที่เข้าสู่และออกจากระบบแสดงดังรูปที่ 2.10 เพื่อให้เป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิก ซึ่งระบุว่าพลังงานไม่สามารถถูกสร้างหรือทำลายได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งได้ สำหรับระบบการไหลแบบ Steady-flow ภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสูญเสียพลังงาน (No heat losses) รวมถึงมวลไอเสียของการเผาไหม้มีค่าน้อยมากไม่นำมาคำนวณ และไม่มีการแข็งกล รวมถึงการละเว้นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ สมดุลพลังงานของ Control volume สามารถแสดงได้อย่างง่าย โดยผลรวมของพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ออกจากระบบ ทำให้สามารถวิเคราะห์และคำนวณการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงานภายในระบบได้ดังสมการที่ 2.10 (Ashrafizadeh & Tan, 2018)



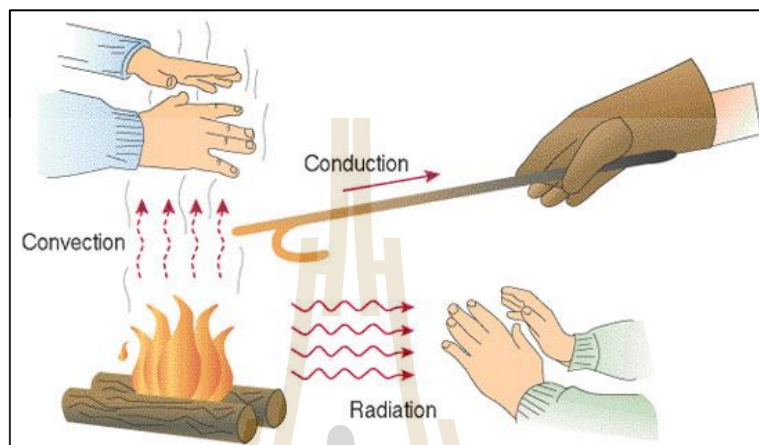
รูปที่ 2.10 สมดุลพลังงานจากเตาเผาไหม้หุ้มฉนวน (Ashrafizadeh & Tan, 2018)

$$\dot{m}_{air} c_{p,air} T_{in,air} + \dot{m}_{fuel} LHV_{fuel} = \dot{m}_{air} c_{p,air} T_{out,air} \quad (2.10)$$

2.8 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน คือกระบวนการที่พลังงานความร้อนถูกถ่ายจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง หรือจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในสาม

รูปแบบหลัก ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction), การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) แสดงดังรูปที่ 2.11 และเป็นดังสมการที่ 2.11 สมการที่ 2.12 และสมการที่ 2.13 ตามลำดับ (Cengel & Ghajar, 2020)



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อน (Cengel & Ghajar, 2020)

2.8.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เป็นกระบวนการที่พลังงานความร้อนถูกส่งผ่านวัตถุที่อยู่กับที่ โดยพลังงานจะถ่ายผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนเกิดได้ดีในของแข็ง โดยเฉพาะโลหะ ทฤษฎีของ โฟร์ริเย (Joseph Fourier) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ซึ่งได้นำเสนอสมการที่อธิบายการนำความร้อนได้อย่างแม่นยำ Fourier's Law of Heat Conduction ดังสมการที่ 2.11

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{cond}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (W/m·K)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนถ่ายผ่าน (m²)
 $\frac{dT}{dx}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวการนำ (K/m)

2.8.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหล (ทั้งของเหลวและก๊าซ) ซึ่งนำพลังงานความร้อนไปด้วย โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก การพาแบบธรรมชาติ (Natural

Convection) เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหล และการพาแบบบังคับ (Forced Convection) เกิดจากการใช้เครื่องมือช่วยให้ของไหลเคลื่อนที่ เช่น พัดลมหรือปั๊ม หลักการของ ไอแซก นิวตัน (Isaac Newton) ซึ่งกล่าวถึงกฎการถ่ายเทความร้อนผ่านการพา เรียกว่า Newton's Law of Cooling ดังสมการที่ 2.12

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (2.12)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{conv}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m²·K)
 A_s คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ (m²)
 T คือ อุณหภูมิผิวของวัตถุ (K)
 T_{∞} คือ อุณหภูมิของของไหลโดยรอบ (K)

2.8.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือการถ่ายเทพลังงานความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยสื่อกลางใด ๆ เช่น พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เดินทางผ่านอวกาศมายังโลก ทฤษฎีของ สเตฟาน (Josef Stefan) และ โบลต์ซมันน์ (Ludwig Boltzmann) ที่ร่วมกันพัฒนาทฤษฎีการแผ่รังสี จากวัตถุรวมถึงแนวคิดของ แมกซ์ แพลงก์ (Max Planck) ผู้ริเริ่มทฤษฎีควอนตัมของการแผ่รังสีจาก วัตถุดำ Stefan-Boltzmann Law ดังสมการที่ 2.13

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.13)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{emit}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
 ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (0-1)
 σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (5.67×10^{-8} W/m²·K⁴)
 A_s คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ (m²)
 T_s คือ อุณหภูมิของวัตถุ (K)

2.9 การทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง (Testing the properties of briquettes)

การทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการใช้งานจริง ทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ

ความสามารถในการให้พลังงาน และพฤติกรรมการเผาไหม้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ช่วยสะท้อนคุณภาพของ ถ่านอัดแท่งและความแข็งแรงในการใช้งาน การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งทดสอบสมบัติหลักของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากส่วนผสมผงถ่านห้ำมันสำปะหลังและกลีเซอริน เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาคุณภาพเชื้อเพลิง และเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐานที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา โดยทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

2.9.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture content)

การวิเคราะห์ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173-11 (American Society for Testing and Materials, 2017) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) แสดงดังรูปที่ 2.12 อบที่อุณหภูมิระหว่าง 104 ถึง 110 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้ให้น้ำในตัวอย่างระเหยออกจนหมด ค่าความชื้น (Moisture content) ของตัวอย่างสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14 ค่าความชื้นรายงานในรูปเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (% w.b.)

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.14)$$

โดยที่	M	คือ ค่าความชื้น (%)
	W_1	คือ มวลตัวอย่างทดลองก่อนอบ (g)
	W_2	คือ มวลตัวอย่างทดลองหลังอบ (g)



รูปที่ 2.12 ตู้อบลมร้อน (โรสลินา อนันตกุลวงศ์ และคณะ, 2562)

2.9.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

คืออัตราส่วนระหว่างมวลของวัสดุกับปริมาตรรวมของวัสดุนั้น ซึ่งปริมาตรรวมดังกล่าวรวมถึงช่องว่างระหว่างอนุภาคภายในวัสดุด้วย ค่าความหนาแน่นรวมเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะ

โครงสร้าง ความแน่น และระดับการอัดตัวของวัสดุ โดยมีผลต่อความแข็งแรงทางกายภาพ การเผาไหม้ และสมรรถนะการใช้งานของวัสดุ โดยเฉพาะในกรณีของถ่านอัดแท่ง ค่าความหนาแน่นรวมที่สูงมักสะท้อนถึงโครงสร้างที่แน่น แข็งแรง และให้การเผาไหม้ที่ยาวนานมากขึ้น โดยการชั่งมวลของตัวอย่าง (M) และคำนวณหาปริมาตรของตัวอย่าง (V) จด บันทึก และนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.15 วิธีการวิเคราะห์ที่ตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 (American Society for Testing and Materials, 2020)

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.15)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (g/cm³)
 M คือ มวลของถ่านอัดแท่ง (g)
 V คือ ปริมาตรของถ่านอัดแท่ง (cm³)

2.9.3 การทดสอบความแข็งแรงการกด (Compression test)

คือการทดสอบวัสดุหรือชิ้นงานเพื่อดูว่ามันสามารถรับแรงกดได้มากแค่ไหนก่อนที่จะแตกหักหรือเสียรูปถาวร เป็นวิธีการวัดความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ เช่น คอนกรีต เหล็ก อลูมิเนียม พลาสติก หรือวัสดุชีวภาพรวมถึงถ่านอัดแท่ง โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Universal Testing Machine (UTM) หรือ เครื่องทดสอบแรงกด แสดงดังรูปที่ 2.13 ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 17831-2:2015 (International Organization for Standardization, 2015)



รูปที่ 2.13 เครื่อง Universal Testing Machine (อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ, 2551)

หลักการของการทดสอบความแข็งแรงการกด (Compression Test) คือการประเมินความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงอัดโดยไม่แตกหรือเสียรูปถาวร โดยทำการกดชิ้นงานด้วยแรงในแนวตั้งฉากต่อพื้นที่หน้าตัดอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเกิดการแตกหักหรือเสียรูป จากนั้นบันทึกค่าแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ แล้วนำไปคำนวณหาความแข็งแรงการกด (Compressive Strength) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรับแรงกดอัดของวัสดุนั้น ๆ การคำนวณความแข็งแรงการกดอัดเป็นดังสมการที่ 2.16 (Ekong et al., 2023)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.16)$$

โดยที่ σ_c คือ ความแข็งแรงการกด (Compressive strength) หน่วย N/mm² หรือ MPa
 F คือ แรงที่ทำให้ชิ้นงานเสียหายหรือแตก (Maximum load) หน่วย นิวตัน (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (Cross-sectional area) หน่วย mm²

2.9.4 การหาค่าความร้อน (Heating value)

ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในบางครั้งอาจเรียกว่าค่าความร้อนของการเผาไหม้ โดยวัดในหน่วยแคลอรีต่อกรัมของเชื้อเพลิง (cal/g) ทำการวิเคราะห์โดยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ Bomb Calorimeter แสดงดังรูปที่ 2.14 ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 (American Society for Testing and Materials, 2019)



รูปที่ 2.14 เครื่อง Bomb Calorimeter (สุชาติ ศรีบุญเรือง และคณะ, 2568)

หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter ทำงานโดยการนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น ถ่าน ถ่านหิน หรืออาหาร ชั่งในปริมาณที่แน่นอนแล้วบรรจุลงในภาชนะปิดสนิทที่เรียกว่า Bomb ซึ่งภายในเติมก๊าซออกซิเจนความดันสูงเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ จากนั้นวาง Bomb ลงในถังน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ เมื่อตัวอย่างถูกจุดไฟเผาไหม้ภายใน Bomb จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนซึ่งจะถ่ายเทสู่น้ำรอบนอก ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น โดยใช้ค่าเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำนี้คำนวณค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ ซึ่งแสดงถึงค่าพลังงานของวัสดุนั้น ๆ ในหน่วย เช่น cal/g หรือ J/g สูตรการคำนวณค่าความร้อนจากเครื่อง Bomb Calorimeter ดังสมการที่ 2.17 (อภีรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ, 2551)

$$Q_{fuel} = \frac{(m_w + m_{eq})c_p\Delta T - Q_1 - Q_2 - Q_3}{m_{fuel}} \quad (2.17)$$

โดยที่ Q_{fuel}	คือ พลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมา (cal/g)
m_w	คือ มวลของน้ำใน bucket (g)
m_{eq}	คือ water equivalent ของ bomb calorimeter (g)
c_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (cal/g·°C)
ΔT	คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (°C)
Q_1	คือ ความร้อนจากหลอดจุดไฟ (cal)
Q_2	คือ ความร้อนจากกรตไนตริก (cal)
Q_3	คือ ความร้อนจากกรตซิลฟูริก (cal)
m_{fuel}	คือ มวลของเชื้อเพลิงตัวอย่าง (g)

2.9.5 ระยะเวลาการติดไฟ (Ignition time)

ในการทดสอบระยะเวลาการติดไฟและการใช้งานของถ่านอัดแท่ง ทำเพื่อดูประสิทธิภาพของการติดไฟ มีวิธีการดังนี้ จุดไฟและบันทึกข้อมูล และสังเกตลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง ได้แก่ การแตกประทุ ลักษณะของควัน และจับระยะเวลาในการเผาไหม้ตั้งแต่เริ่มต้นจนไฟ มอดดับ (นิพนธ์ ตันไพบุลย์กุล และ ธรพร บุศย์น้ำเพชร, 2559)

2.9.6 อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate)

อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) หมายถึงอัตราที่วัสดุเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หรือถูกใช้งานในหน่วยเวลาหนึ่ง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้มักถูกใช้ในการศึกษากระบวนการเผาไหม้ในวัสดุต่าง ๆ เช่น เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง สูตรคำนวณอัตราการเผาไหม้ ดังสมการที่ 2.18 (รอกีเยาะ สาและ และ ฮาสีมาะ ฮูตู, 2554)

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.18)$$

โดยที่ $\dot{m}$ คือ อัตราการเผาไหม้ (g/min)
 Δm คือ การเปลี่ยนแปลงของมวลเชื้อเพลิง (g)
 Δt คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลา (min)

2.10 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

2.10.1 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency %)

ทำการทดลองโดยใช้ถ่านอัดแท่งให้ความร้อนต่อน้ำ และทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละอัตราส่วน อุณหภูมิระหว่างการทดสอบถูกบันทึกด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น TM-1947SD ซึ่งบันทึกข้อมูลลงใน Micro SD และแสดงผลแบบดิจิทัล พร้อมใช้หัววัดชนิดเทอร์โมคัปเปิล Type-K ในการวัดอุณหภูมิระหว่างการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.15 (Auntaisong & Maneechot, 2019)



รูปที่ 2.15 การทดลองโดยใช้ถ่านอัดแท่งให้ความร้อนต่อน้ำ (Auntaisong & Maneechot, 2019)

ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency, %) ถูกคำนวณจากการทดลองแบบต้มเดือดน้ำ (Water Boiling Test; WBT) โดยกำหนดปริมาณน้ำและปริมาณถ่านให้คงที่ แล้วนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ 2.19 (กฤษฎา บุญชม และ นิรุบล ไชยสมปาน, 2563)

$$HU = \frac{M_w c_p (T_b - T_i) + M_c L}{M_f H_f} \times 100\% \quad (2.19)$$

โดยที่	HU	คือ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (%)
	M_w	คือ มวลของน้ำ (kg)
	c_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg·°C)
	T_b	คือ อุณหภูมิน้ำเดือด (°C)
	T_i	คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (°C)
	M_c	คือ มวลของน้ำที่ระเหย (kg)
	L	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
	M_f	คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)
	H_f	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

2.10.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งนิยามเป็นสัดส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่ตัวรับความร้อน เช่น อากาศ ได้รับต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เชื้อเพลิงสามารถให้ได้จากค่าความร้อน (Heating value) ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-flow) สมการสมดุลพลังงานของระบบแบบ Control volume สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานเข้าและพลังงานออกของระบบได้ และเมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานทางผนังหรือการปล่อยทิ้งอื่น ๆ พลังงานทั้งหมดของเชื้อเพลิงจะถูกถ่ายเทให้กับอากาศโดยตรง ส่งผลให้สมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถเขียนในรูปของสมการที่ 2.20 (Ashrafizadeh & Tan, 2018)

$$\eta_{th} = \frac{m_{air} c_{p,air} \Delta T_{air}}{\Delta m_{fuel} Q_{HV}} \times 100\% \quad (2.20)$$

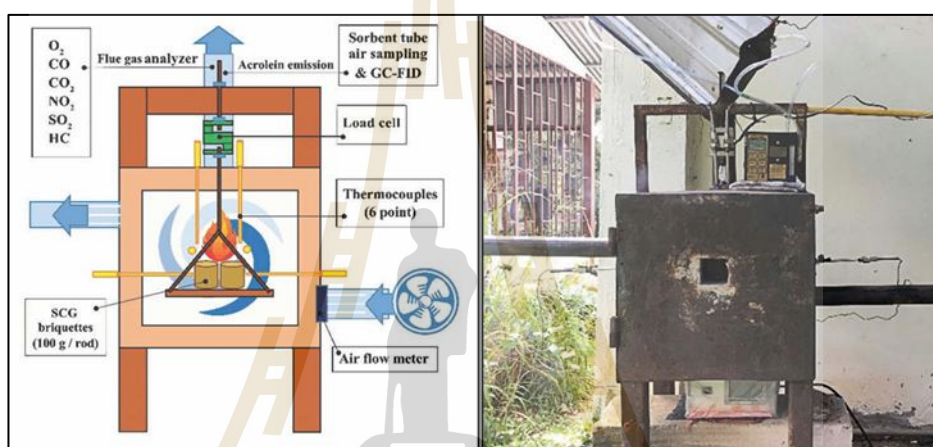
โดยที่	η_{th}	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
	m_{air}	คือ มวลของอากาศ (g)
	$c_{p,air}$	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/g °C)
	ΔT_{air}	คือ $T_{out,air} - T_{in,air}$ (°C)
	เมื่อ $T_{out,air}$	คือ อุณหภูมิของอากาศออก (°C)
	$T_{in,air}$	คือ อุณหภูมิของอากาศเข้า (°C)

Δm_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่สูญเสียไป (g)

Q_{HV} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (J/g)

2.11 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงและการวัดมลพิษ

Sakkampang (2014) ได้ออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้โดยมีขนาดภายใน 230 mm x 230 mm x 230 mm ซึ่งทำจากผนังอิฐทนไฟหนา 76 mm และหุ้มด้วยแผ่นเหล็กหนา 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Combustion chamber and measurements (Sakkampang, 2014)

พัดลมจะจ่ายอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิถูกตรวจวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 6 ตัว ความแม่นยำ ± 0.75 % ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) โหลดเซลล์แบบ S-type ที่สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 20 kg และความแม่นยำ ± 0.03 % ถูกใช้ในการบันทึกมวลของถ่านอัดแท่งทุกวินาทีในระหว่างการเผาไหม้ สำหรับการวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 ดังรูปที่ 2.17 เพื่อวัดค่าของออกซิเจน (O_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ปลายท่อไอเสีย



รูปที่ 2.17 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 (Kadhim & Oshchepkov, 2024)

2.12 มาตรฐานถ่านอัดแท่ง (Briquette Standards)

มาตรฐานถ่านอัดแท่งเป็นเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวภาพก่อนนำไปใช้งานจริง ทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และความปลอดภัย ซึ่งช่วยให้การผลิตถ่านอัดแท่งเป็นไปอย่างมีคุณภาพสม่ำเสมอและสามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะของถ่านอัดแท่งกับข้อกำหนดที่ยอมรับในระดับสากลหรือระดับประเทศได้ จึงมีความจำเป็นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลการทดสอบสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ผลิตในงานวิจัยนี้

2.12.1 คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ถ่านอัดแท่งซึ่งกำหนดมาตรฐานด้านคุณภาพ ความปลอดภัย และคุณสมบัติที่เหมาะสมของถ่านอัดแท่งที่ผลิตในระดับชุมชน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอและสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภค โดยสาระสำคัญของมาตรฐานนี้กล่าวถึง ลักษณะเฉพาะของถ่านอัดแท่งที่ดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.), 2562) แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	ถ่านอัดแท่ง มผช.238/2547
ลักษณะทั่วไป	รูปทรงเดียวกัน ขนาดใกล้เคียงกัน สีดำ สม่ำเสมอ
	ไม่เปราะ อาจแตกหักได้บ้าง
ค่าความร้อน (Heating value)	ไม่ควรต่ำกว่า 5,000 cal/g
ความชื้น (Moisture content)	ไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

2.12.2 มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งสาธกและการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อ้างอิงค่ามาตรฐานจากหน่วยงานหรือองค์กรที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลดังนี้ ขนาดและรูปทรง อ้างอิง DIN EN ISO 17225-3 (Deutsches Institut fuer Normung, 2023) ความหนาแน่นอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์เรื่อง ศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตถ่านอัดแท่ง สำหรับการผลิตในระดับครัวเรือน (Mahayosanon, 2005) ความชื้น และ ค่าความร้อน อ้างอิง ISO 17225-1:2021 (International Organization for Standardization, 2021) ในส่วนความต้านทาน แรงกดอัด อ้างอิงงานวิจัย Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste (Sen et al., 2016) เพื่อให้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพและสามารถเปรียบเทียบได้ในระดับนานาชาติ แสดงดัง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งสาธกและการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Characteristics	Standard	Reference standard
Dimension	The diameter, width, and length must be specified. Shapes solid cylinder, hollow cylinder (cylindrical with a central hole), solid rectangle, or solid hexagon	DIN EN ISO 17225-3
Moisture content	$\leq 15 \%$	ISO 17225-1:2021
Bulk density	$\leq 0.8 \text{ g/cm}^3$	(Mahayosanon, 2005)
Heating value	$\geq 3,800 \text{ cal/g}$	ISO 17225-1:2021
Compressive strength	$1 - 6 \text{ kg/cm}^2$	(Sen et al., 2016)

2.12.3 มาตรฐานการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวล

IRBEA (Irish BioEnergy Association) (2016) รายงานนี้เป็นการศึกษาทางเทคนิค เกี่ยวกับการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวลในโรงไฟฟ้าขนาดกลาง (Medium Combustion Plants - MCP) โดยเน้นที่การปฏิบัติตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรปเกี่ยวกับค่าการปล่อยสูงสุดที่ อนุญาต (Emission Limit Values - ELVs) ตามข้อกำหนดของ Directive (EU) 2015/2193 (European Parliament, 2015) และ Commission Regulation (EU) 2015/1185 (European Commission, 2015) แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานการปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวล

Emission (mg/m ³)	IRBEA Standards
CO	1,500 ^a
NO _x	200 ^a
SO ₂	200 ^b
HC	(No limited)
O ₂ (%)	(No limited)
CO ₂ (%)	(No limited)

^aEuropean Commission (2015), ^bEuropean Parliament (2015)

2.13 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและความสอดคล้องของผลการทดลอง เพื่อให้สามารถตีความความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีระบบและน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือทางสถิติและวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ตลอดจนประเมินความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานสำคัญในการอภิปรายผลและสรุปผลการวิจัยต่อไป

2.13.1 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

เป็นวิธีการทดสอบทางสถิติที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยหลายกลุ่มภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เมื่อพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดย DMRT จะจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยตามลำดับขนาดและเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นคู่ ๆ เพื่อระบุว่าคู่ใดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด เช่น $p \leq 0.05$ ผลการทดสอบมักแสดงด้วยการกำหนดอักษรกำกับเหนือค่าเฉลี่ย (Superscript letters) โดยค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเดียวกันหรือมีอักษรร่วมกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ DMRT เป็นวิธีที่มีความไวสูงในการแยกความแตกต่างของกลุ่มค่าเฉลี่ย เหมาะสำหรับงานวิจัยเชิงทดลองที่ต้องการเปรียบเทียบผลของปัจจัยหลายระดับอย่างละเอียด (Montgomery, 2017)

2.13.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance)

เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระสองตัวที่มีผลต่อค่าของตัวแปรตาม มีทั้งการวิเคราะห์กรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) และการวิเคราะห์กรณีที่ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของปฏิสัมพันธ์ได้ แต่ยังสามารถวิเคราะห์ผลหลัก (Main effects) ของแต่ละตัวแปรได้ (Montgomery, 2017) ทั้งหมดนี้วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีความน่าเชื่อถือที่สามารถยอมรับได้

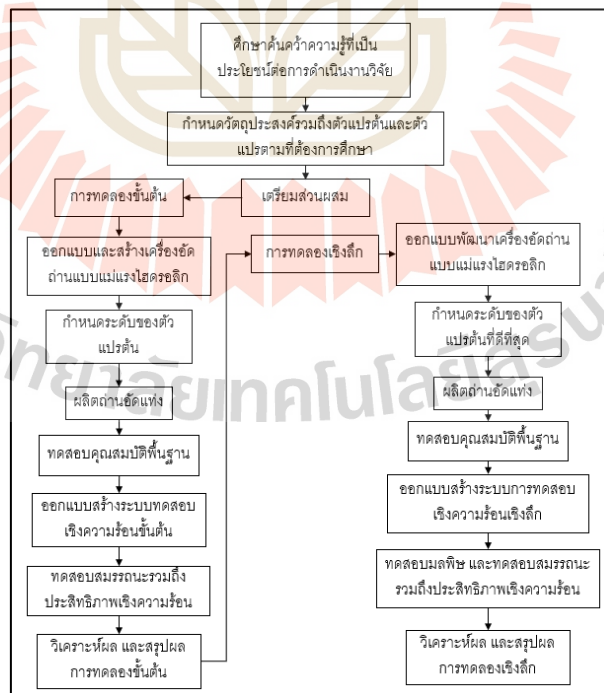
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน การทดสอบสมบัติของถ่านอัดแท่ง ประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพเชิงความร้อน รวมถึงการทดสอบมลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน โดยนำเสนอแนวคิด วิธีการดำเนินงานวิจัย วัสดุอุปกรณ์ และการวิเคราะห์ค่าที่ต้องการในวัตถุประสงค์ต่อไป

3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

แผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานตั้งแต่การเตรียมวัสดุ การทดลอง ไปจนถึงการวิเคราะห์ผล เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจโครงสร้างและกระบวนการดำเนินงานของงานวิจัยอย่างเป็นระบบ โดยแผนผังดังกล่าวช่วยแสดงความเชื่อมโยงระหว่างแต่ละขั้นตอน วิธีการที่ใช้ รวมถึงผลลัพธ์ที่ต้องการตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา อันจะทำให้ภาพรวมของงานวิจัยมีความชัดเจนและสามารถติดตามได้อย่างเป็นลำดับ



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.2 ส่วนผสมในการทดลอง

ในการดำเนินการทดลองครั้งนี้ ส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่งถูกคัดเลือกและเตรียมอย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการทดสอบสมบัติต่าง ๆ วัตถุดิบหลักประกอบด้วยถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังซึ่งผ่านการเผาและบดให้ได้ขนาดที่เหมาะสม กลีเซอรินที่ใช้ช่วยเพิ่มพลังงานความร้อน รวมถึงแป้งมันสำปะหลังซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน (binder) ส่วนผสมทั้งหมดได้รับการชั่งตวงตามอัตราส่วนที่กำหนดก่อนนำไปเข้าสู่ขั้นตอนการผสม การอัด และการทำให้แห้ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งที่พร้อมสำหรับการทดสอบคุณสมบัติในขั้นตอนต่อไป

3.2.1 เหง้ามันสำปะหลังในการทดลอง

เหง้ามันสำปะหลังที่ใช้อยู่ในพื้นที่บ้านหนองดับเต่า ตำบลป่าปอ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น โดยทำการเก็บเหง้ามันสำปะหลังซึ่งเป็นเศษเหลือทางการเกษตร หลังการเก็บเกี่ยว ส่วนหัวมันสำปะหลังไปขายแล้ว จากนั้นคัดแยกแล้วนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นสำหรับกระบวนการทำให้เป็นถ่านต่อไป โดยรูปเหง้ามันสำปะหลังแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เหง้ามันสำปะหลัง

3.2.2 ถ่านเหง้ามันสำปะหลังในการทดลอง

3.2.2.1 เตรียมเหง้ามันสำปะหลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ถังเผาให้ความร้อนกับเหง้ามันสำปะหลังปริมาณ 20 kg ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือออกซิเจนน้อยมาก ด้วยอุณหภูมิประมาณ 300 °C ถึง 700 °C (Bernardes et al., 2023) เป็นเวลา 2 hr รอให้ถ่านไม่มีความร้อนจากนั้นนำถ่านออกจากถังเผา โดยกระบวนการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลังดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการผลิตถ่านหุง้ำมันสำปะหลัง ก) การคัดเลือกหุง้ำมันสำปะหลัง
ข) กระบวนการไพโรไลซิส และ ค) ถ่านหุง้ำมันสำปะหลัง

3.2.2.2 หลังจากได้ถ่านหุง้ำมันสำปะหลังแล้วขั้นตอนต่อไปนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 mesh แสดงดังรูปที่ 3.4 เพื่อใช้สำหรับอัดขึ้นรูปแท่งถ่านเนื่องจากอนุภาคผงถ่านที่เล็กนั้นจะอัดแน่นได้ดีกว่าอนุภาคถ่านที่มีก้อนใหญ่ ทำให้อนุภาคถ่านที่เล็กนั้นมีความหนาแน่นสูงและแข็งแรงเหมาะสำหรับการนำไปอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่ง



รูปที่ 3.4 กระบวนการลดอนุภาคถ่าน ก) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 mesh และ
ข) ผงถ่านหุง้ำมันสำปะหลัง

3.2.3 กลีเซอรินในการทดลอง

กลีเซอรินเป็นผลพลอยได้จากการสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนการทำปฏิกิริยาดังรูปที่ 3.5 โดยน้ำมันที่ใช้เป็นน้ำมันปาล์ม ตราโบนัส ที่ผ่านการทอดมะม่วงมาแล้ว สารละลายประกอบด้วยเมทานอล (Methyl Alcohol 100 %) ตรา SENSE และมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟแบบเกล็ด ตรา SW เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 0.5 % โดยมวลต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์มและละลายในเมทานอลที่มีปริมาณ 25 % โดย

ปริมาณของน้ำมันปาล์ม หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายนี้ลงในน้ำมันที่ถูกอุ่นไว้ล่วงหน้ารักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60 °C พร้อมทั้งกวนส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 min เมื่อครบเวลาแล้วจึงปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน จากนั้นจึงแยกชั้นกลีเซอรินที่อยู่ด้านล่างออกไป (Srimoon et al., 2014) ไบโอดีเซลและกลีเซอรินที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 กระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน



รูปที่ 3.6 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ก) ไบโอดีเซล และ ข) กลีเซอริน

3.2.4 แป้งมันสำปะหลังในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังตราปลาไทย 5 ดาว เป็นตัวยึดประสาน แสดงดังรูปที่ 3.7 ใช้แพร่หลายโดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากหาง่าย ราคาถูก และให้แรงยึดเกาะดี ซึ่งงานทดลองหลายชิ้นระบุว่าแป้งมันช่วยเพิ่ม Compressive strength และความคงรูปเมื่อใช้ในสัดส่วนที่เหมาะสม (Borowski et al., 2017; Aransiola et al., 2019) อีกทั้ง แป้งมันสำปะหลังไม่มีสารอันตรายปนเปื้อน (Pukdee-asa & Pimpan, 2022)



รูปที่ 3.7 แป้งมันสำปะหลัง

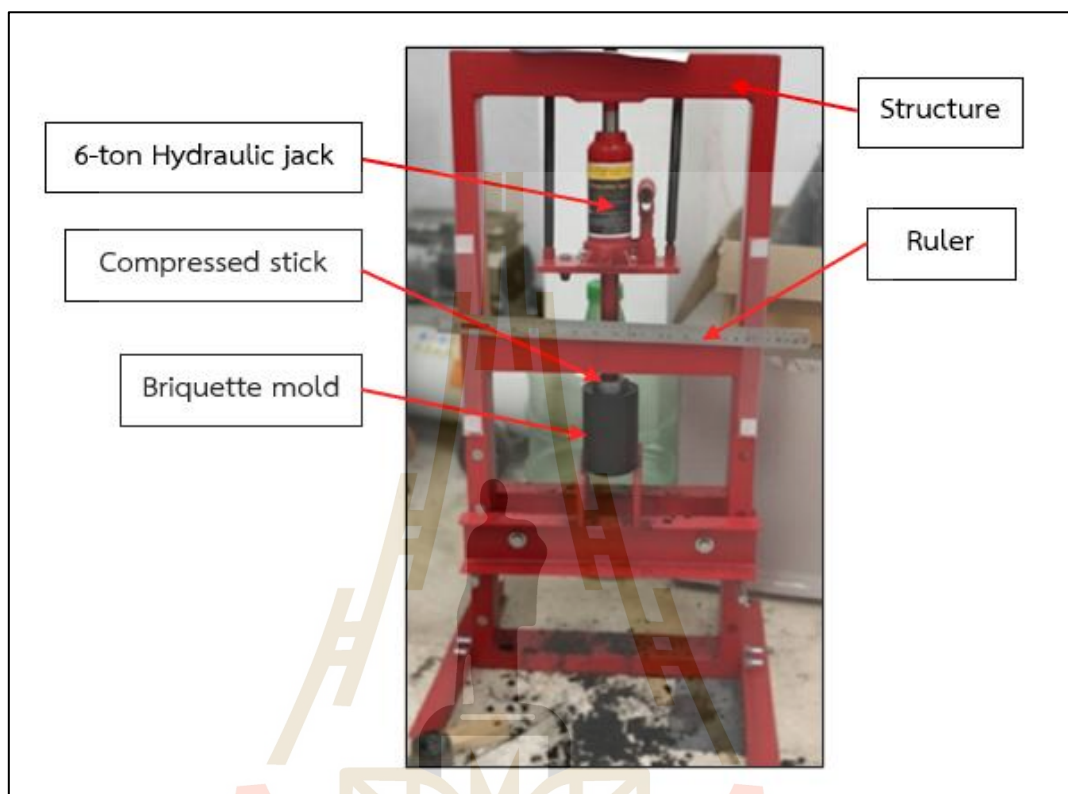
3.3 การทดลองขั้นต้น

การทดลองขั้นต้นเป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของส่วนผสมและเงื่อนไขการผลิตก่อนเข้าสู่การทดลองเชิงลึก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของการขึ้นรูปถ่านอัดแท่ง การยึดเกาะของวัตถุดิบ และพฤติกรรมของการเผาไหม้เบื้องต้นภายใต้สภาวะทดลองที่ควบคุมได้ ผลที่ได้จากการทดลองขั้นต้นช่วยให้สามารถปรับปรุงอัตราส่วนผสม และเงื่อนไขการอัดให้มีความเหมาะสมมากขึ้น เพื่อให้การผลิตถ่านอัดแท่งสำหรับการทดสอบในการทดลองเชิงลึกต่อไป ที่มีความคงรูป แข็งแรง และให้ค่าความร้อนในระดับที่ต้องการ

3.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นเครื่องอัดแบบลูกสูบระบบไฮดรอลิก (Hydraulic piston press) ลักษณะการทำงานแบบวงวต (Batch type) ได้วงวตละ 1 ก้อน โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน เป็นต้นกำลังในการอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่ง แสดงดังรูปที่ 3.8 เนื่องจากสามารถปรับความหนาแน่นและระยะการกดอัดได้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังส่งชุดโครงสร้างพร้อมแม่แรงไฮดรอลิกแบบสำเร็จได้ โดยทำการออกแบบ แม่พิมพ์ถ่านอัดแท่ง (Briquette mold) ที่สามารถอัดถ่านอัดแท่งได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นเหล็ก และแท่งอัด (Compressed stick) ขนาดสวมพอดีกับแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นเหล็ก การกำหนดระยะการกดอัดใช้เป็นไม้บรรทัดในการกำหนดระยะการกดอัดถ่านอัดแท่ง ขนาดของการออกแบบ

เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้นแสดงในภาคผนวก ก หัวข้อ ก.1 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้น

3.3.2 กำหนดระดับของตัวแปรต้นการทดลองขั้นต้น

ในการศึกษาการทดลองขั้นต้นนี้กำหนดตัวแปร 2 ตัว คือ ระยะการกดอัดและอัตราส่วนผสมของกลีเซอริน กำหนดให้ระดับของระยะการกดอัดทำให้ถ่านมีขนาดความสูง 20 mm, 23 mm และ 26 mm ทุกอัตราส่วนผสมเพื่อให้เปรียบเทียบได้ในเชิงความหนาแน่นนั้นมีผลอย่างไรกับตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ในส่วนของอัตราส่วนผสมถ่านแห้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรินกำหนดเป็น 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10 และ 85 : 15 ในการทดลองขั้นต้นนี้ตัวแปรตามที่ศึกษามี ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ และประสิทธิภาพการใช้ความร้อน

3.3.3 ผลิตถ่านอัดแท่งการทดลองขั้นต้น

3.3.3.1 เตรียมอัตราส่วนผสมผงถ่านแห้งมันสำปะหลังรวมกลีเซอริน : น้ำ : แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วนโดยมวล 1 : 1 : 0.15 ตามลำดับ (ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และ ชารินี มหายศนันท์, 2548) ขั้นตอนต่อมาละลายแป้งมันสำปะหลังในน้ำอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อน

ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 80 °C ถึง 100 °C เพื่อให้ไขมันละลายออก กวนจนแป้งมันสำปะหลังเป็น กาวข้นเหนียว จากนั้นผสมผงถ่านห้เจ้ามันสำปะหลังรวมกลีเซอรินจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนการ ผสมอธิบายให้เข้าใจในรูปที่ 3.9 อัตราส่วนผงถ่านห้เจ้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอรินและความสูงของ ถ่านอัดแท่งในการทดลองขึ้นต้นแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังและน้ำคองที่



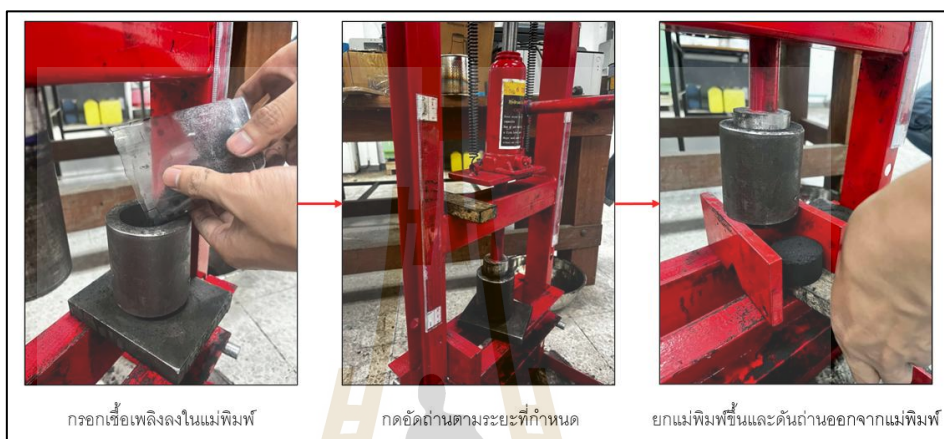
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการผสมส่วนผสม

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมและความสูงถ่านอัดแท่งการทดลองขึ้นต้น

ลำดับ	ผงถ่านห้เจ้ามันสำปะหลัง : กลีเซอริน	ความสูงถ่านอัดแท่ง (mm)
1	100 : 0	20
2		23
3		26
4	95 : 5	20
5		23
6		26
7	90 : 10	20
8		23
9		26
10	85 : 15	20
11		23
12		26

3.3.3.2 นำเชื้อเพลิงที่ผสมรวมแป้งมันสำปะหลังและน้ำแล้วมาอัดขึ้นรูปเป็นก้อน โดยเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขึ้นต้น ลักษณะการทำงานแบบงวด (Batch type)

ได้งวดละ 1 ก้อน โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน เป็นต้นกำลังในการอัดขึ้นรูป โดยชั่งมวลเชื้อเพลิงก้อนละ 40 g อัตราส่วนผสมละ 20 ก้อน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50.8 mm ขนาดตามแม่พิมพ์และความสูงตามตารางที่ 3.1 เพื่อเป็นการควบคุมความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งให้คงที่ ขั้นตอนอัดถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นตอนอธิบายดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนอัดถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นตอน

3.3.3.3 อบถ่านอัดแท่งด้วยตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม รุ่น UF110 ยี่ห้อ MEMMERT ดังแสดงรูปภาพที่ 3.11 อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อลดความชื้นของถ่านแทนการตากแดด



รูปที่ 3.11 การอบถ่านอัดแท่งไล่ความชื้น

3.3.4 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้นจัดทำขึ้นเพื่อประเมินความเหมาะสมและศักยภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนเข้าสู่การทดสอบเชิงลึกในขั้นตอนถัดไป โดยการทดสอบดังกล่าวมุ่งตรวจสอบคุณลักษณะเบื้องต้นที่จำเป็นต่อการใช้งานจริง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น และค่าความร้อน ผลการทดสอบพื้นฐานเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการพิจารณาว่าส่วนผสมและเงื่อนไขการผลิตในที่นี้คือความสูงของถ่านอัดแท่งที่ใช้สามารถให้ถ่านอัดแท่งที่มีความคงรูปและมีสมบัติพื้นฐานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการปรับปรุงกระบวนการก่อนเข้าสู่การทดสอบเชิงลึกในขั้นตอนต่อไป

3.3.4.1 ความชื้นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ในการหาความชื้นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้นั้น สามารถทำได้โดยนำถ่านที่ได้จากการอบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr แล้วมาสุ่มจำนวน 3 ก้อนมาบดละเอียดใส่ถ้วยสำหรับอบหาปริมาณความชื้น แสดงดังรูปที่ 3.12 อบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิระหว่าง 104 ถึง 110 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้น้ำในตัวอย่างระเหยออกจนหมด เพื่อทราบค่าความชื้น (Moisture content) ของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14 เป็นการวิเคราะห์ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173-11 (American Society for Testing and Materials, 2017) และได้ทำการหาความชื้นจากถ่านอัดแท่งทั่วไปจากกะลามะพร้าวนำมาเพื่อเปรียบเทียบกับ ค่าความชื้นรายงานในรูปเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (% w.b.)



รูปที่ 3.12 การอบหาปริมาณความชื้นถ่านอัดแท่ง

3.3.4.2 ความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้หาได้จากถ่านที่ผ่านการอบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr แล้วมาสุ่มจำนวน 3 ก้อน วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถ่านอัดแท่งโดยไม่ได้ให้นัยสำคัญกับการหลุดแตกหักไม่เต็มรูปทรง จากนั้นชั่งมวลของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ นำไปคำนวณตามสมการที่ 2.15 วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 (American Society for Testing and Materials, 2020) และได้ทำการหาความหนาแน่นจากถ่านอัดแท่งทั่วไปทำจากกะลามะพร้าวนำมาเพื่อเปรียบเทียบด้วย

3.3.4.3 ค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ทดสอบหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heating value) ซึ่งเป็นค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในหน่วยแคลลอรีต่อกรัมของเชื้อเพลิง (cal/g) โดยนำส่วนผสมได้แก่ ผงถ่านหะหมั่มสำหรับปาล์ม ก๊าซฮีทรีน แบงก์น้ำมันสำหรับปาล์ม และถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้มาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และค่าความร้อนที่วัดได้จากเครื่องเป็นค่า Higher Heating Value (HHV) เนื่องจากการทดสอบด้วยระบบ Bomb Calorimeter ซึ่งเป็นระบบปิดที่รวมความร้อนจากการควบแน่นของไอน้ำไว้ในค่าที่วัดได้ ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 (American Society for Testing and Materials, 2019) และได้ทำการหาค่าความร้อนจากถ่านอัดแท่งทั่วไปทำจากกะลามะพร้าวมาเพื่อเปรียบเทียบด้วย

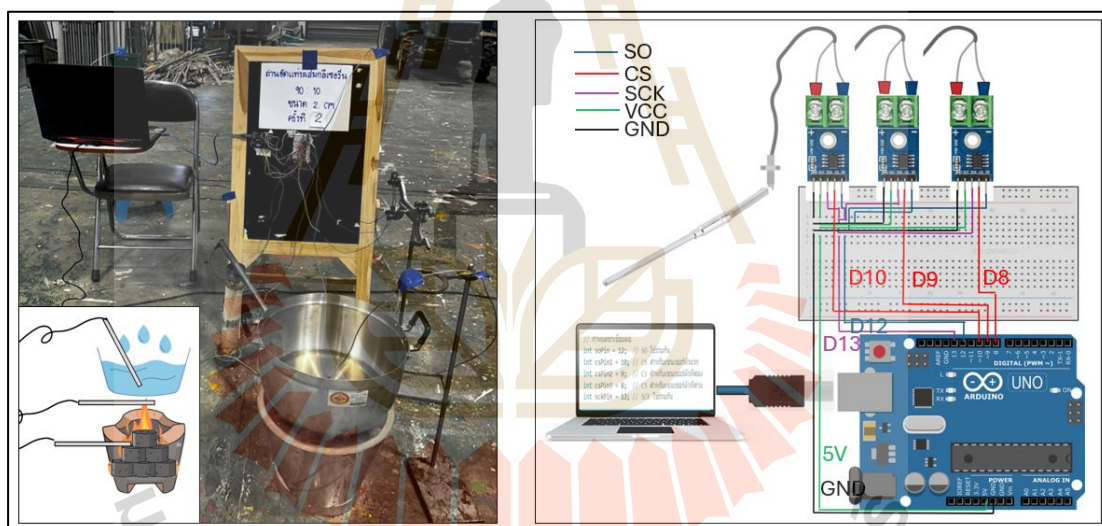


รูปที่ 3.13 เครื่อง Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG

3.3.5 ออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น

ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency %) หมายถึง ความสามารถของถ่านอัดแท่งในการแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไปเป็นความร้อนที่ใช้ในการให้ความร้อนกับน้ำ โดยมีการวัดผลจากพลังงานที่ใช้ในการให้พลังงานความร้อนกับน้ำและเปรียบเทียบกับพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งแห้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอริน เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้ความร้อน

ในการออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น ใช้ Arduino Uno R3 เป็นตัวเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ใช้ Sensor MAX6675 ต่อกับ Thermocouple Type K จำนวน 3 ชุด เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิ 3 ตำแหน่งคือ อุณหภูมิถ่าน อุณหภูมิห้องเผาไหม้ และ อุณหภูมิของน้ำ ทำการควบคุมอุณหภูมิน้ำจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำสูญเสียมวล โดยระบบการทดลองสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.14 และโค้ดที่ใช้การเก็บอุณหภูมิทุก 1 นาที แสดงดังภาคผนวก ก.2



รูปที่ 3.14 ระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น

ขั้นตอนการทดสอบโดยให้ถ่านอัดแท่งให้ความร้อนแก่แหล่งรับความร้อนในการทดลองขั้นต้นนี้ใช้เป็นน้ำ 1,000 g ต่อถ่านที่ผ่านการอบไล่ความชื้นอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 hr ในแต่ละอัตราส่วนผสมใช้ถ่านอัดแท่งในการทดลองต่อครั้ง 4 ก้อนรวมประมาณ 80 g ถึง 90 g โดยประมาณ ต่อ 1 การทดลอง ทำ 3 ซ้ำ โดยที่ให้ความร้อนแก่ถ่าน 2 นาที แสดงดังรูปที่ 3.15 เมื่อถ่านนั้นติดไฟ จากนั้นชั่งมวลก่อนการทดลองและนำไปใส่ในเตาประหยัดพลังงาน ตามหาเศรษฐี และบันทึกภาพถ่ายความร้อนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเครื่อง UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager แสดงดังรูปที่ 3.16 เริ่มต้นและหลังการทดลองสุดท้ายทำการชั่ง

มวลหลังการทดลองเพื่อทราบมวลของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ไป การทดลองรวมไปถึงถ่าน
กะลามะพร้าวทดสอบเพื่อเปรียบเทียบด้วย



รูปที่ 3.15 จุดติดไฟถ่านทดลองขึ้นต้น



รูปที่ 3.16 UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager

จากระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้นสามารถหาอัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพการใช้ความร้อนได้จากสมการ 2.18 และ 3.1 ตามลำดับ โดยที่สมการ 2.19 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency, %) ได้ปรับเปลี่ยนสมการให้เข้ากับการทดลองขั้นต้นได้ดังสมการที่ 3.1

$$HU = \frac{m_{water} c_{p,water} \Delta T_{water} + m_{pot} c_{p,pot} \Delta T_{pot}}{\Delta M_f Q_{HV}} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่	HU	คือ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (%)
	m_{water}	คือ มวลของน้ำ (g)
	$c_{p,water}$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.18 J/g·°C)
	ΔT_{water}	คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ (°C)
	m_{pot}	คือ มวลของหม้อต้มน้ำ (g)
	$c_{p,pot}$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของหม้ออะลูมิเนียม เกรด 1060 (0.896 J/g·°C)
	ΔT_{pot}	คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหม้อต้มน้ำ (°C)
	ΔM_f	คือ มวลของเชื้อเพลิงที่สูญเสีย (g)
	Q_{HV}	คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (J/g)

3.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลองขั้นต้น

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองขั้นต้นวิเคราะห์เพียง Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) เพื่อทราบถึงอัตราส่วนผสมของกลีเซอรินและระยะเวลาการกวดอัดถ่านอัดแท่งมีผลต่อ ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน อย่างไรเพื่อนำข้อมูลทีวิเคราะห์ได้นำไปพัฒนาการทดลองเชิงลึกต่อไป

3.3.6.1 วิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) การทดลองขั้นต้น

ในการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อดูค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มว่าแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics วิเคราะห์ได้เพียงชุดข้อมูลที่มีการเก็บค่าซ้ำ 3 ซ้ำ ค่าที่มีการเก็บค่าซ้ำได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน จะเห็นได้ว่า ค่าความร้อน ไม่มีการเก็บค่าซ้ำเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องทดสอบความร้อน

3.3.6.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง การทดลองขั้นต้น

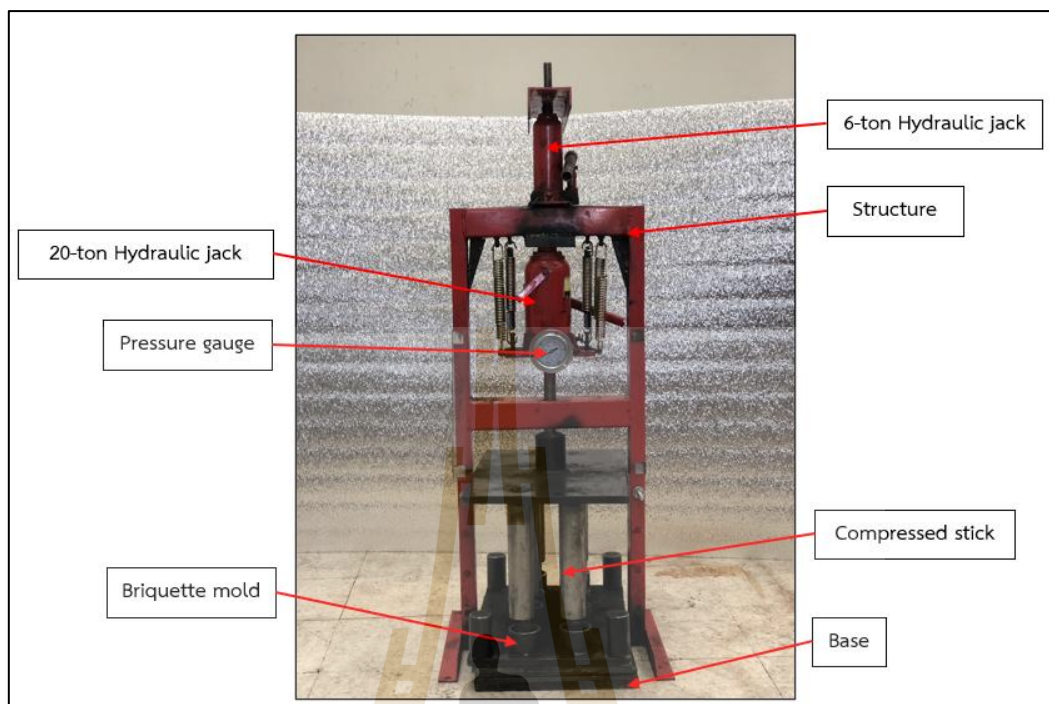
ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง ในโปรแกรม Minitab Statistical Software โดยที่ตัวแปรต้นคืออัตราส่วนผสมของกลีเซอรินและระยะเวลาการกดอัดถ่านอัดแท่ง มีผลต่อความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน หรือไม่ อย่างไร โดยทำการวิเคราะห์ทั้งแบบกรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) และการวิเคราะห์กรณีที่ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

3.4 การทดลองเชิงลึก

ภายหลังจากการทดลองขั้นต้นซึ่งใช้ประเมินความเป็นไปได้และคัดเลือกแนวโน้มของสูตรผสมและเครื่องอัดถ่านที่เหมาะสมแล้ว การทดลองเชิงลึกจึงถูกออกแบบขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งอย่างละเอียดและเป็นระบบมากยิ่งขึ้นและการพัฒนาเครื่องอัดถ่าน การทดลองในขั้นนี้มุ่งเน้นการควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างเข้มงวด และทำการทดสอบซ้ำเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยครอบคลุมการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านกายภาพ เชิงความร้อน และพฤติกรรมการเผาไหม้ รวมถึงมลพิษของถ่านอัดแท่งจากสูตรผสมที่ผ่านการคัดเลือก ผลที่ได้จะถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันผลจากการทดลองขั้นต้น และสนับสนุนการสรุปเชิงวิชาการ รวมถึงการประเมินศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในระดับที่สูงขึ้น

3.4.1 การพัฒนาเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน

จากการออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกสำหรับการทดลองเชิงลึก แสดงดังรูปที่ 3.17 พบว่าโครงสร้างของเครื่องอัดถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้นนั้นมีความเหมาะสมต่อการใช้งานด้านการอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่งในระดับการทดลอง โดยการพัฒนาจากการทดลองขั้นต้นเลือกใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน ในเครื่องอัดถ่านเชิงลึก ช่วยให้สามารถควบคุมความดันในการกดอัดได้อย่างเพียงพอและสม่ำเสมอ ขณะที่เพิ่มการติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ช่วยให้สามารถตรวจสอบและกำหนดความดันในการกดอัดในแต่ละรอบการทดลองได้อย่างแม่นยำ และใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตันตัวเดิมจากเครื่องอัดถ่านขั้นต้นเพื่อยกแม่พิมพ์ในการออกแบบให้สามารถคนเดียวทำงานได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์ (Briquette mold) ถ่านขนาด 54 mm และแกนอัด (Compressed stick) ทรงกระบอกตัน ทั้งสองใช้วัสดุเป็นเหล็กที่ออกแบบให้การขึ้นรูปถ่านเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพไม่เสียรูประหว่างการอัด ออกแบบและสร้างให้สามารถอัดถ่านได้งวดละ 8 ก้อน สะดวกโดยไม่เกิดการแตกร้าวหรือเสียรูป โดยขนาดของการออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นในการทดลองเชิงลึกแสดงในภาคผนวก ก หัวข้อ ก.3 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองเชิงลึก



รูปที่ 3.17 เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลอง

3.4.2 ตัวแปรต้นในการทดลอง

ในการศึกษาการทดลองเชิงลึกนี้กำหนดตัวแปร 2 ตัว คือ อัตราส่วนผสมของกลีเซอริน และความดันการกดอัด กำหนดให้ระดับความดันในการกดอัดถ่านอัดแท่งคือ 120, 150 และ 180 kg/cm^2 ในความดันนี้เป็นเชิงการทดลองเหมาะสำหรับเครื่องอัดถ่านที่พัฒนาขึ้นโดยกำลังอัดแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน สามารถอัดถ่านได้โดยโครงสร้างไม่เสียหายความดันอยู่ที่ 180 kg/cm^2 โดยความแตกต่างของความดันการกดอัดทุกอัตราส่วนผสม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เปรียบเทียบได้ในเชิงความหนาแน่นนั้นมีผลอย่างไรกับตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ในส่วนของอัตราส่วนผสมถ่านหะหมั่มสำหรับอัดถ่านอัดแท่งได้อยู่ที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 และอัตราส่วนผสมกลีเซอรินมากที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่งได้อยู่ที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 และในการทดลองเชิงลึกนี้ตัวแปรตามที่มีคือ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ มลพิษจากการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน

3.4.3 การผลิตถ่านอัดแท่งจากเครื่องอัดขนาด 20 ตัน

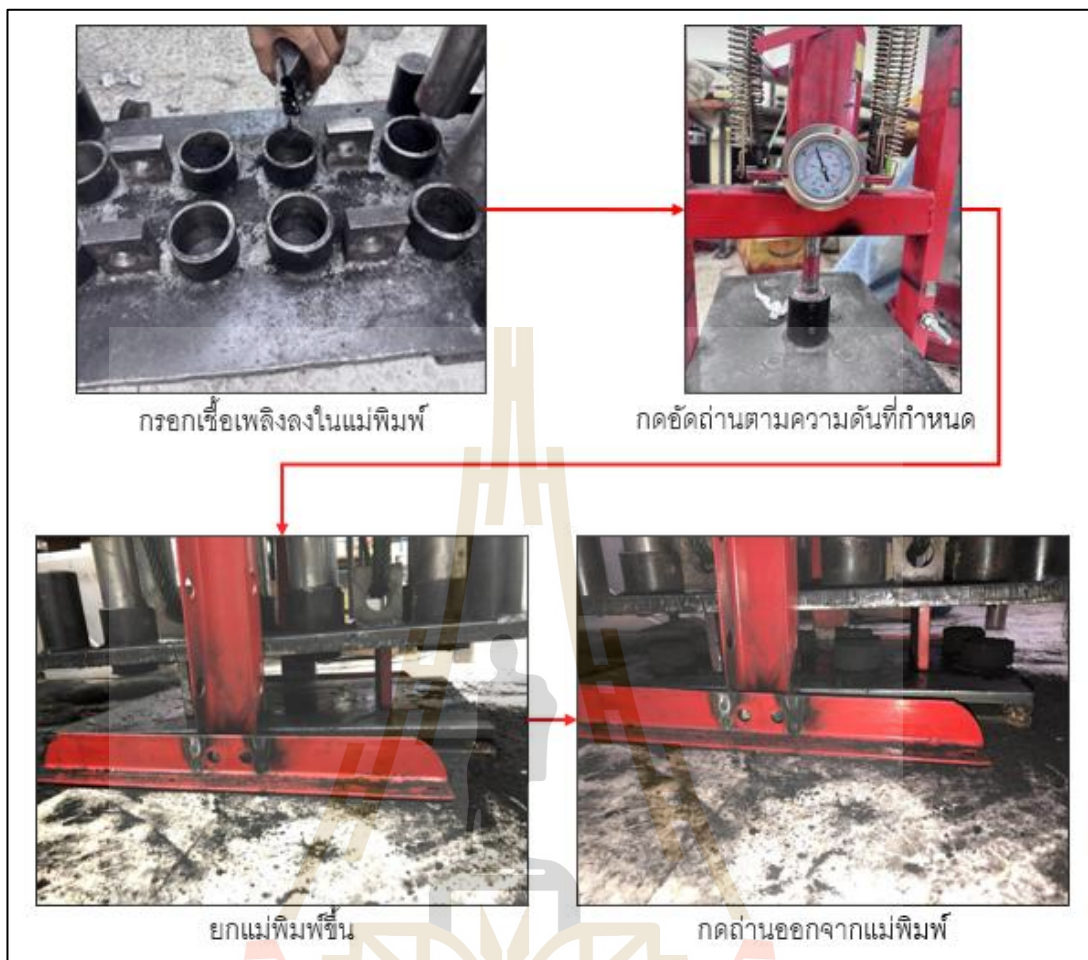
3.4.3.1 เตรียมอัตราส่วนผสมผงถ่านหะหมั่มสำหรับอัดรวมกลีเซอริน : น้ำ : แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วนโดยมวล 1 : 1 : 0.15 ตามลำดับ (ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และ ชาริน มหายุศนันท์, 2548) ขั้นตอนต่อมาละลายแป้งมันสำปะหลังในน้ำอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อนควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 80 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 100 $^{\circ}\text{C}$ จนแป้งมันสำปะหลังเป็นกาวข้นเหนียวจากนั้นผสมผงถ่าน

เหง้ามันสำปะหลังรวมกลีเซอรินจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนการผสมอธิบายให้เข้าใจในรูปที่ 3.9 วิธีการผสมเป็นดังการทดลองขั้นต้นทุกประการ อัตราส่วนผสมเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน และความดันในการกดอัดถ่วงน้ำหนักในการทดลองเชิงลึกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 โดยที่อัตราส่วนแบ่งมันสำปะหลังและน้ำคางที่

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมและความดันการกดอัดถ่วงน้ำหนักการทดลอง

ลำดับ	ผงถ่านเหง้ามันสำปะหลัง : กลีเซอริน	ความดันการกดอัด (kg/cm^2)
1	100 : 0	120
2		150
3		180
4	80 : 20	120
5		150
6		180
7	75 : 25	120
8		150
9		180
10	70 : 30	120
11		150
12		180

3.4.3.2 นำเชื้อเพลิงที่ผสมรวมแบ่งมันสำปะหลังและน้ำแล้วมาอัดขึ้นรูปเป็นก้อน โดยเครื่องอัดถ่วงแบบแม่แรงไฮดรอลิก ลักษณะการทำงานแบบงวด (Batch type) ได้งวดละ 8 ก้อน โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน เป็นต้นกำลังในการอัดขึ้นรูป โดยชั่งมวลเชื้อเพลิงก้อนละ 50 g อัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดละ 24 ก้อน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 54 mm ขนาดตามแม่พิมพ์และในแต่ละอัตราส่วนผสมความดันการกดอัดตารางที่ 3.2 เพื่อเป็นการควบคุมความหนาแน่นของถ่านอัดถ่วงให้คงที่ ขั้นตอนอัดถ่วงในการทดลองเชิงลึกอธิบายดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนอัดถ่านอัดแท่งในการทดลอง

3.4.3.3 อบถ่านอัดแท่งด้วยตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม รุ่น UF110 ยี่ห้อ MEMMERT ดังแสดงรูปภาพที่ 3.11 อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 hr เพื่อลดความชื้นของถ่านแทนการตากแดด

3.4.4 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานถ่านอัดแท่ง

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านอัดแท่งในการทดลองเชิงกลีมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่ได้จากอัตราส่วนผสมและความดันในการกดอัดที่กำหนดในระดับของตัวแปรต้น การทดสอบในขั้นนี้ครอบคลุมการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงพลังงานความร้อนที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งานจริง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง โดยดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุมเดียวกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ และเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการประเมินศักยภาพของถ่านอัดแท่งก่อนนำไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนถัดไป

3.4.4.1 ความชื้นถ่านอัดแท่ง

ในการหาความชื้นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้นั้น สามารถทำได้โดยนำถ่านที่ได้จากการอบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 hr แล้วมาสุ่มจำนวน 3 ก้อนมาบดละเอียดใส่ถ้วยสำหรับอบหาปริมาณความชื้น แสดงดังรูปที่ 3.12 อบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิระหว่าง 104 ถึง 110 °C เป็นเวลา 24 hr เพื่อให้น้ำในตัวอย่างระเหยออกจนหมด เพื่อทราบค่าความชื้น (Moisture content) ของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.14 เป็นการวิเคราะห์ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173-11 (American Society for Testing and Materials, 2017) โดยขั้นตอนการหาความชื้นเป็นดังการทดลองขั้นต้นทุกประการ และค่าความชื้นรายงานในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (% w.b.)

3.4.4.2 ความหนาแน่นถ่านอัดแท่ง

ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้หาได้จากถ่านที่ผ่านการอบไล่ความชื้น อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 hr แล้วมาสุ่มจำนวน 3 ก้อน วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถ่านอัดแท่งโดยไม่ได้ให้สัญญาณสำคัญกับการหลุดแตกหักไม่เต็มรูปทรง จากนั้นชั่งมวลของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ นำไปคำนวณตามสมการที่ 2.15 วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 (American Society for Testing and Materials, 2020) โดยขั้นตอนการหาความหนาแน่นเป็นดังการทดลองขั้นต้นทุกประการ

3.4.4.3 ค่าความร้อนถ่านอัดแท่ง

ทดสอบหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Heating value) ซึ่งเป็นค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในหน่วยแคลลอรีต่อกรัมของเชื้อเพลิง (cal/g) โดยนำ ถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้มาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และค่าความร้อนที่วัดได้จากเครื่อง IKA C5000 เป็นค่า Higher Heating Value (HHV) เนื่องจากเป็นการทดสอบด้วยระบบ Bomb Calorimeter ซึ่งเป็นระบบปิดที่รวมความร้อนจากการควบแน่นของไอน้ำไว้ในค่าที่วัดได้ ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 (American Society for Testing and Materials, 2019)

3.4.4.4 ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด

ความแข็งแรงต่อแรงกด (Compressive strength) ประเมินความสามารถของถ่านอัดแท่งในการต้านทานแรงกดอัดโดยไม่แตกหรือเสียรูปถาวร โดยทำการกดถ่านอัดแท่งด้วยแรงในแนวตั้งฉากต่อพื้นที่หน้าตัดอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเกิดการแตกหักหรือเสียรูปทำการทดสอบ 3 ซ้ำ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine; UTM) TTR/THAI Model MUL-

125 ขนาด 100 kN แสดงดังรูปที่ 3.19 ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 17831-2:2015 (International Organization for Standardization, 2015) โดยใช้หัวกดชนิดแผ่นเรียบ (Flat compression platens) ทั้งด้านบนและล่าง ทำจากโลหะแข็ง เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนหรือสแตนเลส มีผิวหน้าราบ เพื่อให้การกระจายแรงเป็นสม่ำเสมอ ควรมีขนาดอย่างน้อย 1.5 เท่าของขนาดหน้าตัดถ่านอัดแท่งเพื่อป้องกันการกระจุกแรง (Stress concentration)



รูปที่ 3.19 Universal Testing Machine (UTM) TTR/THAI Model MUL-125

3.4.5 ออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ต่อพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบหรือเกิดจากการเผาไหม้ ใช้เป็นตัวชี้วัดความสามารถของระบบในการเปลี่ยนพลังงานให้เกิดประโยชน์ โดยมักแสดงค่าเป็นร้อยละ (%) ยิ่งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แสดงว่าระบบมีการสูญเสียพลังงานน้อยและใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

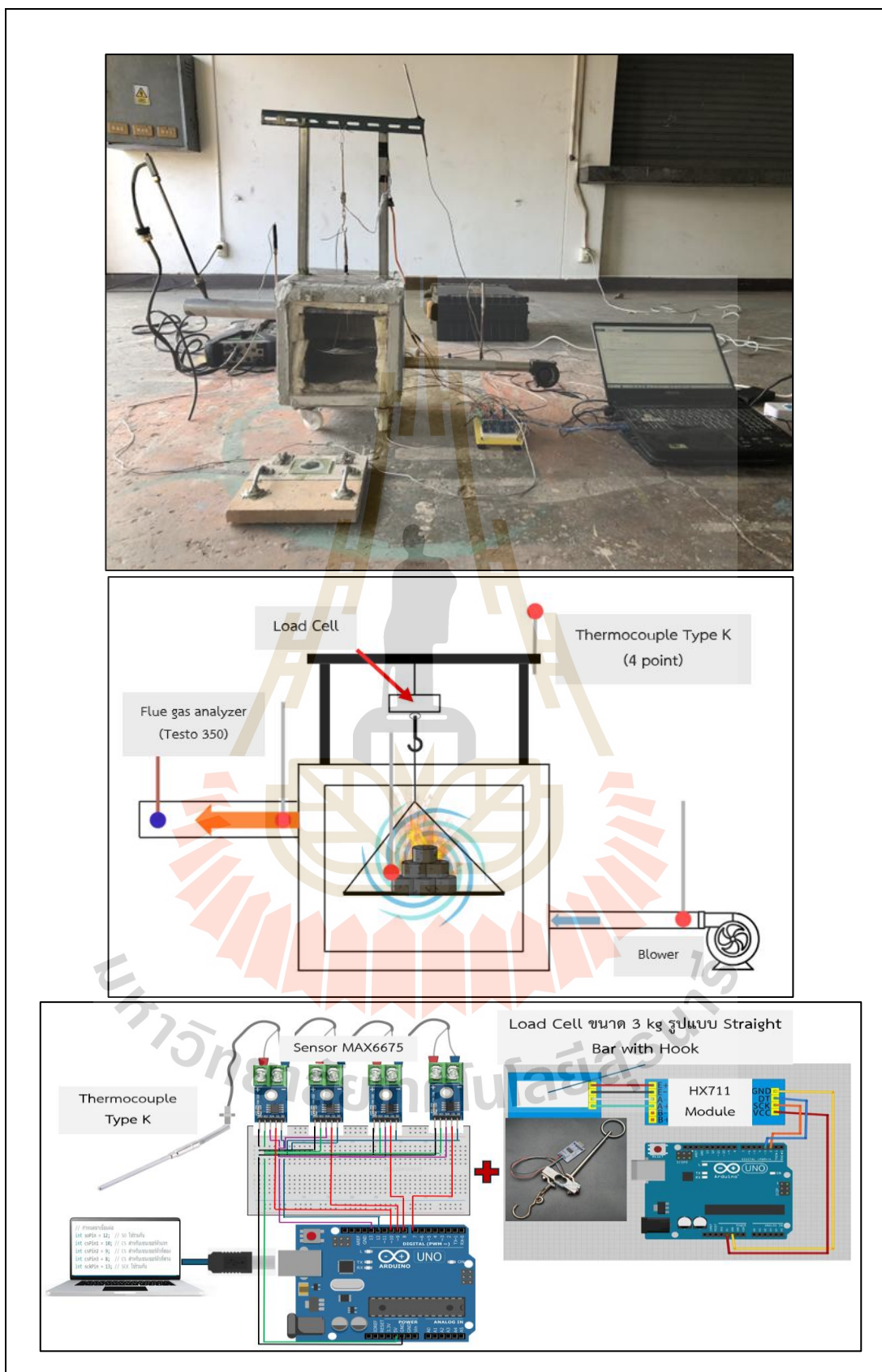
ในการออกแบบสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อนเชิงลึกห้องเผาไหม้มีรูปทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งทำจากอิฐทนไฟ 1,300 °C หนา 25 mm (1 inch) เพื่อเป็นฉนวนป้องกันความร้อนออกสู่ระบบ ท่อทางเข้าและทางออกของอากาศใช้เป็นท่ออะลูมิเนียม ติดตั้งช่องกระจกด้านหน้าเพื่อดูเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งขณะเผาไหม้ ขนาดและตำแหน่งต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้แสดงดังภาพผนวก ก.4 ให้อากาศในห้องเผาไหม้โดยพัดลมหอยโข่ง (Blower) ปรับรอบได้ 12 V DC ขนาดท่อ 27 mm โดยวัดความเร็วลมจากเครื่อง UNI-T UT363 Mini Digital Anemometer ในส่วนของอุปกรณ์การบันทึกค่าใช้ดังต่อไปนี้ Arduino Uno R3 เป็นตัวเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ ใช้ Sensor MAX6675 ต่อกับ Thermocouple Type K ค่าความผิดพลาดรวมจะอยู่ประมาณ ± 2 ถึง ± 4 °C จำนวน 4 ชุด เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิ 4 ตำแหน่งคือ อุณหภูมิทางเข้า อุณหภูมิห้องเผาไหม้ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ อุณหภูมิทางออก โดยใช้ Load Cell ขนาด 3 kg รูปแบบ Straight Bar with Hook ร่วมกับ HX711 Module ต่อกับตะแกรงลวดเพื่อชั่งมวลของเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องระหว่างการเผาไหม้และได้ทำการสอบเทียบ

เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการเก็บค่ามวลของเชื้อเพลิงแสดงในภาคผนวก ก.5 และใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 ดังแสดงรูปที่ 3.20 เพื่อวัดค่าของออกซิเจน (O_2), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่ท่อทางออกของห้องเผาไหม้ ระบบการทดลองเชิงความร้อนเชิงลึกสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.21 และโค้ดที่ใช้การเก็บอุณหภูมิและมวลทุก 1 นาที แสดงดังภาคผนวก ก.6



รูปที่ 3.20 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 ในการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.21 ระบบการทดลองเชิงความร้อน

3.4.5.1 อัตราการไหลอากาศ

ในการทดลองเชิงลึกด้านการเผาไหม้ การกำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อน งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องใช้ โดยอาศัยหลักการเผาไหม้เชิงสโตอิชิโอเมตริร่วมกับสมบัติทางกายภาพของอากาศการคำนวณดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขการทดลอง เพื่อควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเผาไหม้ให้มีความสอดคล้องกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเชิงลึก ซึ่งช่วยให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง สามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างเป็นระบบ และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการจ่ายอากาศที่ไม่เหมาะสม การเผาไหม้ของก้อนชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูงระหว่าง 400 ถึง 700 kg/m³ มักจะใช้อากาศทฤษฎี 150 ถึง 250 % (Mitchell et al., 2016; Wakchaure & Sharma, 2007) ในการทดลองเชิงลึกกำหนดอัตราการไหลอากาศดังแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศแสดงในภาคผนวก ข.3

ตารางที่ 3.3 อัตราการไหลอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้การทดลอง

อัตราส่วนผสม (ผงถ่านหะหมั่น สำหรับ : กลีเซอริน : แป้งมัน	อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้			
	100 % (อากาศพอดี)		200 % (อากาศเกิน)	
สำหรับ : โดยมวล	(m ³ /h)	(m/s)	(m ³ /h)	(m/s)
100 : 0 : 15	4.10	1.99	8.20	3.98
80 : 20 : 15	3.68	1.78	7.36	3.56
75 : 25 : 15	3.57	1.73	7.14	3.46
70 : 30 : 15	3.47	1.68	6.94	3.36

การเพิ่มกลีเซอรินในส่วนผสมทำให้อัตราการป้อนอากาศที่ต้องใช้ลดลง เนื่องจากกลีเซอรินเป็นสารที่มีสัดส่วนออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุลอยู่แล้วและมีความสามารถระเหยได้ดี เมื่อเผาไหม้จะเกิดการระเหยและสลายตัวได้ง่าย ช่วยเริ่มการเผาไหม้และสนับสนุนปฏิกิริยาออกซิเดชันของเชื้อเพลิงโดยรวม ทำให้เชื้อเพลิงติดไฟได้ดีขึ้นและเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นในปริมาณอากาศที่น้อยกว่า นอกจากนี้ กลีเซอรินยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการเผาไหม้ ลดการสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 และมีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปริมาณอากาศที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้โดย Potip and Wongwuttanasatian (2018) ได้รายงานการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบสุดท้ายของกากกาแฟที่ใช้แล้ว spent coffee ground (SCG) และกลีเซอรินดิบ การเผาไหม้ในอากาศทฤษฎี 100 % อัตราการไหลของอากาศที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ของก้อนเชื้อเพลิงในอากาศทฤษฎี 100

% และมีอัตราส่วนต่าง ๆ ของ 100:0, 95:5 และ 90:10 จะได้อัตราการไหลของอากาศที่ 2.26, 2.23 และ 2.20 m³/hr ตามลำดับ

3.4.5.2 ขั้นตอนการทดลองเชิงความร้อน

กำหนดความเร็วลมโดยวัดความเร็วลมที่ท่อของพัดลมหอยโข่ง (Blower) ปรับรอบได้ 12 V DC ขนาดท่อ 27 mm โดยวัดความเร็วลมจากเครื่อง UNI-T UT363 Mini Digital Anemometer ตามตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการทดลองในส่วนของอากาศทฤษฎี 100 % นำถ่านแต่ละอัตราส่วนจำนวน 3 ก้อน เข้าห้องเผาไหม้และทำการจุดติดไฟเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ถ่านติดไฟ จากนั้นปิดประตูห้องเผาไหม้ ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ มวล และ มลพิษ แล้วกดรันโค้ดที่เขียนไว้เพื่อเก็บค่าทุก 1 นาที ในส่วนของการเก็บค่ามลพิษโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Testo 350 ดังแสดงรูปที่ 3.20 เก็บค่าของออกซิเจน (O₂), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ท่อทางออกของห้องเผาไหม้ แบ่งเก็บค่าสามช่วงคือ ช่วงเริ่มเผาไหม้ ช่วงมวลครึ่งหนึ่ง และมวลเหลือ 10 g ถึง 20 g สังเกตลักษณะควันที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ ช่วงนี้เก็บภาพถ่ายความร้อนด้วย UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager แสดงดังรูปที่ 3.16 จากนั้นสุดท้ายเมื่อมวลคงที่แล้วทำการบันทึกค่าลง Excel แล้วนำถ่านออกจากห้องเผาไหม้ ทำเช่นเดียวกันทุกสูตรของถ่านอัดแท่งที่ผลิตขึ้นในเชิงลึกและทำจำนวน 3 ซ้ำ ในขั้นตอนการทดลองนี้สามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทดลองเชิงความร้อน

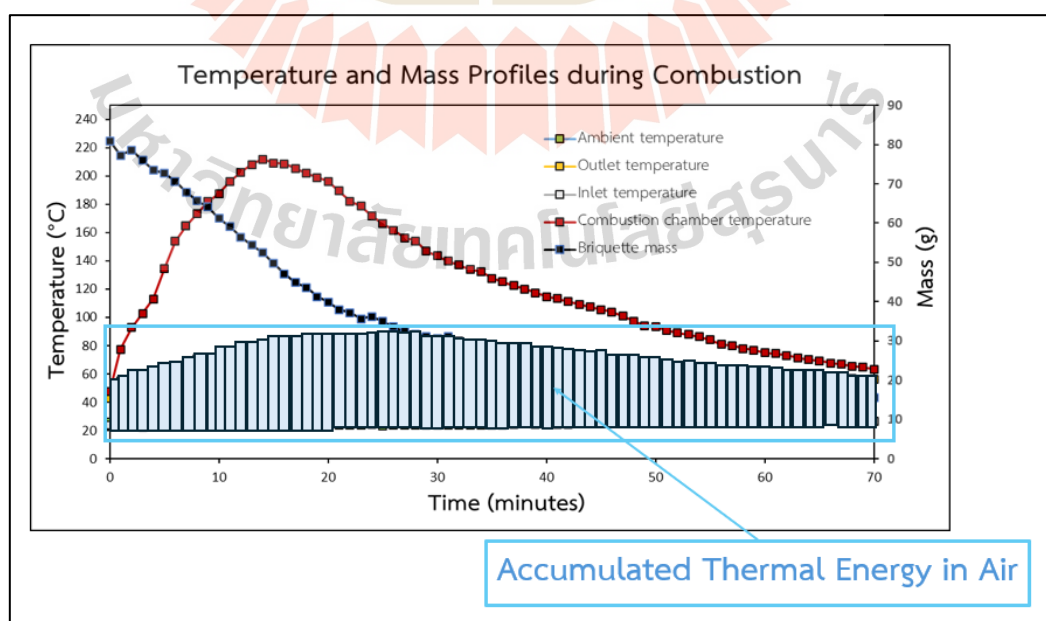
ในส่วนของอากาศทฤษฎี 200 % ทำเหมือนการทดลองในส่วนของอากาศทฤษฎี 100 % ทุกประการแต่ไม่ได้ทำการวัดมวลพิษเนื่องจากอากาศเพียงพอแล้วในอากาศทฤษฎี 100 % ดังนั้นจึงไม่วัดมวลพิษในส่วนของอากาศทฤษฎี 200 % และทำการทำการทดลองซ้ำเพียง 2 ซ้ำ

3.4.6 การคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อน

จากระบบทดลองเชิงความร้อนที่บันทึกค่ามวลเริ่มต้นและสิ้นสุด ในส่วนของอุณหภูมิเก็บค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้ ส่วนเวลาบันทึกทุก 1 นาที จากการบันทึกค่าทั้งหมดเพื่อคำนวณหาอัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งหมดนี้คำนวณภายใต้การเผาไหม้ช่วง 70 นาที ได้ดังต่อไปนี้

อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) การคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ได้จากการบันทึกค่ามวลเริ่มต้นและมวลที่เหลือหลังจากการเผาไหม้ไป 70 นาที สามารถได้จากสมการ 2.18

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) สำหรับระบบการไหลแบบ Steady-flow สมดุลพลังงานของ Control volume ภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสูญเสียพลังงาน (No heat losses) รวมถึงมวลไอเสียของการเผาไหม้มีค่าน้อยมากไม่นำมาคำนวณ และไม่มีการเชิงกล รวมถึงการละเว้นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ และไม่คำนวณค่าไฟของพัดลมป้อนอากาศเข้า สามารถคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการบันทึกอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.20 หลักการคำนวณคือหาพื้นที่ใต้กราฟในช่วง 1 นาที หรือทุก 60 วินาที และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิระหว่าง 1 นาที แล้วรวมทั้งหมดภายใน 70 นาที เทียบกับพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ถ่ายเทความร้อนให้สู่ระบบทั้งหมด อธิบายการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แนวคิดการหาพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศจากพื้นที่ใต้กราฟ

รูปที่ 3.23 แสดงแนวคิดการประเมินพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศโดยอาศัยพื้นที่ใต้กราฟตามเวลา Accumulated Thermal Energy in Air แทนพลังงานความร้อนสะสมที่อากาศได้รับ ซึ่งอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากทางเข้าสู่ทางออกสะท้อนถึงปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ อย่างต่อเนื่อง (ทุก 1 นาที) แล้วนำมารวมตลอดระยะเวลาการเผาไหม้ จะเทียบเท่ากับการหาพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิกับเวลาเป็นไปตามสมการที่ 2.20 พื้นที่ดังกล่าวจึงแทนพลังงานความร้อนสะสมที่ถ่ายเทจากห้องเผาไหม้สู่อากาศ จากนั้นนำพลังงานที่อากาศได้รับไปเปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบว่า พลังงานจากการเผาไหม้ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์กับอากาศได้มากน้อยเพียงใด

3.4.7 วิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเชิงลึกวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) เพื่อทราบถึงอัตราส่วนผสมของกลีเซอรินและความดันการกดอัดถ่านอัดแท่งมีผลต่อ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด ค่าความร้อน มลพิษ อุณหภูมิสูงสุด อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน อย่างไรเพื่อนำข้อมูลทีวิเคราะห์และสรุปแนวโน้มได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ

3.4.7.1 วิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) การทดลอง

ในการวิเคราะห์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อดูค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มว่าแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics วิเคราะห์ได้เพียงชุดข้อมูลที่มีการเก็บค่าซ้ำ ค่าที่มีการเก็บค่าซ้ำได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด มลพิษ อุณหภูมิสูงสุด อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน จะเห็นได้ว่า ค่าความร้อน ไม่มีการเก็บค่าซ้ำเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องทดสอบความร้อน ทั้งหมดวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

3.4.7.2 วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางการทดลอง

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) ในโปรแกรม Minitab Statistical Software โดยที่ตัวแปรต้นคืออัตราส่วนผสมของกลีเซอรินและความดันการกดอัดถ่านอัดแท่ง มีผลต่อความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน หรือไม่อย่างไร โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมดแบบกรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) และการวิเคราะห์กรณีที่ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) คือ ค่าความร้อนเพียงตัวแปรตามเดียว ทั้งหมดวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้นำเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลตามลำดับขั้นตอนการดำเนินงานที่ได้วางแผนไว้ ตั้งแต่การเตรียมส่วนผสม การทดลองขั้นต้น และการทดลองเชิงลึก สุดท้ายจึงนำผลลัพธ์ทั้งหมดมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ อภิปรายผลตามวัตถุประสงค์และตัวแปรที่ศึกษา และสังเคราะห์ข้อค้นพบที่ได้จากการทดลองทั้งสองช่วง เพื่อสะท้อนประสิทธิผลของการออกแบบและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

4.1 ผลของการเตรียมส่วนผสม

การเตรียมส่วนผสมเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของถ่านอัดแท่ง ทั้งในด้านความคงรูป และสมบัติทางความร้อน การวัดปริมาณและการผสมวัตถุดิบให้มีความสม่ำเสมอจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ในขั้นตอนการผลิตและพฤติกรรมของการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งที่ได้ ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการเตรียมส่วนผสมที่ประกอบด้วยถ่านหังน้ำมันสำปะหลัง กลิเซอริน และค่าความร้อนของส่วนผสม

4.1.1 ผลของการผลิตถ่านหังน้ำมันสำปะหลัง

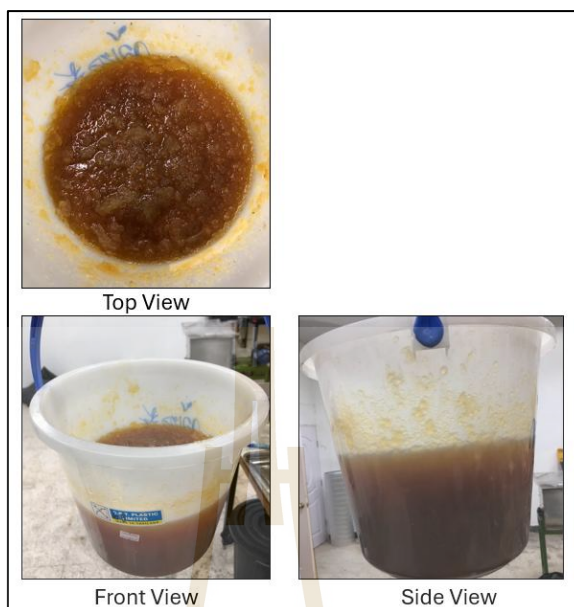
ในการผลิตถ่านหังน้ำมันสำปะหลังจากถึงเผาให้ความร้อนกับหังน้ำมันสำปะหลัง ปริมาณ 20 kg ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนหรือออกซิเจนน้อยมาก ด้วยอุณหภูมิประมาณ 300 °C ถึง 700 °C ถ่านที่ได้มีสีดำสม่ำเสมอเป็นถ่านทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.1 และปริมาณที่ได้จากหังน้ำมันสำปะหลังเป็นถ่านหังน้ำมันสำปะหลังผลที่ได้คือครึ่งต่อครึ่งของ 1 การเผาต่อ 1 เตาเผา ซึ่งบางส่วนเป็นเศษชิ้นเล็ก ๆ ที่หลุดออกมานั้นคือเปลือกหังน้ำมันสำปะหลังทางผู้วิจัยได้คัดเลือกเฉพาะถ่านหังน้ำมันสำปะหลังที่เป็นชิ้น



รูปที่ 4.1 ผลของการผลิตถ่านหังน้ำมันสำหรับ

4.1.2 ผลของการผลิตกลีเซอริน

การสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน โดยใช้ไขมันพืช ครั้งละ 5 L เมทานอล 1.25 L (25% โดยปริมาตรของน้ำมัน) และโซดาไฟ 25 g พบว่า ปริมาณไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 ครั้งมีค่าอยู่ในช่วง 3.6 L – 4.5 L คิดเป็นมวล 3,041.82 g – 3,699.61 g โดยมีค่าเฉลี่ยไบโอดีเซลเท่ากับ 4.05 ± 0.37 L ($3,414.21 \pm 276.64$ g) ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.84 ± 0.2 kg/L แสดงให้เห็นว่าปริมาณไบโอดีเซลที่ได้มีความใกล้เคียงกันในแต่ละครั้งใน ส่วนของผลพลอยได้ คือ กลีเซอริน พบว่ามีปริมาณอยู่ในช่วง 779.07 g – 1,781.55 g โดยมีค่าเฉลี่ย $1,238.97 \pm 439.98$ g และมวลรวมกลีเซอรินอยู่ที่ 4,955.88 g ซึ่งเพียงพอสำหรับการวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.2 ในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงให้เห็นว่าปริมาณกลีเซอรินมีความผันแปรค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไบโอดีเซล ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการกวนผสม อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการแยกชั้นของสารแต่ละครั้ง อัตราส่วนมวลกลีเซอรินต่อไบโอดีเซล (Glycerin/Biodiesel ratio) มีค่าอยู่ในช่วง 0.23 – 0.59 และมีค่าเฉลี่ย 0.37 ± 0.16 ซึ่งบ่งชี้ว่า ปริมาณผลพลอยได้มีแนวโน้มลดลงในบางรอบการทดลอง สอดคล้องกับปริมาณไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในแต่ละรอบที่แตกต่างกัน และมีงานวิจัย รายงานว่าเมื่อผลิตไบโอดีเซล 1 ตัน จะได้กลีเซอรินเป็นผลพลอยได้ประมาณ 0.11 ตัน (Behr et al., 2008) ในการทดลองนี้ถ้าผลิตไบโอดีเซล 1 ตัน ได้กลีเซอรินประมาณ 0.28 ตัน อัตราส่วนที่กล่าวมามี ค่าใกล้เคียงกัน แต่ในการทดลองได้กลีเซอรินที่เยอะกว่างานวิจัยเนื่องจากเป็นวิจัยเชิงการทดลอง ข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวถึงแสดงในตารางที่ ข.1 และ ตารางที่ ข.2



รูปที่ 4.2 กลีเซอรินทั้งหมดที่ได้จากการสกัดไบโอดีเซล

4.1.3 ค่าความร้อนของส่วนผสม

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นสมบัติพื้นฐานที่สะท้อนถึงศักยภาพด้านพลังงานและประสิทธิภาพในการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะในกรณีของถ่านอัดแท่งซึ่งถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ค่าความร้อนเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของส่วนผสมที่ใช้ โดยค่าความร้อนของส่วนผสมแสดงที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อนของส่วนผสม

Raw materials	Heating value (cal/g)
Cassava rhizome charcoal powder	5,947
Glycerin	7,612
Cassava starch	3,563

จากตารางที่ 4.1 พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกลีเซอรินให้ค่าความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 7,612 cal/g รองลงมาคือผงถ่านเหง้ามันสำหรับที่มีค่าความร้อน 5,947 cal/g และแป้งมันสำหรับซึ่งมีค่าความร้อนต่ำที่สุดเท่ากับ 3,563 cal/g ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนถึงศักยภาพเชิงพลังงานของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ไม่เท่ากัน โดยกลีเซอรินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีสมบัติด้านพลังงานสูง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อช่วยเพิ่มค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ในขณะที่ผงถ่านเหง้ามันสำหรับทำหน้าที่เป็นส่วนผสมหลัก ส่วนแป้งมันสำหรับแม้มีค่าความร้อนต่ำ แต่มีบทบาทเชิง

โครงสร้างมากกว่าการให้พลังงาน สรุปได้ว่าวัตถุดิบแต่ละชนิดมีบทบาทแตกต่างกัน ทั้งในด้านศักยภาพพลังงานและหน้าที่เชิงโครงสร้าง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญต่อการผลิตถ่านอัดแท่ง

4.2 ผลของการทดลองขั้นต้น

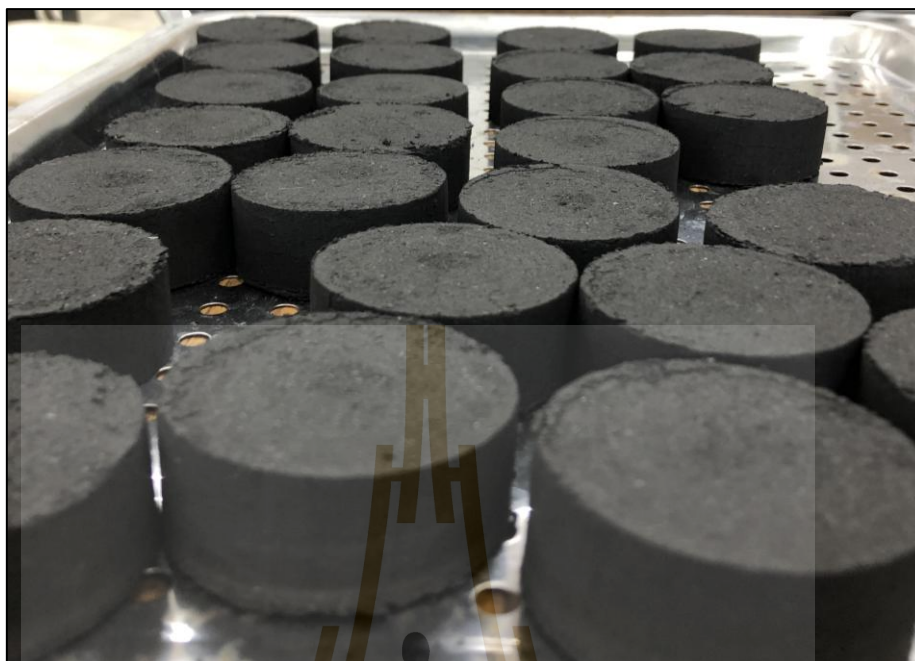
ผลของการทดลองขั้นต้นมีความสำคัญในการประเมินความเป็นไปได้ของการผลิตถ่านอัดแท่ง และตรวจสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของส่วนผสมก่อนเข้าสู่การทดสอบเชิงลึก การทดลองในขั้นนี้ มุ่งเน้นผล ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ และประสิทธิภาพการใช้ความร้อน จากอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันและความสูงถ่านอัดแท่งที่ต่างกัน ผลที่ได้ช่วยสะท้อนความเหมาะสมของวัตถุดิบและเงื่อนไขการผลิต ตลอดจนเป็นแนวทางในการปรับปรุงส่วนผสมและวิธีการอัดถ่านอัดแท่งเพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพสอดคล้องกับมาตรฐาน และพร้อมสำหรับการทดสอบคุณสมบัติในการทดสอบเชิงลึกต่อไป

4.2.1 ผลออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้น

ในการออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองขั้นต้นแสดง ดังรูปที่ 3.8 ผลได้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกแบบวง (Batch type) โดยแม่แรงไฮดรอลิกกำลังการอัด 6 ตัน สามารถอัดถ่านได้วงละ 1 ก้อน ต่อการกดอัด 1 ครั้งใช้เวลาประมาณ 4 นาที คิดเป็นกำลังการผลิตในหนึ่งวันทำงาน 8 ชั่วโมงจะสามารถอัดถ่านได้ 120 ก้อน แต่ในการบวนการกดแม่แรงไฮดรอลิกเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมากเนื่องจาก ในการกดอัด 1 กระบวนการได้ถ่านอัดแท่งเพียง 1 ก้อน ผลที่ได้จึงนำไปสู่การพัฒนาเครื่องอัดถ่านในการทดลองเชิงลึกต่อไป

4.2.2 ผลลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านเห้งจ๋ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินในการทดลองขั้นต้น โดยเครื่องอัดถ่านแบบวง (Batch type) โดยแม่แรงไฮดรอลิกกำลังการอัด 6 ตัน ที่ได้ ออกแบบและสร้างในการทดลองขั้นต้น ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้จากกระบวนการผลิตแสดงในรูปที่ 4.3 และเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ในด้านลักษณะทั่วไปของถ่านอัดแท่ง และในตารางที่ 4.2 แสดงมวลและขนาดของถ่านอัดแท่งจากถ่านเห้งจ๋ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินที่ผลิตได้ในการทดลองขั้นต้น โดยค่าทั้งหมดในตารางทำการเก็บค่า 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.3 ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้การทดลองขั้นต้น

จากการผลิตถ่านอัดแท่งได้เป็นรูปทรงกระบอกตัน พบว่าอัตราส่วนผสมของผงถ่าน
 เหล้ามันสำปะหลังต่อกลิเซอริน และสูงของถ่านอัดแท่ง มีผลต่อรูปทรงและความสมบูรณ์ของถ่านอัด
 แท่งอย่างชัดเจน โดยอัตราส่วน 100:0 ไม่มีกลิเซอรินความสูงถ่านอัดแท่ง 20 mm, 23 mm และ 26
 mm ให้ถ่านที่แน่น แข็งแรง และมีรูปทรงคงตัวดี แม้ใช้ระยะการกดอัดที่ต่ำจะได้ความสูงถ่านที่มาก
 เนื่องจากตัวประสานในการวิจัยนี้คือแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นกาวที่ยึดติดระหว่างส่วนผสมได้ดี แต่
 การเพิ่มขึ้นของกลิเซอรินส่งผลให้ตัวยึดประสานมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากกลิเซอรินมีคุณสมบัติ
 เป็นน้ำมัน ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นกาวที่เหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนให้เห็นว่าการใส่กลิ
 เซอรินมากเกินไปอาจทำให้ถ่านสูญเสียความแข็งแรง ในขณะที่อัตราส่วน 95 : 5, 90 : 10 และ 85 :
 15 ทุกความสูงของถ่านอัดแท่ง ถ่านมีลักษณะผิวเรียบ เนื่องจากกลิเซอรินทำให้ผิวเรียบและเงา แต่
 ความสูงที่สุด 26 mm ที่ระดับความกดอัดน้อยที่สุดจะมี ความแข็งแรง ความคงรูป น้อยกว่าความสูง
 20 mm และ 23 mm ทั้งนี้ลักษณะของถ่านอัดแท่งทุกอัตราส่วนผสมและทุกความสูงของถ่านอัดแท่ง
 ยังสอดคล้องกับข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ซึ่งระบุว่าถ่านอัดแท่งควรมี
 รูปทรงเดียวกัน ขนาดใกล้เคียงกัน สีดำสม่ำเสมอ ไม่เปราะ อาจแตกหักได้บ้าง ผลของลักษณะของ
 ถ่านอัดแท่งจากเหล้ามันสำปะหลังผสมกลิเซอรินที่ได้ในการทดลองขั้นต้นนั้นมียุทธศาสตร์ในการทำการ
 ทดลองเชิงลึกต่อไป เช่น ในการศึกษาการทดลองขั้นต้นนั้นเห็นว่าการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งที่ได้จากเครื่อง
 อัดถ่านแบบหวด (Batch type) โดยแม่แรงไฮดรอลิกเป็นต้นกำลังสามารถเพิ่มอัตราส่วนของกลิเซอริน
 ได้มากกว่านี้ได้

ตารางที่ 4.2 มวลและขนาดของถ่านอัดแท่งการทดลองขั้นต้น

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Height experimental (Mean $\pm$ SD) (mm)	Diameter (Mean $\pm$ SD) (mm)	Mass (Mean $\pm$ SD) (g)
100 : 0	20	20.47 $\pm$ 0.40	50.80 $\pm$ 0.10	22.22 $\pm$ 0.54
	23	23.13 $\pm$ 0.12	50.67 $\pm$ 0.15	22.43 $\pm$ 0.55
	26	25.90 $\pm$ 0.46	50.47 $\pm$ 0.12	22.06 $\pm$ 0.36
95 : 5	20	21.27 $\pm$ 0.21	51.83 $\pm$ 0.15	23.26 $\pm$ 0.22
	23	23.57 $\pm$ 0.25	51.00 $\pm$ 0.17	22.96 $\pm$ 0.36
	26	25.73 $\pm$ 0.55	50.87 $\pm$ 0.12	22.80 $\pm$ 0.29
90 : 10	20	20.33 $\pm$ 0.35	51.97 $\pm$ 0.21	21.97 $\pm$ 0.21
	23	22.77 $\pm$ 0.59	50.93 $\pm$ 0.47	22.63 $\pm$ 0.63
	26	26.50 $\pm$ 0.20	50.77 $\pm$ 0.06	22.96 $\pm$ 0.85
85 : 15	20	20.47 $\pm$ 0.23	51.50 $\pm$ 0.30	22.45 $\pm$ 0.07
	23	23.33 $\pm$ 0.21	50.87 $\pm$ 0.15	22.74 $\pm$ 0.10
	26	26.27 $\pm$ 0.38	50.70 $\pm$ 0.20	22.82 $\pm$ 0.34
Total			51.03 $\pm$ 0.49	22.61 $\pm$ 0.52

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของถ่านห้ำมันสำปะหลังต่อกลีเซอรินและความสูงของถ่านอัดแท่ง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ่านอัดแท่งทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 50.47 – 51.97 mm สะท้อนถึงประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ออกแบบไว้ 50.8 mm ในการควบคุมมิติด้านเส้นผ่านศูนย์กลางได้อย่างสม่ำเสมอ ขณะเดียวกันความสูงที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับความสูงที่กำหนดจากการควบคุม 20, 23 และ 26 mm ในทุกอัตราส่วนผสม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถควบคุมความสูงของชิ้นทดสอบได้อย่างแม่นยำ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถ่านอัดแท่งที่ได้นั้น มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยอาจเกิดจากการคั่นตัวของส่วนผสมหลังการอัดและการเรียงตัวของอนุภาคภายในเนื้อถ่าน สำหรับด้านมวล พบว่ามวลของทุกอัตราส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากในการผลิตถ่านอัดแท่งซึ่งมวลของส่วนผสมโดยมวลทำให้มวลที่ระเหยออกไปมีเพียงน้ำและมวลที่แสดงเหลือเพียงมวลของเชื้อเพลิง อีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลอยู่ในระดับต่ำอยู่ที่ 51.03 ± 0.49 mm และ 22.61 ± 0.52 g ตามลำดับ บ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของตัวอย่างที่ผลิตได้ ส่งผลให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ

4.2.3 ผลความชื้นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่ง โดยเฉพาะด้านการเผาไหม้ ความร้อนที่ได้ และการเกิดควันในระหว่างการใช้งาน ถ่านอัดแท่งที่มีความชื้นสูงจะทำให้การติดไฟยาก ให้ค่าความร้อนต่ำ และเกิดควันมากกว่าปกติ ดังนั้นในการทดลองขั้นต้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าความชื้นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อประเมินผลกระทบของส่วนผสมต่อคุณสมบัติด้านความชื้นของถ่านอัดแท่ง ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นพื้นฐานในการพิจารณาคุณภาพถ่านอัดแท่ง และสนับสนุนการอธิบายผลด้านสมบัติการเผาไหม้ในลำดับถัดไปของงานวิจัย แสดงในตารางที่ 4.3 โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 238/2547 ในด้านความชื้น (Moisture content) ไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 ผลความชื้นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

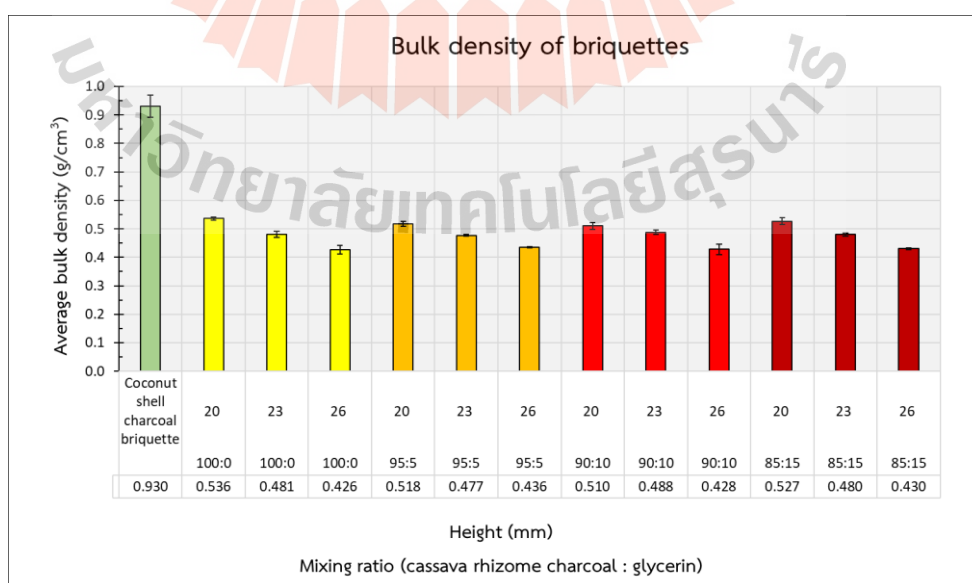
Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Moisture content (Mean $\pm$ SD) (%)
Coconut shell charcoal briquette	-	5.697 $\pm$ 0.232
100 : 0	20	4.404 $\pm$ 0.146 ^e
	23	4.251 $\pm$ 0.153 ^{de}
	26	4.072 $\pm$ 0.778 ^{bcde}
95 : 5	20	4.114 $\pm$ 0.090 ^{cde}
	23	3.646 $\pm$ 0.352 ^{abcd}
	26	3.349 $\pm$ 0.280 ^a
90 : 10	20	3.693 $\pm$ 0.146 ^{abcd}
	23	3.424 $\pm$ 0.514 ^{ab}
	26	3.525 $\pm$ 0.036 ^{abc}
85 : 15	20	3.521 $\pm$ 0.346 ^{abc}
	23	3.211 $\pm$ 0.462 ^a
	26	3.178 $\pm$ 0.242 ^a

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a – e) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

จากการทดลองตารางที่ 4.3 พบว่าความชื้นของถ่านอัดแท่งจากถ่านห้ำม้นสำปะหลังผสมกลีเซอรินมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3.178 – 4.404 % โดยทุกสูตรมีค่าความชื้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 238/2547) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 8 % แสดงว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้มีคุณภาพด้านความชื้นอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมต่อการใช้งาน ผลการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) แสดงให้เห็นว่าค่าความชื้นของบางสูตรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม a - e สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบกรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) ที่พบว่าอัตราส่วนการผสมระหว่างถ่านห้ำม้นสำปะหลังกับกลีเซอรินมีผลต่อค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-Value} = 0.000$) และความสูงของแท่งอัดก็มีผลเช่นกัน ($P\text{-Value} = 0.030$) อย่างไรก็ตาม ไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยนี้ ($P\text{-Value} = 0.847$) แสดงว่าผลกระทบของอัตราส่วนการผสมและความสูงต่อความชื้นอย่างเป็นอิสระต่อกัน โดยภาพรวมถ่านอัดแท่งจากถ่านห้ำม้นสำปะหลังผสมกลีเซอรินให้ค่าความชื้นต่ำกว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวที่ใช้เป็นกลุ่มเปรียบเทียบ บ่งชี้ถึงศักยภาพของวัตถุดิบชนิดนี้ในการพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

4.2.4 ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ความหนาแน่นเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของถ่านอัดแท่ง เนื่องจากสัมพันธ์กับความแข็งแรงของถ่านอัดแท่ง และพฤติกรรมการเผาไหม้ โดยถ่านอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงมักให้การเผาไหม้ที่สม่ำเสมอ ติดไฟได้นาน และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำ ในการทดลองขั้นต้นนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านห้ำม้นสำปะหลังผสมกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนผสมและขนาดความสูงของแท่งอัดที่มีต่อค่าความหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ ข.3



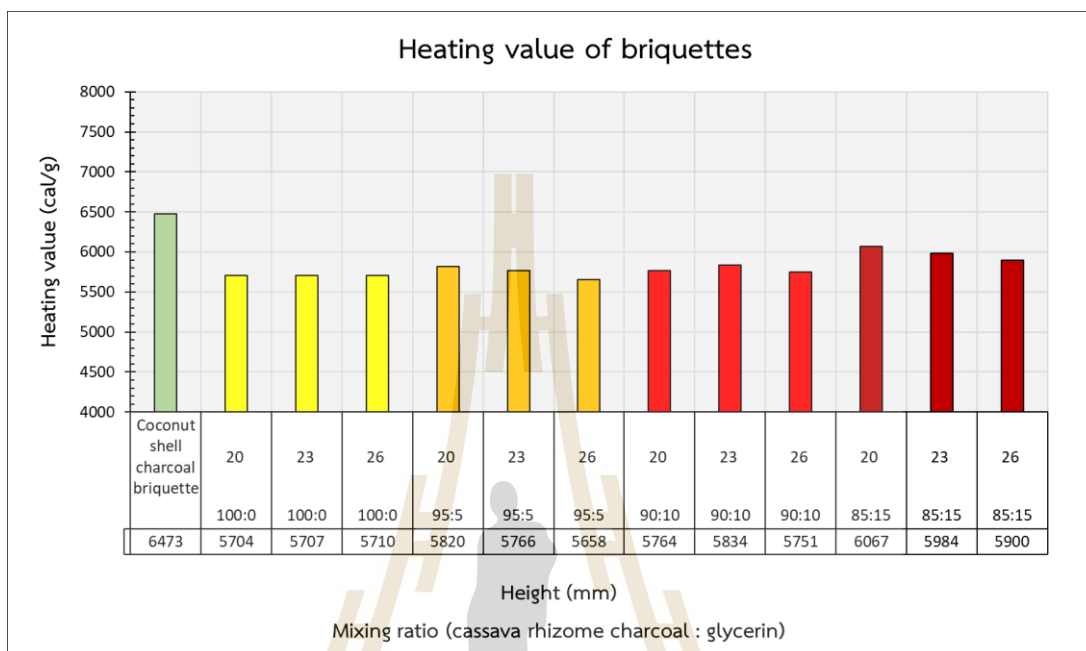
รูปที่ 4.4 ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

จากผลความหนาแน่นรูปที่ 4.4 พบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวซึ่งใช้เป็นกลุ่มเปรียบเทียบมีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุด 0.930 g/cm^3 สะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างเนื้อวัสดุของกะลามะพร้าวที่มีความหนาแน่นโดยธรรมชาติสูง และแสดงศักยภาพที่ดีด้านความแข็งแรงของเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาถ่านอัดแท่งจากถ่านห้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอริน พบว่าค่าความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความสูงของแท่งถ่านเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 26 mm ในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากความสูงที่เพิ่มขึ้นแต่การกดอัดน้อยลงทำให้ถ่านอัดแท่งมีความหนาแน่นต่ำ โดยค่าความหนาแน่นสูงสุดในกลุ่มถ่านผสมอยู่ที่อัตราส่วน 100:0 ความสูง 20 mm มีค่า 0.536 g/cm^3 และค่าต่ำสุดพบที่อัตราส่วน 85:15 ความสูง 26 mm มีค่า 0.430 g/cm^3 แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าความสูงของแท่งอัดมีผลต่อระดับการอัดแน่นของมวลภายในส่วนผสม โดยถ่านอัดแท่งที่มีความสูงมากขึ้นมีโอกาสเกิดโพรงอากาศภายในมากกว่า ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาระหว่างอัตราส่วนผสม จะพบว่าการเพิ่มกลีเซอรินจาก ไม่ทำให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของสัดส่วนผสมต่อความหนาแน่นมีน้อยกว่าปัจจัยด้านความสูง ผลการทดสอบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ในตารางที่ ข.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นรวมสามารถจำแนกออกได้เป็นหลายกลุ่มย่อยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) มี 4 กลุ่ม a - d โดยกลุ่มที่มีค่าความหนาแน่นสูงมักเป็นตัวอย่างที่มีความสูงต่ำกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่มีความสูงมากกว่าจะอยู่ในกลุ่มค่าความหนาแน่นต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มจากข้อมูลเชิงตัวเลขในตาราง และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบกรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) พบว่าความสูงของถ่านอัดแท่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value = 0.000) ในขณะที่อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านห้ำมันสำปะหลังกับกลีเซอรินไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.660) และไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยในระดับนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value = 0.069) ซึ่งยืนยันว่าความสูงของแท่งถ่านเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นรวมของถ่านอัดแท่ง ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการควบคุมความสูงของแท่งอัดจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาถ่านอัดแท่งให้มีความแข็งแรงและสมบัติการเผาไหม้ที่เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป

4.2.5 ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ค่าความร้อนเป็นตัวชี้วัดสำคัญของประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากสะท้อนถึงปริมาณพลังงานที่สามารถให้ได้จากการเผาไหม้ ถ่านอัดแท่งที่มีค่าความร้อนสูงย่อมมีศักยภาพในการใช้งานสูง ช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้และเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน ในการทดลองขั้นต้นนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์สมบัติค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านห้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ ข.4 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อสมบัติด้านพลังงานเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่ง ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินศักยภาพของถ่านอัดแท่งให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก

โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 คุณสมบัติด้านค่าความร้อนกำหนดไว้คือ ค่าความร้อน (Heating value) ไม่ควรต่ำกว่า 5,000 cal/g



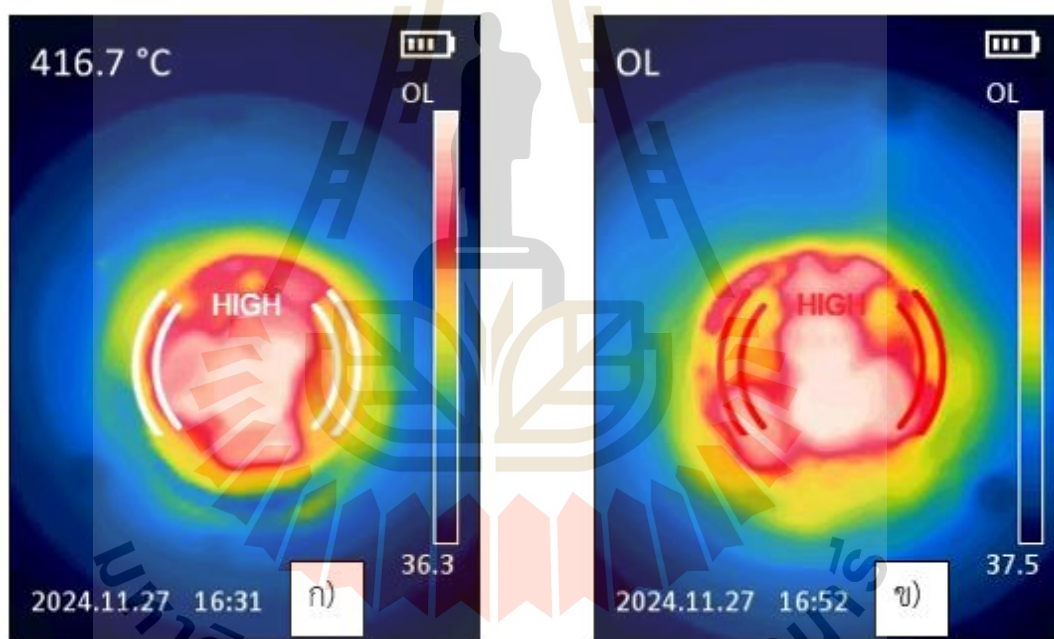
รูปที่ 4.5 ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

จากผลการศึกษาค่าความร้อน (Heating value) รูปที่ 4.5 ของถ่านอัดแท่งจากถ่านเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน พบว่าค่าความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนผสมกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้น โดยถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงถึง 6,473 cal/g แสดงถึงศักยภาพด้านพลังงานเชิงความร้อนที่สูงกว่าวัตถุดิบจากเหง้ามันสำปะหลัง สำหรับถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังอัตราส่วนผสม 100 : 0 ไม่มีกลีเซอรินผสมให้ค่าความร้อนต่ำที่สุดอยู่ในช่วง 5,704 – 5,710 cal/g และเมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราส่วนผสม 95 : 5 ให้ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 5,658 – 5,820 cal/g อัตราส่วนผสม 90 : 10 ให้ค่าความร้อนในช่วง 5,751 – 5,834 cal/g และอัตราส่วนผสม 85 : 15 ให้ค่าความร้อนสูงสุดในช่วง 5,900 – 6,067 cal/g ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) กรณีที่ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) ที่แสดงว่าอัตราส่วนผสมถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอรินมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value = 0.002) เนื่องจากกลีเซอรินมีค่าความร้อนสูงและมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ในทางตรงกันข้าม ความสูงของแท่งอัดในช่วง 20 – 26 mm ไม่มีผลต่อค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.122) โดยค่าความร้อนที่ได้ในแต่ละความสูงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สะท้อนว่าค่าความร้อน เป็นสมบัติที่ขึ้นกับองค์ประกอบของส่วนผสมเป็นหลักมากกว่ามิติทางกายภาพของชิ้นงาน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ซึ่งกำหนดว่าค่าความ

ร้อนต้องไม่ต่ำกว่า 5,000 cal/g พบว่าถ่านอัดแท่งทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรีนมีคุณภาพด้านพลังงานอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง ถือว่าการเติมกลีเซอรีนสามารถเพิ่มมูลค่าและคุณภาพเชิงพลังงานของถ่านอัดแท่งจากชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2.6 ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

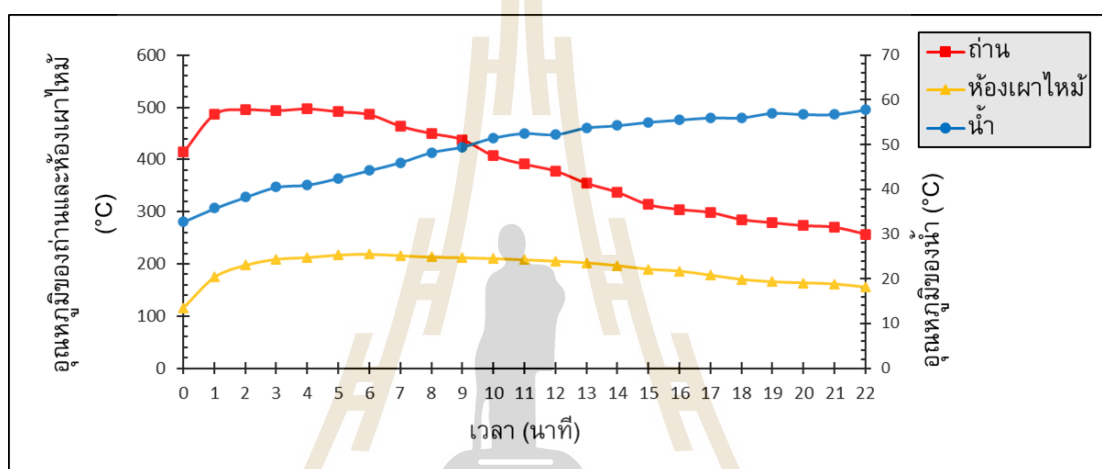
ผลลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนคุณภาพของเชื้อเพลิงในการใช้งานจริง ความสม่ำเสมอของการเผาไหม้ และความเสถียรของเปลวไฟ ในการทดลองขั้นต้นนี้ จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากส่วนผสมถ่านเหง้ามันสำปะหลังและกลีเซอรีน เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานเป็นพลังงานทดแทน และใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการอธิบาย แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายความร้อนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง ก) หลังจากจุดติดไฟ และ ข) หลังจากอุณหภูมิน้ำ 60 °C

จากภาพถ่ายความร้อนของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งรูปที่ 4.6 พบว่าในช่วงหลังจุดติดไฟ อุณหภูมิบริเวณแกนกลางของถ่านอัดแท่งมีค่าสูงที่สุด แสดงว่าการเผาไหม้เริ่มเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และสามารถเข้าสู่ช่วงให้ความร้อนสูงได้ในระยะเวลาอันสั้น สะท้อนถึงความสามารถในการติดไฟและการถ่ายเทความร้อนที่ดีของถ่านอัดแท่ง ในขณะที่ภาพหลังจากอุณหภูมิน้ำประมาณ 60 °C ยังคงปรากฏบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงอยู่บริเวณแกนกลางของเชื้อเพลิง แสดงว่าถ่านอัดแท่งยังคงสามารถรักษาความร้อนได้ดีและมีการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ลักษณะการกระจายของสีในภาพถ่ายความร้อนที่

แสดงอุณหภูมิสูงกระจุกตัวบริเวณแกนกลางและค่อย ๆ ลดลงสู่ขอบรอบนอก สื่อให้เห็นถึงการเผาไหม้แบบค่อนข้างสม่ำเสมอจากภายในสู่ภายนอก ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเชื้อเพลิงในเชิงความร้อน เนื่องจากช่วยให้การปลดปล่อยพลังงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ผลดังกล่าวสะท้อนว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตขึ้นมีสมบัติด้านพฤติกรรมของการเผาไหม้อยู่ในเกณฑ์ดี ทั้งด้านการติดไฟ การให้ความร้อนสูง และความสามารถในการรักษาอุณหภูมิ ซึ่งสนับสนุนศักยภาพในการนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ในทางปฏิบัติ โดยผลดังกล่าวแสดงแนวโน้มสอดคล้องกันในทุกอัตราส่วนผสมของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน

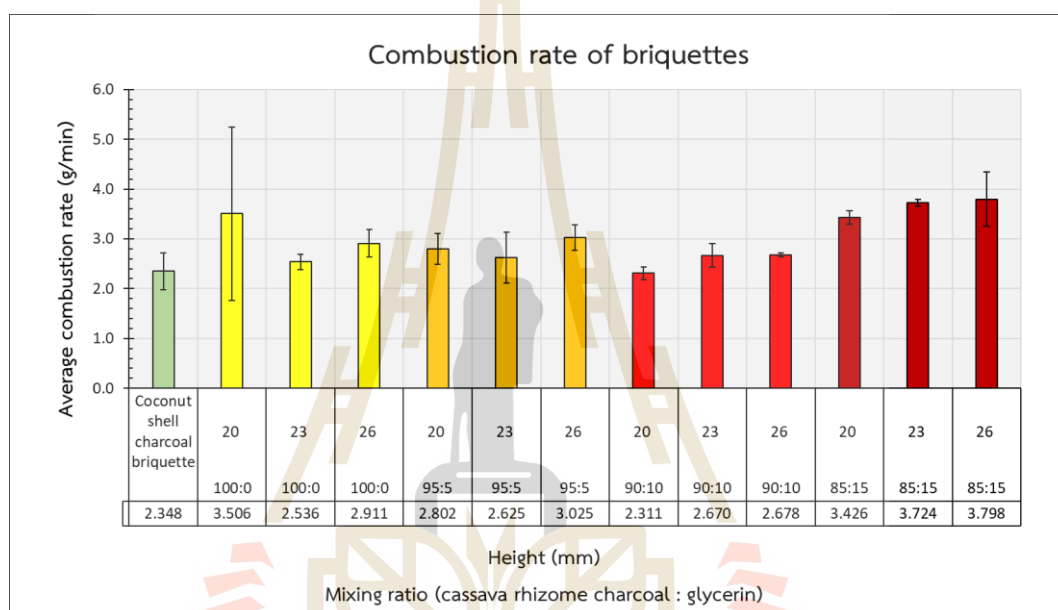


รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในการทดลองขั้นต้น

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในระหว่างการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน พบว่าอุณหภูมิของถ่านเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ภายใน 2-3 นาทีแรก สะท้อนถึงความสามารถในการติดไฟได้ดีและการเริ่มต้นเผาไหม้อย่างรวดเร็ว จากนั้นอุณหภูมิถ่านมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา แสดงถึงการเข้าสู่ช่วง ไหม้คงตัว และการใช้พลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ภายในเนื้อถ่าน ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาเผาไหม้ แสดงว่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ถูกถ่ายเทไปสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ในช่วงต้นของการเผาไหม้ และค่อย ๆ ลดลงในระยะหลัง สะท้อนว่าพลังงานความร้อนถูกถ่ายออกจากบริเวณแหล่งกำเนิดสู่ภายนอกอย่างต่อเนื่อง รูปแบบดังกล่าวสอดคล้องกับภาพถ่ายความร้อนซึ่งแสดงการกระจายอุณหภูมิจากจุดศูนย์กลางของถ่านออกสู่ขอบด้านนอก แสดงลักษณะการเผาไหม้จากภายในสู่ภายนอกอย่างสม่ำเสมอ โดยผลดังกล่าวแสดงแนวโน้มสอดคล้องกันในทุกอัตราส่วนผสมของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งมีสมบัติในการให้ความร้อนรวดเร็ว รักษาการเผาไหม้ได้ต่อเนื่อง และสามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อนได้ดี จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในงานให้ความร้อน เช่น การต้มน้ำหรือให้พลังงานความร้อนในครัวเรือน

4.2.7 ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ผลการทดสอบอัตราการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้นแสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ ข.5 ผลของอัตราการเผาไหม้ที่ได้ช่วยสะท้อนความสามารถในการลุกไหม้ต่อเนื้อ ความเสถียรของโครงสร้างขณะเผาไหม้ และปริมาณมวลที่สูญเสียไปตามเวลา ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผล โดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้งานจริงของถ่านอัดแท่ง หัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองอัตราการเผาไหม้เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการลุกไหม้และประเมินว่าสูตรผสมใดมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาในขั้นตอนถัดไป



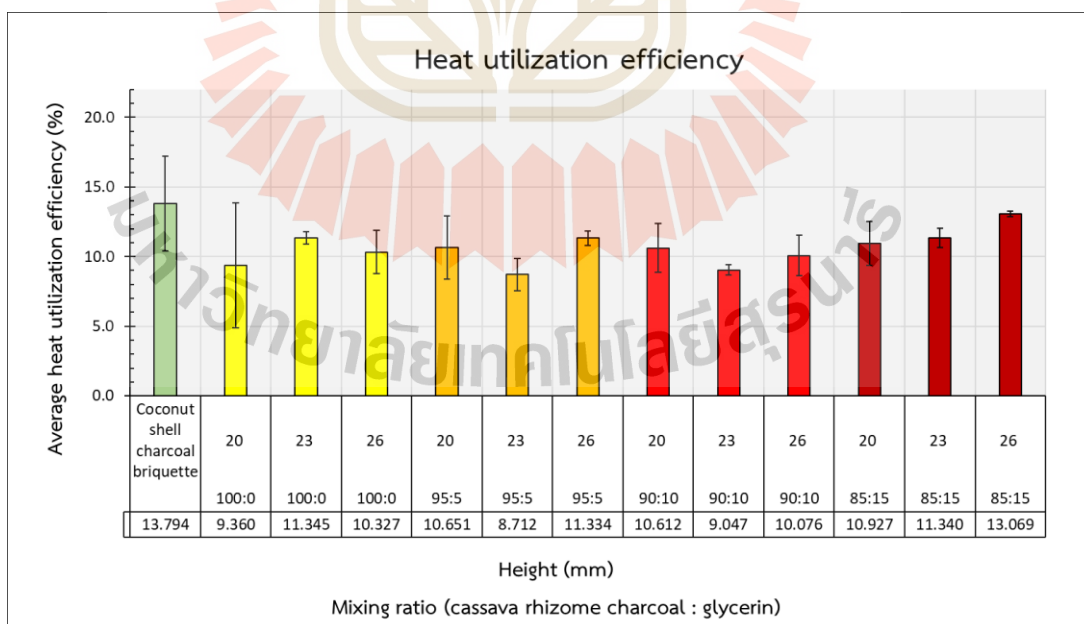
รูปที่ 4.8 ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ผลการทดลองในรูปที่ 4.8 และตารางที่ ข.5 พบว่าอัตราการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกลีเซอริน โดยสูตร 85 : 15 ให้ค่าการเผาไหม้สูงที่สุดในทุกความสูงของแท่ง สูงสุดที่ 3.798 g/min เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่น ขณะที่สูตรที่มีกลีเซอริน น้อยกว่ามีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าอย่างชัดเจน และมีแนวโน้มของอัตราการเผาไหม้ลดลงเมื่อความหนาแน่นมากขึ้นคือความสูงของถ่านอัดแท่งน้อย แม้ในบางค่าจะมีความแปรปรวนสูงจนซ้อนกลุ่มตามผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) แต่แนวโน้มโดยรวมแสดงว่ากลีเซอรินช่วยเร่งการลุกไหม้ได้จริง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวซึ่งใช้เป็นกลุ่มเปรียบเทียบ พบว่ามีอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุดในชุดการทดลอง 2.348 g/min สะท้อนถึงลักษณะโครงสร้างที่หนาแน่นและเผาไหม้ช้ากว่าถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ซึ่งมีความพรุนและการจับตัวที่หลวมกว่า ส่งผลให้การเผาไหม้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) สนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว คือค่าของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินอยู่ในกลุ่มอักษรที่แตกต่างจัดได้ 4 กลุ่ม (a – d) สูตรที่ผสมกลีเซอรินระดับสูง

โดยเฉพาะสูตร 85 : 15 ความสูง 26 mm จัดอยู่ในกลุ่ม d ให้ค่าเฉลี่ยสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) กรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) ชี้ชัดว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการเผาไหม้คือ อัตราส่วนการผสม (P-Value = 0.003) เท่านั้น ขณะที่ความสูงของแท่งถ่านและปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการผสมกับความสูงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ (P-Value = 0.661 และ P-Value = 0.475 ตามลำดับ) แสดงว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความเร็วการเผาไหม้คืออัตราส่วนการผสมเท่านั้น แสดงว่าสัดส่วนกลีเซอรินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการเผาไหม้มากกว่ารูปร่างหรือขนาดของแท่ง สรุปได้ว่าการเติมกลีเซอรินช่วยเร่งการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งเชิงสถิติและเชิงพฤติกรรมการเผาไหม้จริง

4.2.8 ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ในการประเมินศักยภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งในสถานะจริง ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถือเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนความสามารถของเชื้อเพลิงในการถ่ายเทพลังงานไปยังตัวกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองขั้นต้นนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ ข.6 เพื่อเปรียบเทียบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมและความสูงส่งผลต่อความสามารถในการให้ความร้อนเพียงใด ผลที่ได้จะช่วยยืนยันแนวโน้มด้านคุณสมบัติการเผาไหม้และสนับสนุนการเลือกสูตรผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ ข.6 ด้านประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency) ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินในการทดลองขึ้นต้นแสดงให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกันว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินในส่วนผสมประสิทธิภาพการใช้ความร้อนมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สูตร 85 : 15 ค่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น และที่ระดับความสูงถ่านอัดแท่ง 26 mm ให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนสูงสุด 13.069 % ใกล้เคียงกับถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว 13.794 % สะท้อนให้เห็นว่ากลีเซอรินมีส่วนช่วยในการเพิ่มความร้อนที่เกิดขึ้นต่อมวลเชื้อเพลิง นอกจากนี้ การทดสอบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) พบว่าค่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนสูงสุดโดยสูตร 85 : 15 ที่ความสูง 26 mm มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ (ตัวอักษร b) ในขณะที่อัตราส่วนผสมอื่นยังจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (a-ab) แสดงว่าแม้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความแตกต่างระหว่างหลายระดับยังไม่เด่นชัด ส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) พบว่า ทั้งอัตราส่วนการผสม (P-Value = 0.146) ความสูงของแท่งถ่าน (P-Value = 0.311) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (P-Value = 0.388) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value > 0.05) ซึ่งหมายความว่า แม้ค่าเฉลี่ยจะแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมกลีเซอริน แต่ความแปรปรวนภายในกลุ่มค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถสรุปผลเชิงสถิติที่ชัดเจนได้ อย่างไรก็ตามแนวโน้มจากค่าเฉลี่ยยังบ่งชี้ว่าสูตรผสมที่มีกลีเซอรินในสัดส่วนเหมาะสม โดยเฉพาะ 85 : 15 มีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนในขั้นตอนต่อไป

4.3 ผลของการทดลองเชิงลึก

ผลของการทดลองเชิงลึกมีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะเชิงความร้อนรวมถึงมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่ควบคุมอย่างเป็นระบบ การทดลองในขั้นนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลด้านอุณหภูมิ มลพิษ อัตราการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างละเอียด โดยพิจารณาผลของอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดของถ่านอัดแท่งที่แตกต่างกันมีผลอย่างไรต่อความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ พฤติกรรมการเผาไหม้ มลพิษจากการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน ผลการทดลองที่ได้สะท้อนถึงอิทธิพลของตัวแปร ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการอธิบายความเหมาะสมของส่วนผสมและเงื่อนไขการผลิตถ่านอัดแท่ง รวมถึงใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการอภิปรายผลเชิงเปรียบเทียบและสรุปแนวโน้มของสมรรถนะถ่านอัดแท่งต่อไป

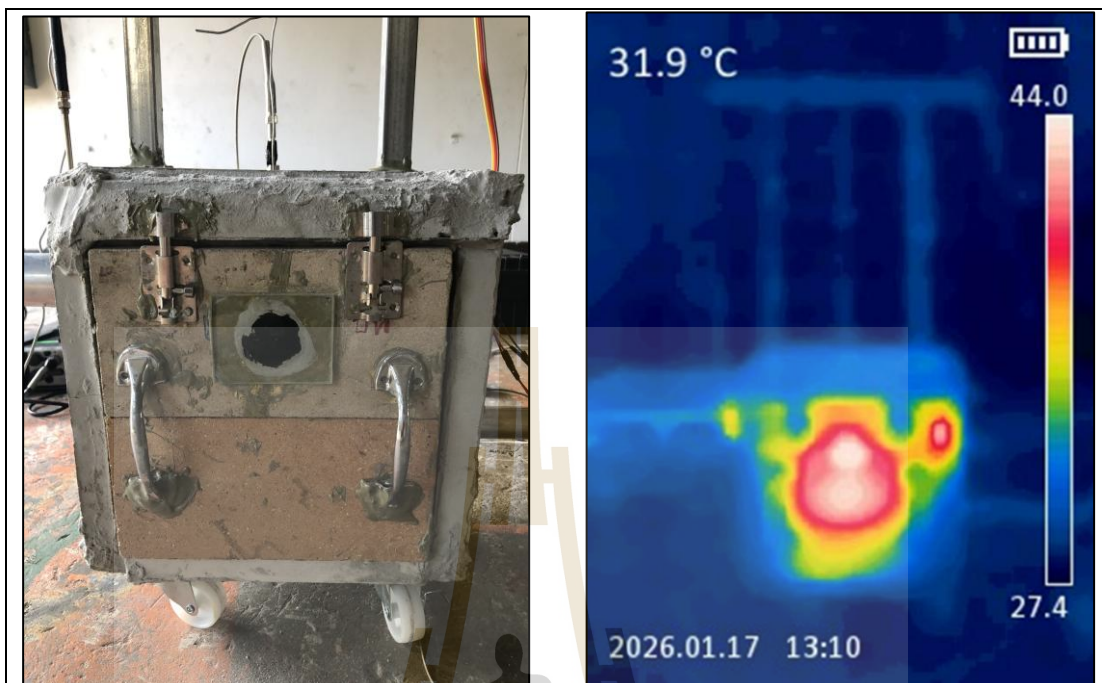
4.3.1 ผลออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลอง

ในการออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกการทดลองเชิงลึก แสดงดังรูปที่ 3.17 ผลได้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกแบบวง (Batch type) โดยแม่แรงไฮดรอลิกกำลังการอัด 20 ตัน สามารถอัดถ่านได้วงละ 8 ก้อน ต่อการกดอัด 1 ครั้งใช้เวลาประมาณ 10 นาที คิดเป็นกำลังการผลิตในหนึ่งวันทำงาน 8 ชั่วโมงจะสามารถอัดถ่านได้ 384 ก้อน นอกจากนี้เครื่องอัดถ่านที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้งานและควบคุมความดันการกดอัดได้สะดวกและแม่นยำโดยการติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure gauge) สามารถปฏิบัติงานได้โดยใช้แรงงานเพียง 1 คน ช่วยลดความยุ่งยากในการปฏิบัติงาน ลดต้นทุนด้านแรงงาน และเพิ่มความสะดวกและความคล่องตัวในการผลิตถ่านอัดแท่งสำหรับการทดลองเชิงลึก

4.3.2 ผลออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้การทดลอง

จากผลการออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้สำหรับการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าห้องเผาไหม้ของระบบทดสอบเชิงความร้อน ภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (No heat losses) ผลการกระจายอุณหภูมิที่ถ่ายภาพความร้อนได้ โดยเฉพาะบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงใกล้ตำแหน่งเผาไหม้ สะท้อนให้เห็นว่าพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ถูกรวบรวมศูนย์อยู่ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของระบบที่มีการสูญเสียพลังงานต่ำ นอกจากนี้รูปแบบการกระจายอุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอในทิศทางกึ่งกลางของอากาศร้อนอยู่ที่ท่อทางออก แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของกระบวนการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งทำให้สามารถนำสมการสมดุลพลังงานสำหรับระบบการไหลแบบคงตัวมาใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้อย่างเหมาะสม ผลการถ่ายภาพความร้อนดังกล่าวจึงยืนยันว่าห้องเผาไหม้ที่ออกแบบขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้และสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งในการทดลองเชิงลึก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

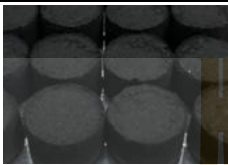
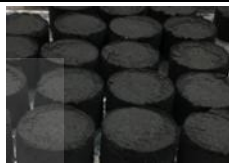
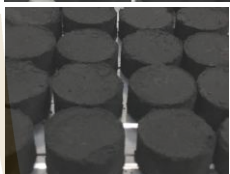
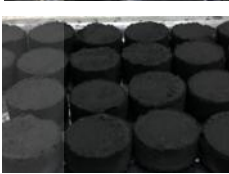


รูปที่ 4.10 ผลออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้การทดลอง

4.3.3 ผลลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

ลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งในการทดลองเชิงลึกที่ผลิตจากถ่านห้ำม้นสำหรับผสมกลีเซอรินเปรียบเทียบกับมาตรฐานถ่านอัดแท่ง แสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ จากการผลิตถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอกตัน พบว่า อัตราส่วนผสมของผงถ่านห้ำม้นสำหรับต่อกลีเซอริน และความดันในการกดอัดที่ใช้ มีผลต่อรูปทรงและความสมบูรณ์ของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจน โดยอัตราส่วน 100 : 0 (ไม่มีกลีเซอริน) ให้ถ่านที่แน่น แข็งแรง และมีรูปทรงคงตัวดี แม้ใช้ความดันกดอัดต่ำ เนื่องจากตัวประสานในการวิจัยนี้คือแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นกาวที่ยึดติดระหว่างส่วนผสมได้ดี แต่การเพิ่มขึ้นของกลีเซอรินส่งผลให้ตัวยึดประสานมีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากกลีเซอรินมีคุณสมบัติเป็นน้ำมัน ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นกาวที่เหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนให้เห็นว่าการใส่กลีเซอรินมากเกินไปอาจทำให้ถ่านสูญเสียความแข็งแรง ในขณะที่อัตราส่วน 80 : 20, 75 : 25 และ 70 : 30 ถ่านมีลักษณะผิวเรียบ เนื่องจากกลีเซอรินทำให้ผิวเรียบและเงา แต่จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสม 80 : 20 นั้นเหมาะสำหรับผลิตถ่านอัดแท่งมากที่สุด ในส่วนของความดันในการกดอัดขึ้นรูป สังเกตได้ว่าในทุกอัตราส่วนผสม ความดันในการกดอัดสูงที่สุดที่ 180 kg/cm² นั้นเป็นแรงกดที่มากเกินไป ทำให้ส่วนผสมของถ่านดันขึ้นมาบริเวณด้านบน ส่วนความดันที่ 150 kg/cm² และ 120 kg/cm² ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากการทดลองพบว่าความดัน 150 kg/cm² ให้ถ่านที่มีความแข็งแรงและลักษณะที่สวยงามที่สุด

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)		
	120	150	180
100 : 0			
80 : 20			
75 : 25			
70 : 30			

ลักษณะของถ่านอัดแท่งทุกอัตราส่วนผสมและระดับความดันในการกดอัดที่ใช้ ยังสอดคล้องกับข้อกำหนดในหมายเหตุของตารางที่อ้างถึงมาตรฐาน CPS 238/2547 และ DIN EN ISO 17225-3 ซึ่งระบุว่า ถ่านอัดแท่งควรมีขนาดใกล้เคียงกัน รูปทรงสม่ำเสมอ สีดำสม่ำเสมอ และอาจมีโอกาสแตกหักเล็กน้อยได้ โดยสามารถขึ้นรูปได้หลายลักษณะ เช่น ทรงกระบอกตัน กระบอกกลวง สีเหลี่ยมตัน หรือหกเหลี่ยมตัน ซึ่งจากภาพสามารถประเมินได้ว่ารูปทรงและความสม่ำเสมอของถ่านจะดีขึ้นเมื่อควบคุมทั้งอัตราส่วนกลีเซอรินและความดันกดอัดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ระดับความดันการกดอัดที่ใช้ ไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปทรงถ่านอัดแท่งถูกควบคุมไว้ด้วยแม่พิมพ์ขนาด 54 mm ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางทุกสภาวะอยู่ที่ 54.09 ± 0.45 mm แต่อัตราส่วนผสมระหว่างผงถ่านเห้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรินและระดับความดันกดอัดที่ใช้ส่งผลต่อความสูงของถ่านอัดแท่งอย่างเห็นได้ชัด อัตราส่วนของกลีเซอรินที่เพิ่มมากขึ้นที่ความดันกดอัดเท่ากันจะเห็นได้ว่า ระยะความสูงของถ่านอัดแท่งลดน้อยลงเนื่องผงถ่านเป็นอนุภาคของแข็งหากมีมากในส่วนผสมจะทำให้การกดอัดลงได้ยากมากกว่า มาตรฐาน DIN EN ISO 17225-3 กำหนดให้ต้องระบุเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง และความสูงของถ่านอัด

แท่งอย่างชัดเจน ซึ่งข้อมูลในตารางที่ 4.5 นี้แสดงให้เห็นว่าทุกสูตรอยู่ในช่วงขนาดที่ใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้เป็นถ่านอัดแท่งมาตรฐานได้

ตารางที่ 4.5 ขนาดของถ่านอัดแท่งจากการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Dimensions	
		Diameter	Height
		(Mean $\pm$ SD) (mm)	(Mean $\pm$ SD) (mm)
100 : 0	120	54.03 $\pm$ 0.51 ^{ab}	29.94 $\pm$ 0.05 ⁱ
	150	53.68 $\pm$ 0.14 ^a	28.95 $\pm$ 0.04 ^h
	180	53.65 $\pm$ 0.28 ^a	27.36 $\pm$ 0.22 ^g
80 : 20	120	53.88 $\pm$ 0.58 ^{ab}	27.59 $\pm$ 0.16 ^g
	150	53.72 $\pm$ 0.49 ^a	26.56 $\pm$ 0.22 ^f
	180	54.04 $\pm$ 0.20 ^{ab}	25.48 $\pm$ 0.36 ^e
75 : 25	120	54.30 $\pm$ 0.32 ^{ab}	26.58 $\pm$ 0.27 ^f
	150	54.19 $\pm$ 0.38 ^{ab}	25.24 $\pm$ 0.04 ^e
	180	54.29 $\pm$ 0.63 ^{ab}	24.71 $\pm$ 0.27 ^d
70 : 30	120	54.55 $\pm$ 0.19 ^b	24.15 $\pm$ 0.31 ^c
	150	54.42 $\pm$ 0.45 ^{ab}	23.22 $\pm$ 0.26 ^b
	180	54.27 $\pm$ 0.43 ^{ab}	21.85 $\pm$ 0.23 ^a

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a-i) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

จากวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) พบว่า ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความดันการอัดและอัตราส่วนผสมของถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ ความสูงของถ่านอัดแท่ง อัตราส่วนผสมเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด (P-value = 0.000) รองลงมาคือความดันการอัด (P-value = 0.000) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของส่วนผสมมีผลต่อโครงสร้างและสูงของถ่านที่อัดขึ้นรูปได้ชัดเจน ขณะที่ความดันมีผลต่อการอัดแน่นของวัสดุภายในแม่พิมพ์ ซึ่งส่งผลต่อความสูงของแท่งถ่านโดยตรง นอกจากนี้ยังพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสม อย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.017) ซึ่งบ่งชี้ว่าผลของความดันการกดอัดต่อความสูงของถ่านอัดแท่งนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมที่ใช้ และในทางกลับกันผลของอัตราส่วนผสมต่อความสูงก็ขึ้นอยู่กับระดับของความดันการกดอัดเช่นกัน ในส่วนของมวลของถ่านอัดแท่งจากทุกอัตราส่วนผสมและทุกความดันการ

กดอัดมีมวลต่อหนึ่งก้อนอยู่ที่ 27.636 ± 0.741 g ซึ่งไม่พบความแตกต่างของมวลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบโดยการกำหนดอัตราส่วนผสมบนพื้นฐานของ สัดส่วนโดยมวล และมีการชั่งน้ำหนักวัตถุดิบแต่ละองค์ประกอบให้ได้มวลรวมเท่ากันก่อนการอัดขึ้นรูป ส่งผลให้มวลรวมของถ่านอัดแท่งต่อหนึ่งก้อนถูกควบคุมให้ใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทดลอง แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัด ซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างภายใน ความหนาแน่น และลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่ง แต่ปัจจัยดังกล่าวไม่ส่งผลต่อมวลของถ่านอัดแท่งโดยตรง เนื่องจากมวลถูกกำหนดจากขั้นตอนการชั่งและผสมวัตถุดิบตั้งแต่ต้น

การทดสอบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในกลุ่ม a, ab และ b แสดงว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากถูกควบคุมด้วยแม่พิมพ์ 54 mm โดยมีค่าเฉลี่ย 54.09 ± 0.45 mm และความแปรปรวนต่ำและในส่วนของความสูงของถ่านอัดแท่งมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มอย่างชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ไม่ผสมกลีเซอริน 100 : 0 และความดันกดอัดที่ 120 และ 150 kg/cm² มีความสูงสูงสุดและอยู่ในกลุ่ม h – i ซึ่งต่างจากกลุ่มที่มีสัดส่วนกลีเซอรินสูง เช่น 70 : 30 ซึ่งค่าความสูงลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะที่ความดันในการกดอัด 180 kg/cm² อยู่ในกลุ่ม a แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลีเซอรินมีผลให้ความสูงของแท่งลดลง และค่าที่ต่างกันจาก a – i ยืนยันถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวทั้งหมดชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับระดับทั้งสองปัจจัยร่วมกันอย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่งให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ และเหมาะสมต่อการใช้งาน

4.3.4 ผลสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่ง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น และความต้านทานแรงกดอัด จากตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Moisture (Mean±SD) (%)	Bulk density (Mean±SD) (g/cm ³)	Compressive strength (Mean±SD) (kg/cm ²)
100 : 0	120	1.164±0.101 ^{ab}	0.416±0.004 ^a	6.18±1.68 ^d
	150	1.001±0.217 ^a	0.428±0.004 ^a	8.59±0.89 ^{ef}
	180	0.968±0.218 ^a	0.432±0.003 ^{ab}	9.96±0.52 ^f
80 : 20	120	1.505±0.233 ^{abc}	0.448±0.010 ^{bc}	1.80±0.40 ^a
	150	1.748±0.338 ^{bcd}	0.464±0.011 ^{cde}	3.00±0.68 ^{ab}
	180	1.622±0.317 ^{abc}	0.469±0.007 ^{def}	4.11±0.12 ^{bc}
75 : 25	120	2.382±0.115 ^{de}	0.454±0.011 ^{cd}	5.51±1.13 ^{cd}
	150	2.247±0.298 ^{cde}	0.477±0.005 ^{ef}	5.60±0.96 ^{cd}
	180	2.118±0.284 ^{cde}	0.485±0.015 ^{fg}	4.37±1.03 ^{bc}
70 : 30	120	2.110±0.377 ^{cde}	0.497±0.014 ^{gh}	4.62±1.11 ^{bcd}
	150	2.579±0.353 ^e	0.507±0.017 ^h	4.84±0.44 ^{cd}
	180	2.032±1.030 ^{cde}	0.514±0.008 ^h	7.90±0.80 ^e

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a–h) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

สมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังที่ผสมกับกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.968 % ถึง 2.579 % ซึ่งอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดโดยมาตรฐาน ISO 17225-1:2021 ที่ไม่เกิน 15 % และมาตรฐานของ CPS 238/2547 ที่ไม่เกิน 8 % แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินที่ผลิตมีความชื้นเหมาะสมต่อการเผาไหม้และการจัดเก็บ โดยพบว่า การเพิ่มกลีเซอรินมีแนวโน้มทำให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในอัตราส่วน 70 : 30 ที่มีค่าความชื้นสูงสุดที่ 2.579 % ที่ความดันกดอัด 150 kg/cm² ส่วนค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ในช่วง 0.416 – 0.514 g/cm³ มีค่าสูงสุด 0.514 ± 0.008 g/cm³ ที่ 70 : 30 ที่ความดันการกดอัด 180 kg/cm² และมีค่าต่ำสุด 0.416 ± 0.004 g/cm³ ที่ 100 : 0 ที่ความดันการกดอัด 120 kg/cm² จะเห็นได้ว่าความดันการกดอัดมีผลต่อความหนาแน่นและการเพิ่มกลีเซอรินสามารถกดอัดได้มากเนื่องจากเป็นของเหลวส่งผลให้มวลเยอะขึ้นไปจนถึงความหนาแน่นมากขึ้นกว่า ส่วนอัตราส่วนผสม 100 : 0 ซึ่งมีแต่ผงถ่านทำให้กดอัดลงได้น้อยความสูงถ่านอัดแท่งเพิ่มและเบาส่งผลให้ค่าความหนาแน่นต่ำ ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Mahayosanon (2005) ซึ่งระบุไว้ว่าค่าไม่ควรเกิน 0.8 g/cm³ ขณะที่ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive

strength) พบว่าอัตราส่วน 100 : 0 ที่ระดับความดันกดอัด 180 และ 150 kg/cm² มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 9.96 และ 8.59 kg/cm² ตามลำดับ ในส่วนของค่าความแข็งแรงต่อแรงกดน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.80 ± 0.40 ที่อัตราส่วน 80 : 20 ที่ระดับความดันกดอัด 120 kg/cm² ช่วงค่าความแข็งแรงต่อแรงกดงานวิจัยของ Sen et al. (2016) ทดสอบได้ว่า ค่าอยู่ในช่วง 1 - 6 kg/cm² แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำกลีเซอรีนมาผสมเพิ่มค่าความหนาแน่น แต่กลับลดค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดลงอย่างชัดเจน ดังนั้น อัตราส่วน 70 : 30 ที่ระดับความดันกดอัด 180 kg/cm² มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive strength) ถึง 7.90 kg/cm² มากและใกล้เคียงกับงานวิจัย จึงเหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ต้องการสมบัติทางกายภาพให้สอดคล้องกับมาตรฐานและงานวิจัย

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) พบว่าอัตราส่วนการผสมของถ่านหังามันสำปะหลังผสมกลีเซอรีน มีผลต่อค่าความชื้นของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % P-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ขณะที่ความดันในการกดอัดและปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันในการกดอัดกับอัตราส่วนผสม ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่า P-value เท่ากับ 0.446 และ 0.761 ตามลำดับ แสดงว่าอัตราส่วนผสมของกลีเซอรีนที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความชื้น ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนการผสมของถ่านหังามันสำปะหลังต่อกลีเซอรีน มีผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ทั้งสองปัจจัย ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมต่างมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นอย่างชัดเจน ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยมีค่า P-value เท่ากับ 0.866 ซึ่งสูงกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ กล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมแต่ละปัจจัยมีผลอย่างอิสระต่อความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง และในการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าความดันในการกดอัดและอัตราส่วนการผสมของถ่านหังามันสำปะหลังต่อกลีเซอรีน มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงกดอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ทั้งสองปัจจัย แสดงให้เห็นว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมมีอิทธิพลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันการกดอัดและอัตราส่วนการผสม ก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 แสดงให้เห็นว่าผลความดันการกดอัดต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดของถ่านอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมที่ใช้ และในทางกลับกัน กล่าวคือ ปัจจัยทั้งสองไม่ได้ส่งผลอย่างอิสระต่อกันแต่มีผลร่วมกันต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด

การทดสอบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ พบว่าเมื่อสัดส่วนกลีเซอรีนเพิ่มขึ้น ค่าความชื้น (Moisture) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม โดยเฉพาะกลุ่มที่มีสัดส่วน 70 : 30 ที่ความชื้นสูงสุด $2.579 \pm 0.353\%$ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม e ซึ่งต่างจากกลุ่ม 100 : 0 ที่มี

ค่าน้อยที่สุดและอยู่ในกลุ่ม a สะท้อนว่ากลีเซอรินมีผลเพิ่มความชื้นในตัวอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความหนาแน่นรวม (Bulk density) มีค่ามากขึ้นเมื่อสัดส่วนกลีเซอรินสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 70 : 30 ค่าอยู่ในกลุ่ม g – h ซึ่งสูงกว่า 100:0 ที่อยู่ในกลุ่ม a – ab แสดงแนวโน้มชัดเจนว่ากลีเซอรินช่วยเพิ่มความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง สำหรับค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive strength) กลุ่มที่ไม่ผสมกลีเซอรินที่ความดันในการกดอัด 180 kg/cm² มีค่ามากที่สุด 9.96 ± 0.52 kg/cm² อยู่ในกลุ่ม f ซึ่งต่างจากกลุ่มอื่นที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าและกระจายอยู่ในกลุ่ม a – e โดยเฉพาะกลุ่ม 80:20 ที่ 120 kg/cm² มีค่าต่ำสุด 1.80 ± 0.40 kg/cm² กลุ่ม a แสดงว่าเมื่อเพิ่มกลีเซอรินมากขึ้นหรือใช้ความดันในการกดอัดต่ำ ค่าความแข็งแรงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.5 ผลสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating Value) ถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากการผสมระหว่างถ่านห้ำมันสำปะหลังกับกลีเซอรินในอัตราส่วนและความดันการกดอัดที่ต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของถ่านอัดแท่งในการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Heating Value (cal/g)	Standard	
			ISO 17225- 1:2021 (cal/g)	CPS 238/2547 (cal/g)
100 : 0	120	5,690	3,800	5,000
	150	5,714		
	180	5,570		
80 : 20	120	5,886	3,800	5,000
	150	5,910		
	180	5,763		
75 : 25	120	5,722	3,800	5,000
	150	5,800		
	180	6,033		
70 : 30	120	6,062	3,800	5,000
	150	6,050		
	180	6,164		

จากการทดสอบพบว่าค่าความร้อน (Heating Value) ของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านห้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินอัตราส่วนการผสมและความดันการกดอัดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า

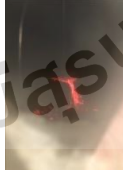
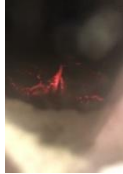
ทุกอัตราส่วนผสมและทุกความดันการกดอัดมีค่าความร้อน สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ใน ISO 17225-1:2021 ไม่น้อยกว่า 3,800 cal/g และ มผช. 238/2547 ไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุชีวมวลในงานวิจัยนี้มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยสูตรที่ให้ค่าความร้อน (Heating Value) สูงที่สุดคืออัตราส่วนถ่านหะมน้ำสำหรับปาล์มต่อกลีเซอรินที่ 70 : 30 ภายใต้ความดันกดอัด 180 kg/cm² ซึ่งให้ค่าพลังงานถึง 6,164 cal/g ตามด้วยสูตร 75 : 25 ที่ให้ค่าพลังงานสูงในระดับใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความร้อนต่ำที่สุดอยู่อัตราส่วนผสม 100 : 0 ไม่มีส่วนผสมของกลีเซอรินอยู่ในช่วง 5,570 - 5,714 cal/g ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรินซึ่งมีพลังงานความร้อนสูงลงในสูตรผสม จะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากการศึกษาพบว่าค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟใช้แล้วผสมกลีเซอริน สำหรับอัตราส่วน 100 : 0, 95 : 5 และ 90 : 10 เท่ากับ 5,053 cal/g, 5,070 cal/g และ 5,152 cal/g ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เหล่านี้กับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ เช่น ลิกไนต์ 3,915 cal/g บิโอมินัส 4,644 cal/g ฝักข้าวโพด 4,150 cal/g ไม้เนื้อแข็ง 4,460 cal/g ใบอ้อย 4,398 cal/g ถ่านไม้สำหรับปาล์ม 4,326 cal/g กิ่งปาล์ม 4,183 cal/g พางข้าว 3,633 cal/g และ ถ่านหินมีค่าความร้อนสูงสุด 6,190 cal/g (Potip & Wongwuttanasatian, 2018) จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งหะมน้ำสำหรับปาล์มผสมกลีเซอรินมีค่าความร้อนเทียบเท่าถ่านหิน จึงสามารถเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ในอนาคต อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่าความดันกดอัดจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งในด้านอื่น เช่น ความแน่นหรือความแข็งแรงต่อแรงกด แต่จากตารางที่ 4.7 นี้สามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนระดับความดันกดอัด มีผลต่อค่าความร้อนค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะในสูตรที่มีการผสมกลีเซอริน กล่าวคือ อิทธิพลของความดันกดอัดต่อค่าความร้อน ไม่เด่นชัดเท่ากับอัตราส่วนของวัตถุดิบ ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมมีผลต่อค่าความร้อน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % มีค่า P-value เท่ากับ 0.022 ขณะที่ความดันการกดอัด ไม่มีผลต่อค่าความร้อน (Heating Value) อย่างมีนัยสำคัญ มีค่า P-value เท่ากับ 0.873 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มกลีเซอรินในอัตราส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ต่อการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพสูงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสากล

4.3.6 ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

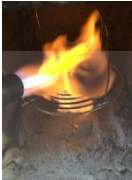
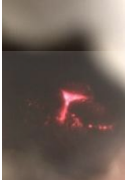
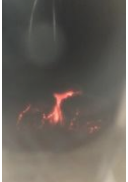
จากการสังเกตลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างถ่านหะมน้ำสำหรับปาล์มต่อกลีเซอรินแตกต่างกัน โดยพิจารณาช่วงเผาไหม้ถ่านอัดแท่งหรือภายในเวลา 70 นาที และพิจารณาอากาศทฤษฎี 100 % ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าลักษณะสีของเปลวไฟและการเกิดควันมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนตาม อัตราส่วนผสม ในขณะที่ผลของความดันการกดอัด

ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างได้อย่างเด่นชัดด้วยการพิจารณาเชิงสายตา ถ่านอัดแท่งที่มีอัตราส่วนผสม 100 : 0 ให้เปลวไฟขนาดเล็ก สีออกส้มแดง ไม่ติดไฟและไม่มีควันเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ ซึ่งเป็นลักษณะของการเผาไหม้ถ่านเป็นหลัก เมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินเป็น 80 : 20 และ 75 : 25 พบว่าเปลวไฟมีความสว่างและความยาวเพิ่มขึ้นและติดไฟ สีเปลวไฟมีแนวโน้มเป็นสีเหลืองสว่างมากขึ้น และเกิดควันในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของกลีเซอรินที่เป็นสารระเหยง่ายและช่วยเร่งการจุดติดไฟ สำหรับอัตราส่วนผสม 70 : 30 พบว่าเปลวไฟมีความรุนแรงและสว่างชัดเจนที่สุด โดยให้เปลวไฟที่ติดไฟสีเหลืองสดและมีความสูงมากกว่าสัดส่วนอื่น อย่างไรก็ตาม การเกิดควันในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ซึ่งอาจเกิดจากการระเหยและการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์ของกลีเซอรินในปริมาณสูงก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงการเผาไหม้ของถ่านเป็นหลัก เมื่อพิจารณาผลของ ความดันการกดอัด พบว่าไม่สามารถสังเกตความแตกต่างของสีเปลวไฟหรือปริมาณควันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากความดันการกดอัดส่งผลต่อโครงสร้างภายในและความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งเป็นหลัก มากกว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ดังนั้น ลักษณะการเผาไหม้ที่ปรากฏจึงถูกแสดงโดยอัตราส่วนผสมระหว่างถ่านห้ำมันสำปะหลังและกลีเซอรินเป็นปัจจัยสำคัญ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมมีอิทธิพลโดยตรงต่อลักษณะการเผาไหม้ โดยเฉพาะสีของเปลวไฟ ความรุนแรงของการเผาไหม้ และการเกิดควัน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 4.8 ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

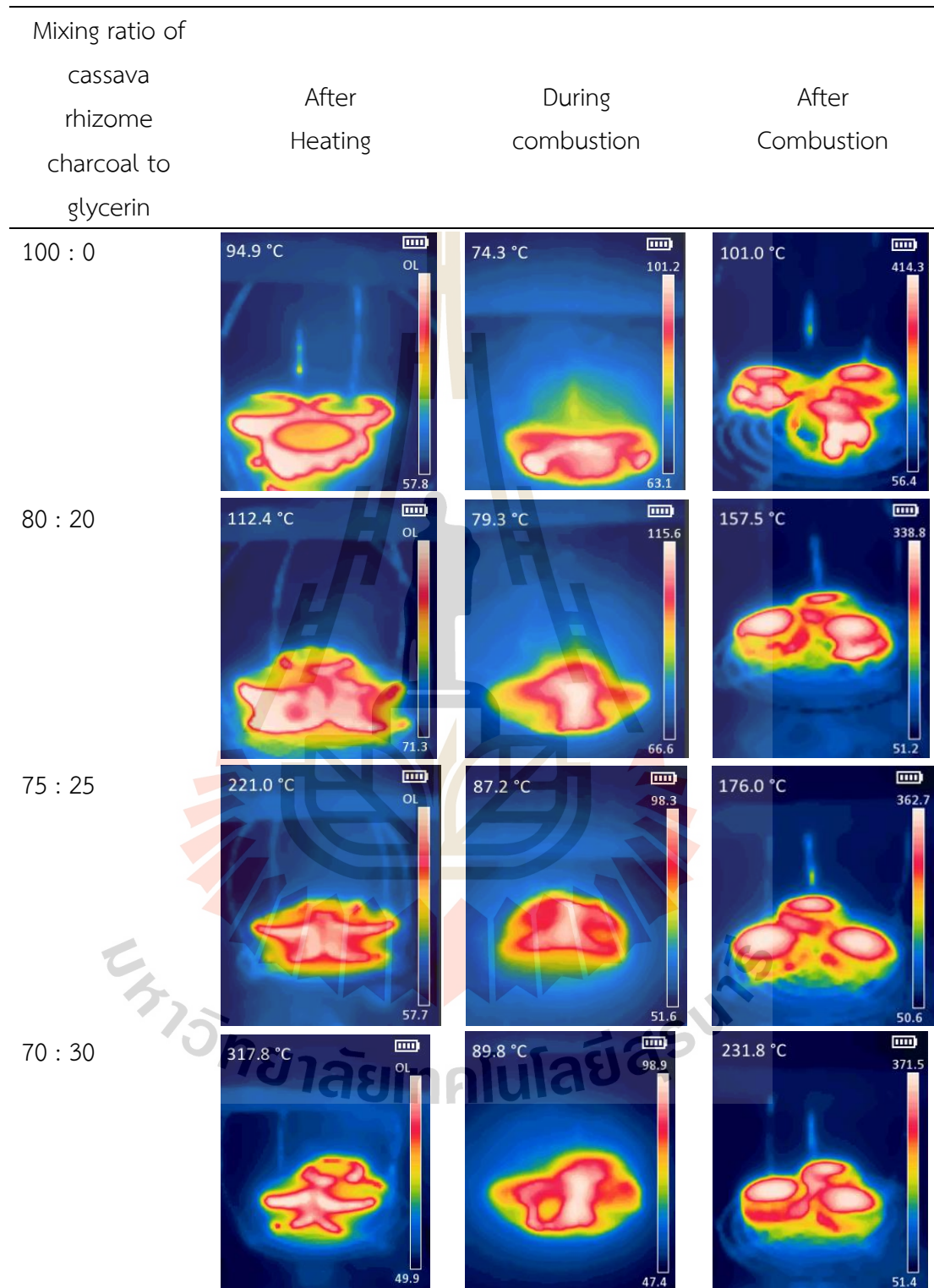
Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	During Heating	After Heating	During combustion	After Combustion
100 : 0				
80 : 20				

ตารางที่ 4.9 ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง (ต่อ)

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	During Heating	After Heating	During combustion	After Combustion
75 : 25				
70 : 30				

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนด้วย UNI-T UTi120S Professional Thermal Imager ดังแสดงในตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วน 100 : 0 มีอุณหภูมิหลังให้ความร้อน 94.9 °C ระหว่างการเผาไหม้ 74.3 °C และหลังการเผาไหม้ 101.0 °C ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น เมื่อเพิ่มกลีเซอรินเป็น 80 : 20 อุณหภูมิหลังให้ความร้อนเพิ่มเป็น 112.4 °C ระหว่างการเผาไหม้ 79.3 °C และหลังการเผาไหม้ 157.5 °C สำหรับอัตราส่วน 75 : 25 พบว่าอุณหภูมิหลังให้ความร้อนเพิ่มขึ้นชัดเจนเป็น 221.0 °C ระหว่างการเผาไหม้ 87.2 °C และหลังการเผาไหม้ 176.0 °C และที่อัตราส่วน 70 : 30 ซึ่งมีกลีเซอรินสูงสุด ให้ค่าอุณหภูมิหลังให้ความร้อนสูงสุดที่ 317.8 °C ระหว่างการเผาไหม้ 89.8 °C และหลังการเผาไหม้ 231.8 °C สัดส่วนกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนผสม อุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกช่วงของการทดสอบทั้งหลังให้ความร้อน ระหว่างการเผาไหม้ (ถ่ายภาพผ่านช่องกระจกดูการเผาไหม้) และหลังการเผาไหม้ โดยเฉพาะช่วงหลังให้ความร้อนและหลังการเผาไหม้ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของกลีเซอรินที่มีค่าความร้อนสูง จึงส่งผลให้เกิดการสะสมและคายพลังงานความร้อนมากขึ้น นอกจากนี้ แม้ว่าความดันการกดอัดจะมีผลต่อโครงสร้างภายในและความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งเป็นหลัก แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงโดยตรง ดังนั้น การวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนของการเผาไหม้ที่ปรากฏจากการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาพความร้อนจึงสะท้อนให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านหุงต้มสำหรับปิ้งย่างและกลีเซอรินเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งในการทดลองเชิงลึกนี้

ตารางที่ 4.10 ผลลักษณะการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน



4.3.7 ผลมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

การประเมินผลมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองเชิงลึก โดยพิจารณาช่วงเผาไหม้ถ่านอัดแท่งหรือภายในเวลา 70 นาที และพิจารณาอากาศทฤษฎี 100 % ทั้งลักษณะทางกายภาพของควันที่สังเกตได้ด้วยสายตา และค่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย Testo 350 แสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ โดยลักษณะควันที่ปรากฏสามารถสะท้อนความสมบูรณ์ของกระบวนการเผาไหม้ในเบื้องต้น เช่น ความหนาแน่น สีของควัน และความต่อเนื่องของการเกิดควัน ขณะที่ค่ามลพิษที่วัดได้ดังนี้ CO, NO_x, SO₂, O₂ และ CO₂ แสดงถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสังเกตควัน และข้อมูลเชิงปริมาณจากค่าความเข้มข้นของมลพิษ จะช่วยให้สามารถอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองได้อย่างครอบคลุมและชัดเจน

ตารางที่ 4.11 ผลลักษณะทางกายภาพของควันการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Physical characteristics of smoke
100 : 0	
80 : 20	
75 : 25	
70 : 30	

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.10 พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินในส่วนผสมของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ปริมาณและความหนาแน่นของควันมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสามารถอธิบายได้จากลักษณะองค์ประกอบทางเคมีของกลีเซอริน $C_3H_8O_3$ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนค่อนข้างสูง และมีหมู่ไฮดรอกซิลหลายตำแหน่ง ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ กลีเซอรินจะเกิดกระบวนการระเหยและแตกตัว (Thermal cracking) ให้เป็นสารระเหยอินทรีย์ขนาดเล็ก และไอรระเหยจำนวนมาก หากอัตราการป้อนออกซิเจนหรือการแพร่ของอากาศเข้าสู่เนื้อเชื้อเพลิงไม่เพียงพอ สารระเหยเหล่านี้จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และอนุภาคคาร์บอนละเอียด (Soot) ซึ่งปรากฏเป็นควันขาวขุ่นหรือเทาอ่อน ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอริน ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน ทำให้ความเข้มของควันเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด สัดส่วน 100 : 0 (ไม่มีกลีเซอริน) จากการสังเกตไม่เห็นควันเกิดขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงหลักคือถ่านซึ่งผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์แล้ว มีปริมาณสารระเหยต่ำ การเผาไหม้จึงใกล้เคียงการเผาไหม้คาร์บอนคงเหลือ (Fixed carbon) เป็นหลัก ทำให้เกิดการเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์และไม่เกิดควัน สัดส่วน 80 : 20 เริ่มเห็นควันเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ความหนาแน่นของควันมากกว่าสัดส่วน 100 : 0 เนื่องจากมีการเติมกลีเซอรินซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบ $C_3H_8O_3$ ทำให้ปริมาณสารระเหย (Volatile compounds) เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวและระเหยก่อนเผาไหม้สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดควันมากขึ้น สัดส่วน 75 : 25 ควันมีความหนาแน่นสูงขึ้นต่อเนื่อง และมีลักษณะขุ่นชัดเจนกว่า 80 : 20 แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารระเหยจากกลีเซอรินเริ่มมีบทบาทเด่นต่อกระบวนการเผาไหม้ เมื่ออัตราส่วนกลีเซอรินเพิ่มขึ้น อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C ratio) ของเชื้อเพลิงรวมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ระหว่างกลางจากการสลายตัวมากขึ้น และหากออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น และในสัดส่วน 70 : 30 เป็นสัดส่วนที่สังเกตควันได้มากที่สุด ควันมีความหนาแน่นสูงและต่อเนื่อง เนื่องจากปริมาณกลีเซอรินสูง ทำให้เกิดการระเหยและการแตกตัวของสารอินทรีย์จำนวนมาก เมื่อปริมาณสารระเหยเกินความสามารถของระบบในการผสมกับออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ จึงเกิดอนุภาคคาร์บอนละเอียดและผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ควันเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ในทางกลับกันผลของความดันการกดอัดไม่แสดงความแตกต่างของควันอย่างชัดเจน เนื่องจากความดันมีผลหลักต่อโครงสร้างทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นและความพรุนของก้อนเชื้อเพลิง มากกว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี หากช่วงความดันที่ใช้ไม่ได้ทำให้โครงสร้างความพรุนแตกต่างกันมากพอ การแพร่ของออกซิเจนและกลไกการเผาไหม้โดยรวมจึงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ลักษณะควันใกล้เคียงกัน

จากการเผาไหม้พบว่าควันสังเกตได้ชัดเจนในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้จนกระทั่งมวลเชื้อเพลิงลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของมวลเริ่มต้น หลังจากนั้นปริมาณควันลดลงอย่างชัดเจนหรือแทบไม่ปรากฏ เนื่องจากช่วงต้นของการเผาไหม้เป็นระยะที่เกิดการระเหยของความชื้นและการสลายตัวของสารระเหย (Volatile matter) ภายในเชื้อเพลิง โดยเฉพาะส่วนของกลีเซอรินซึ่งแตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดไอรระเหยหากการผสมกับออกซิเจนยังไม่สมบูรณ์จะเกิดควันในปริมาณสูง เมื่อมวลเชื้อเพลิงลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง สารระเหยส่วนใหญ่ได้ถูกปลดปล่อยและเผาไหม้

ไปแล้ว เชื้อเพลิงที่เหลืออยู่จะมีสัดส่วนของคาร์บอนคงเหลือ (Fixed carbon) สูงขึ้น การเผาไหม้ในระยะนี้จึงเป็นการเผาไหม้ของถ่านที่ค่อนข้างสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้การเกิดอนุภาคคาร์บอนละเอียดและก๊าซจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ลดลง ส่งผลให้ควันลดลงหรือไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกล่าวโดยสรุป การเกิดควันสัมพันธ์กับช่วงการสลายตัวของสารระเหยเป็นหลัก เมื่อเข้าสู่ระยะการเผาไหม้คาร์บอนคงเหลือ การเผาไหม้มีความเสถียรมากขึ้นและควันจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งหมดที่อธิบายมาสรุปได้ว่าปริมาณควันที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับองค์ประกอบทางเคมีและพฤติกรรมการสลายตัวของกลีเซอริน ขณะที่ความดันการกักอัดมีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางกายภาพมากกว่า จึงไม่แสดงผลต่อการเกิดควันอย่างเด่นชัดในเงื่อนไขการทดลองนี้



ตารางที่ 4.12 ผลของมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Emission			
		CO (Max values)	NO _x	CO ₂	SO ₂
		(Mean ± SD)			
		(ppm)	(ppm)	(%)	(ppm)
	IRBEA Standards	1,310	106	(No limited)	76
100 : 0	120	17.00 ± 11.39 ^a (34)		0.13 ± 0.01	
	150	17.33 ± 11.00 ^a (41)		0.11 ± 0.01	
	180	11.56 ± 6.00 ^a (18)		0.12 ± 0.01	
80 : 20	120	16.00 ± 12.28 ^a (38)		0.10 ± 0.01	
	150	19.33 ± 8.70 ^a (35)		0.11 ± 0.01	
	180	38.44 ± 19.94 ^b (70)		0.10 ± 0.02	
75 : 25	120	66.56 ± 58.26 ^{de} (167)	0	0.12 ± 0.02	0
	150	59.00 ± 42.33 ^{cd} (128)		0.12 ± 0.01	
	180	48.00 ± 18.26 ^b (67)		0.12 ± 0.1	
70 : 30	120	54.44 ± 29.47 ^{bc} (117)		0.10 ± 0.02	
	150	46.44 ± 21.23 ^{bc} (80)		0.10 ± 0.2	
	180	77.67 ± 37.45 ^e (154)		0.12 ± 0.02	

จากตารางที่ 4.11 ผลการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ผลการทดลองภายใต้สภาวะใช้อากาศทฤษฎี 100 % ซึ่งเป็นอากาศในปริมาณที่สอดคล้องกับความต้องการออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยอากาศปกติมีออกซิเจนประมาณ 21 % v/v (v/v หมายถึงสัดส่วนเชิงปริมาตรของก๊าซต่อปริมาตรก๊าซทั้งหมด) ผลการทดลองพบว่าค่า O_2 ในบรรยากาศการทดสอบยังคงอยู่ใกล้ค่าของอากาศปกติ แสดงให้เห็นว่าปริมาณอากาศตามทฤษฎี ค่า O_2 ระหว่างการทดสอบในส่วนของการอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดที่แตกต่างกันทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 21.03 – 21.10 % จึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ CO_2 ซึ่งเป็นผลผลิตหลักของการเผาไหม้สมบูรณ์มีค่าค่อนข้างต่ำและคงที่ทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.10 – 0.13 % แสดงถึงระดับการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์เต็มที่ ส่วน NO_x ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิสูงไม่ตรวจพบในทุกสภาวะ แสดงว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ยังไม่สูงพอให้เกิด NO_x อย่างมีนัยสำคัญ และ SO_2 ไม่พบเนื่องจากวัตถุดิบมีปริมาณกำมะถันต่ำหรือไม่มีเลย ในส่วนของ CO หรือคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลผลิตหลักของการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เป็นก๊าซพิษที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่ระคายเคือง ทำให้มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยประสาทสัมผัส แต่มีอันตรายสูงต่อระบบเลือดและระบบประสาท เมื่อพิจารณาผลตามอัตราส่วนผสม พบว่าสูตรที่มีการเติมกลีเซอรินสูง 75 : 25 และ 70 : 30 ให้ค่า CO สูงอยู่ที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 ความดันการกดอัดอยู่ที่ 180 kg/cm² มีค่าเฉลี่ย 77.67 ± 37.45 ppm และค่ามากที่สุดอยู่ที่ 154 ppm แต่ค่า CO มากที่สุดที่วัดได้คือ 167 ppm อยู่ที่อัตราส่วนผสม 75 : 25 ความดันการกดอัดอยู่ที่ 120 kg/cm² และแปรปรวนมากกว่าสูตร 100 : 0 และ 80 : 20 เนื่องจากกลีเซอรินมีพฤติกรรมการระเหยและการสลายตัวทางความร้อนที่รวดเร็ว โดยการเพิ่มความดันการกดอัดจาก 120, 150 และ 180 kg/cm² ค่ามลพิษที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันและแตกต่างกันน้อยถึงแม้การเพิ่มความดันการกดอัดจะทำให้ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งเพิ่ม เนื่องจากความหนาแน่นของถ่านสูงขึ้นส่งผลให้ความพรุนและช่องทางการแพร่ของออกซิเจนลดลงก็ตาม

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติครั้งนี้พิจารณาเฉพาะค่าความเข้มข้นของ CO เนื่องจาก CO เป็นก๊าซมลพิษที่มีความเป็นพิษสูงต่อมนุษย์ ผลการทดสอบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกัน (a – e) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p \leq 0.05$ พบว่าอัตราส่วนผสม 100 : 0 อยู่ในกลุ่มอักษรเดียวกัน a ทุกความดันในการกดอัด และ 80 : 20 อยู่ในกลุ่มอักษรเดียวกัน a – b ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าเฉลี่ยของมลพิษไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่อัตราส่วนผสม 75 : 25 และ 70 : 30 ถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษรที่แตกต่างออกไป d – e แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างจากสูตรที่มีการเติมกลีเซอรินต่ำอย่างมีนัยสำคัญ การจัดกลุ่มตัวอักษรที่เรียงลำดับจาก a ไป e สะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ามลพิษ CO ตามสัดส่วนการผสม โดยสูตรที่มีการเติมกลีเซอรินสูงมีแนวโน้มให้ค่ามลพิษสูงกว่าและถูกแยกออกเป็นกลุ่มอักษรที่แตกต่างอย่างชัดเจน ขณะที่สูตรที่มีการเติมกลีเซอรินต่ำให้ค่ามลพิษใกล้เคียงกันและอยู่ในกลุ่มอักษรเดียวกัน ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสอง

ทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่พบว่าอัตราส่วนผสมมีผลต่อการเกิดมลพิษ CO อย่างมีนัยสำคัญ ($P = 0.000$) ขณะที่ความดันในการกดอัดเพียงปัจจัยเดียวไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} = 0.118$) อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมและความดันในการกดอัดมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} = 0.003$) ภายใต้การทดลองแบบสามซ้ำ แสดงให้เห็นว่าผลของความดันในการกดอัดต่อมลพิษขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงเป็นหลัก

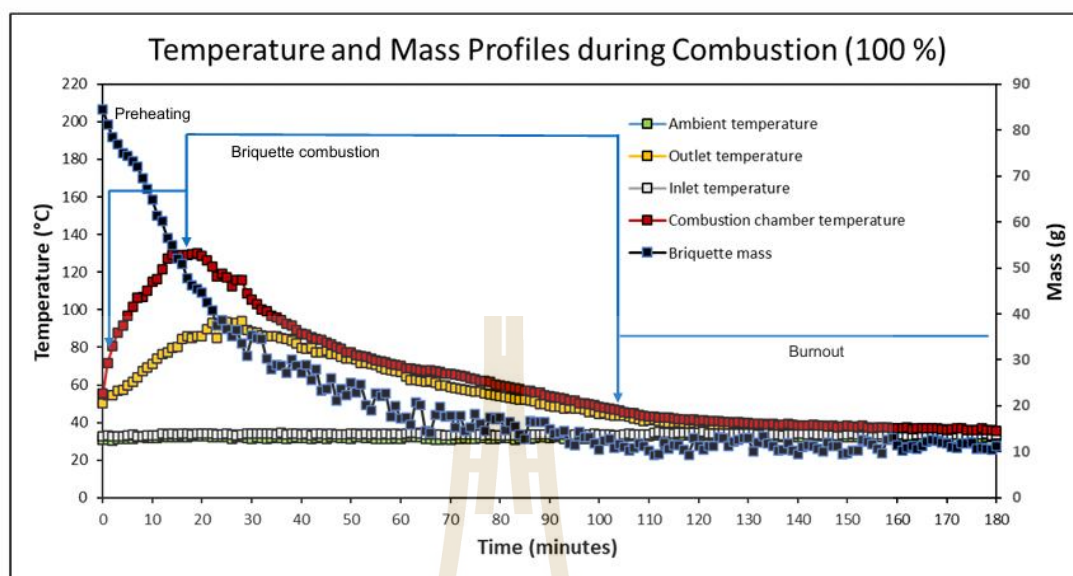
ค่ามลพิษทั้งหมดที่ตรวจวัดได้ยังคงต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย IRBEA (Irish BioEnergy Association) การปล่อยก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ชีวมวลในโรงไฟฟ้าขนาดกลาง (Medium Combustion Plants - MCP) โดยเน้นที่การปฏิบัติตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรปเกี่ยวกับค่าการปล่อยสูงสุดที่อนุญาต (Emission Limit Values - ELVs) ตามข้อกำหนดของ Directive (EU) 2015/2193 (European Parliament, 2015) และ Commission Regulation (EU) 2015/1185 (European Commission, 2015) อย่างมากแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้อากาศทฤษฎี 100 % ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางสิ่งแวดล้อม

4.3.8 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองเผาไหม้ถ่านอัดแท่งเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นได้ในด้านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การลดลงของมวลเชื้อเพลิง ผลที่ได้จากการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.8.1 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 100 %

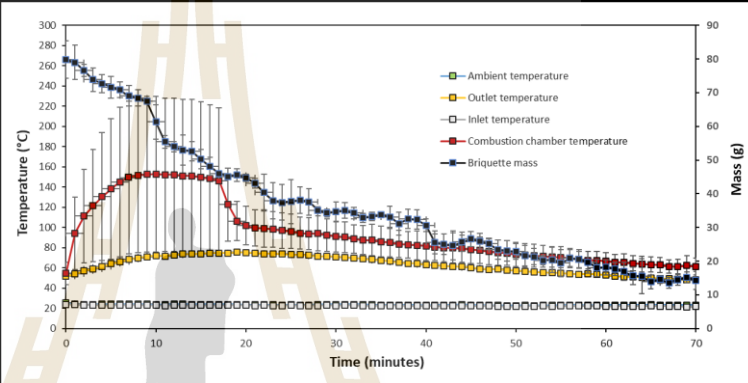
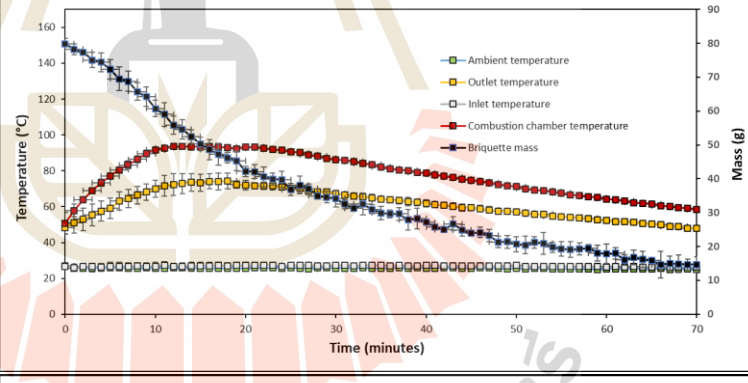
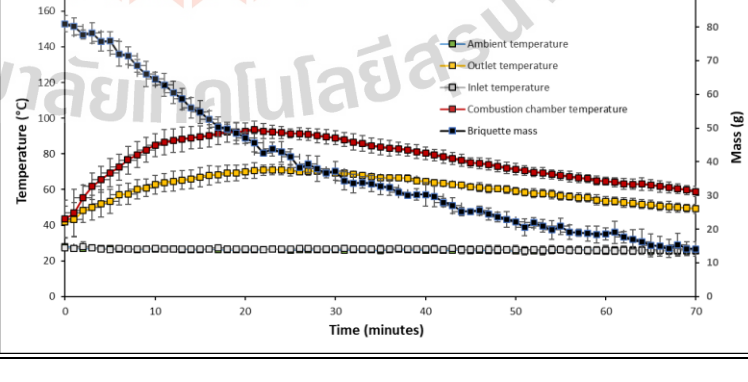
จากการทดลองศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 100 % โดยจะเก็บข้อมูลจากเริ่มต้นการเผาไหม้จนถ่านอัดแท่งมอดดับใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง หรือ 180 นาที แสดงดังรูปที่ 4.11 และ ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งกำหนดภายในเวลา 70 นาที ทุกอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัด แสดงดังตารางที่ 4.12 โดยแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 3 ซ้ำ



รูปที่ 4.11 ผลพฤติกรรมกาเผาไหม้อากาศทฤษฎี 100 % เริ่มต้นการเผาไหม้จนถ่านอัดแท่งมอดดับ

รูปที่ 4.11 แสดงพฤติกรรมกาเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 100 % ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงช่วงมอดดับ โดยสามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนเป็น 3 ช่วง เริ่มจากช่วงอุ่นก่อนการเผาไหม้ (Preheating) ซึ่งอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิทางออกเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว สะท้อนถึงการรับความร้อนเริ่มต้นและการระเหยของความชื้นในถ่านอัดแท่งซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะการเกิดควันที่เกิดขึ้นจนถึงมวลเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของมวลเริ่มต้นการเผาไหม้ ขณะเดียวกันมวลถ่านลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงถึงการสูญเสียน้ำและสารระเหย จากนั้นเข้าสู่ช่วงการเผาไหม้หลักของถ่านอัดแท่ง (Briquette combustion) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดและค่อย ๆ ลดลงตามเวลา แสดงถึงการเผาไหม้ของคาร์บอนเป็นหลัก ภายใต้ปริมาณอากาศที่เพียงพอตามทฤษฎี ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างเสถียร โดยอุณหภูมิทางออกมีแนวโน้มใกล้เคียงกับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ขณะที่อุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไปมวลถ่านอัดแท่งลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่ช่วงมอดดับ (Burnout) ซึ่งอุณหภูมิทุกตำแหน่งลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิแวดล้อม แสดงถึงการสิ้นสุดปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การจ่ายอากาศทฤษฎี 100 % สามารถทำให้การเผาไหม้เกิดได้ครบถ้วนตั้งแต่การเริ่มติดไฟ การเผาไหม้หลัก จนถึงการมอดดับของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจนและเป็นกระบวนการ

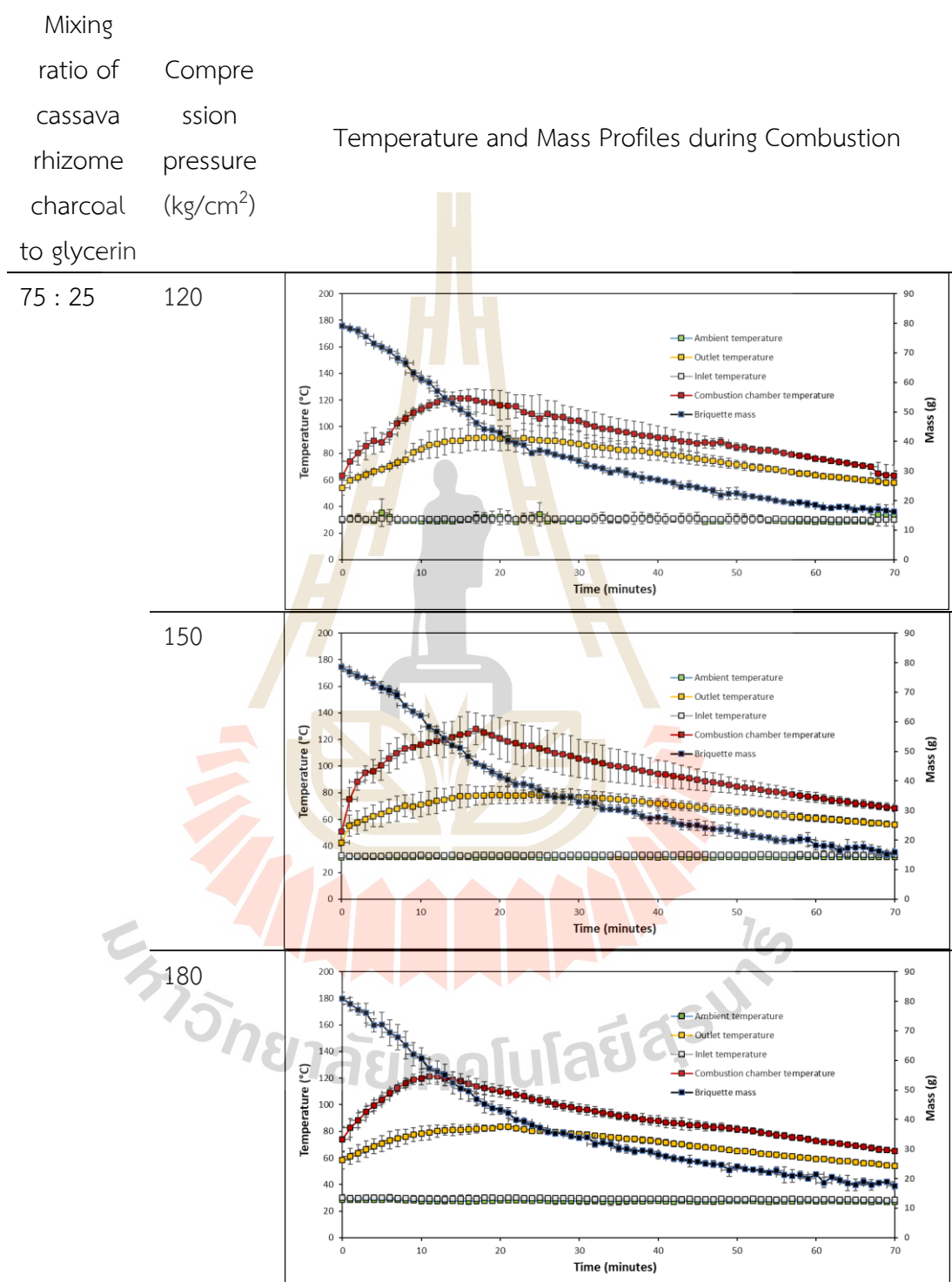
ตารางที่ 4.13 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 100 %

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin		Compre ssion pressure (kg/cm ²)	Temperature and Mass Profiles during Combustion	
100 : 0	120			
	150			
	180			

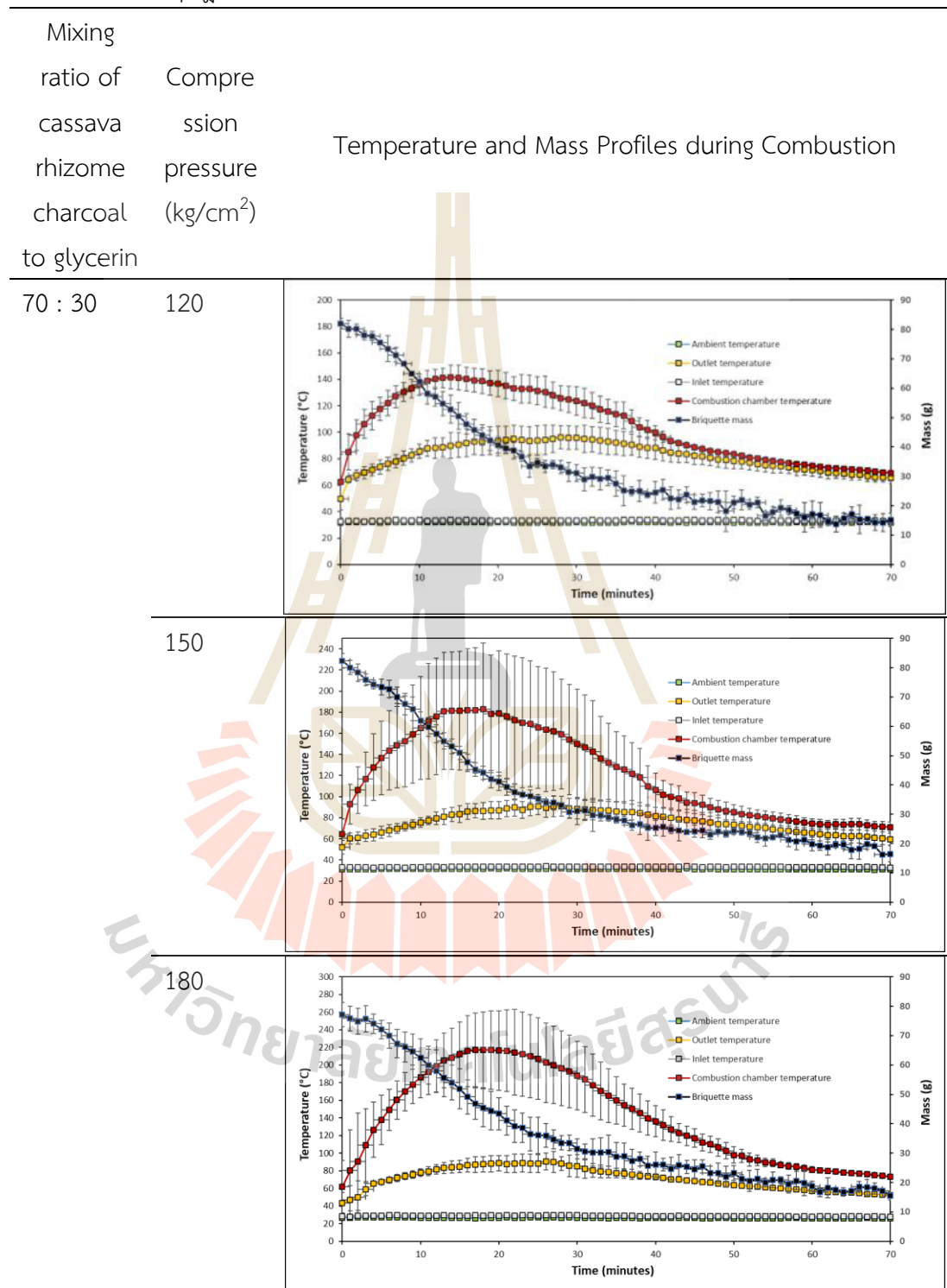
ตารางที่ 4.12 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ผ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 100 % (ต่อ)

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin		Compression pressure (kg/cm ²)	Temperature and Mass Profiles during Combustion	
80 : 20	120			
	150			
	180			

ตารางที่ 4.12 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 100 % (ต่อ)



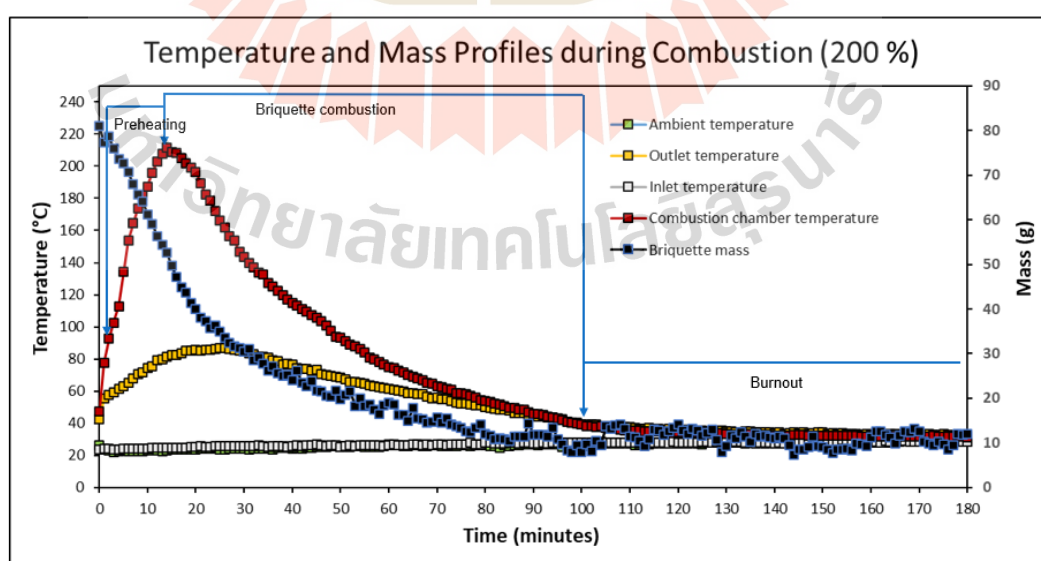
ตารางที่ 4.14 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 100 %



ผลการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งเห้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรีนภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 100 % จากตารางที่ 4.12 พบว่า อัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงควรพิจารณาสมรรถนะด้านอื่นประกอบ อย่างไรก็ตาม แนวโน้มพฤติกรรมการเผาไหม้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยสามารถแบ่งได้ 2 ช่วงหลักภายในระยะเวลา 70 นาที ที่ทำการศึกษาช่วงเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง ได้แก่ ช่วงอุ่นก่อนการเผาไหม้ (Preheating) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้และอุณหภูมิทางออกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สัมพันธ์กับการระเหยความชื้นและสารระเหย ส่งผลให้มวลถ่านลดลงอย่างชัดเจน จากนั้นเข้าสู่ช่วงการเผาไหม้หลักของถ่านอัดแท่ง (Briquette combustion) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดและค่อย ๆ ลดลงตามเวลา แสดงถึงการเผาไหม้ของคาร์บอนเป็นหลักภายใต้ปริมาณอากาศที่เพียงพอตามทฤษฎี ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างเสถียร โดยอุณหภูมิทางออกมีแนวโน้มสอดคล้องกับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ขณะที่อุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้การวิเคราะห์มุ่งเน้นเฉพาะช่วงการเผาไหม้ภายในเวลา 70 นาที จึงไม่พิจารณาช่วงมอดดับ (Burnout) ในการอธิบายผลครั้งนี้

4.3.8.2 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 200 %

จากการทดลองศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 200 % โดยจะเก็บข้อมูลจากเริ่มต้นการเผาไหม้จนถ่านอัดแท่งมอดดับใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง หรือ 180 นาที แสดงดังรูปที่ 4.12 และ ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งกำหนดภายในเวลา 70 นาที ทุกอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัด แสดงดังตารางที่ 4.13 โดยแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 2 ซ้ำ



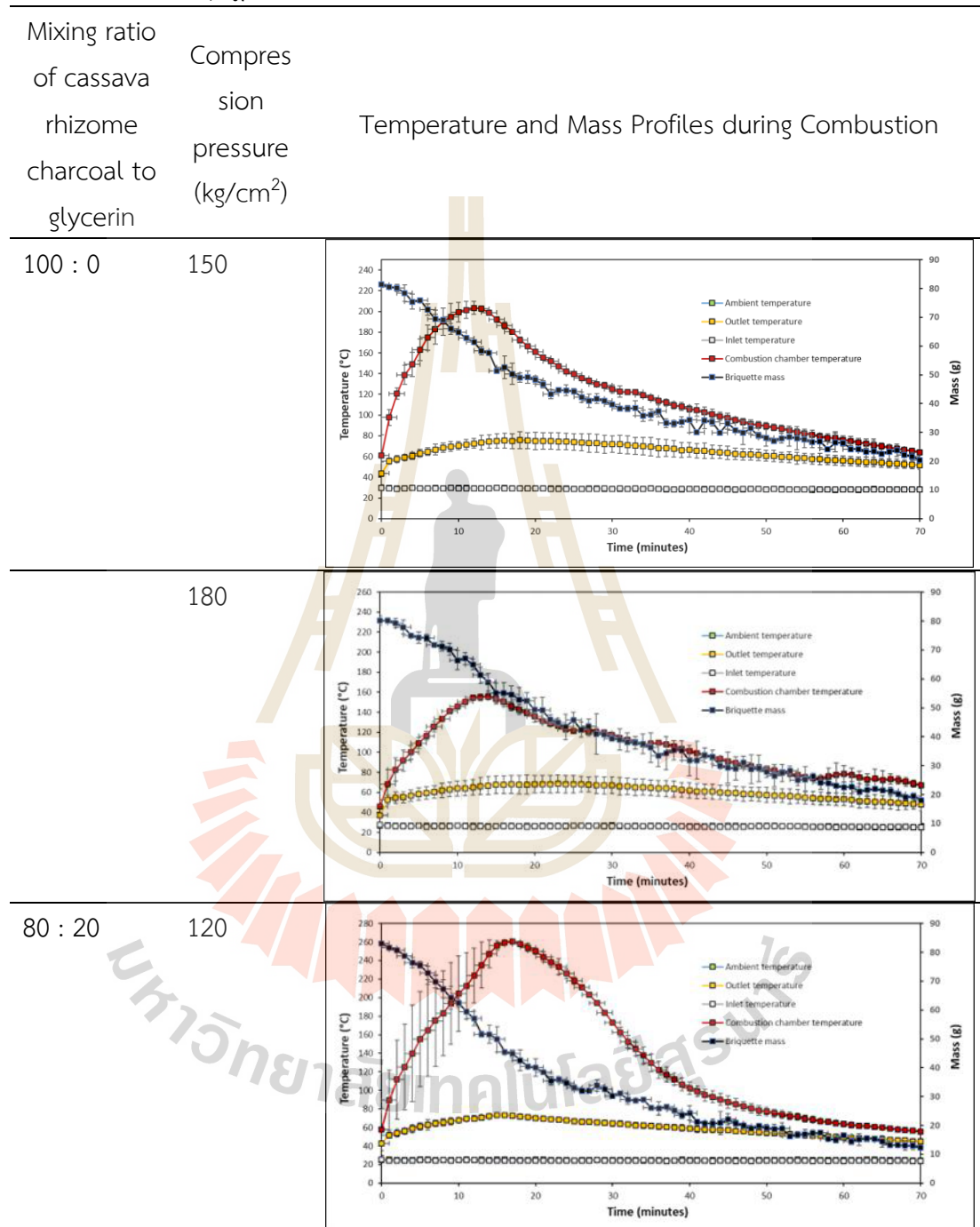
รูปที่ 4.12 ผลพฤติกรรมการเผาไหม้อากาศทฤษฎี 200 % เริ่มต้นการเผาไหม้จนถ่านอัดแท่งมอดดับ

รูปที่ 4.12 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 200 % ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับกรณีอากาศทฤษฎี 100 % โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงอุ่นก่อนการเผาไหม้ (Preheating) ที่อุณหภูมิห้องเผาไหม้และอุณหภูมิทางออกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พร้อมกับมวลถ่านลดลงอย่างชัดเจนจากการระเหยความชื้นและสารระเหย จากนั้นเข้าสู่ช่วงการเผาไหม้หลัก (Briquette combustion) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดแล้วค่อย ๆ ลดลงตามเวลา แสดงถึงการเผาไหม้ของคาร์บอนเป็นหลัก โดยการจ่ายอากาศที่มากขึ้นช่วยให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดได้รวดเร็วในช่วงต้น แต่แนวโน้มโดยรวมยังคงเป็นไปในรูปแบบเดียวกับกรณีอากาศทฤษฎี 100 % สุดท้ายเข้าสู่ช่วงมอดดับ (Burnout) ซึ่งอุณหภูมิทุกตำแหน่งลดลงเข้าใกล้อุณหภูมิแวดล้อมและมวลถ่านคงที่หรือเหลือแค่ขี้เถ้า แสดงถึงการสิ้นสุดของปฏิกิริยาการเผาไหม้ สะท้อนว่าการเพิ่มอากาศเกินทฤษฎีไม่ได้เปลี่ยนรูปแบบพฤติกรรมของการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลต่ออัตราและความรวดเร็วของกระบวนการเป็นหลัก โดยเปรียบเทียบมวลลดลงเหลือแต่ขี้เถ้าของอากาศทฤษฎี 200 % จะเร็วกว่าอากาศทฤษฎี 100 %

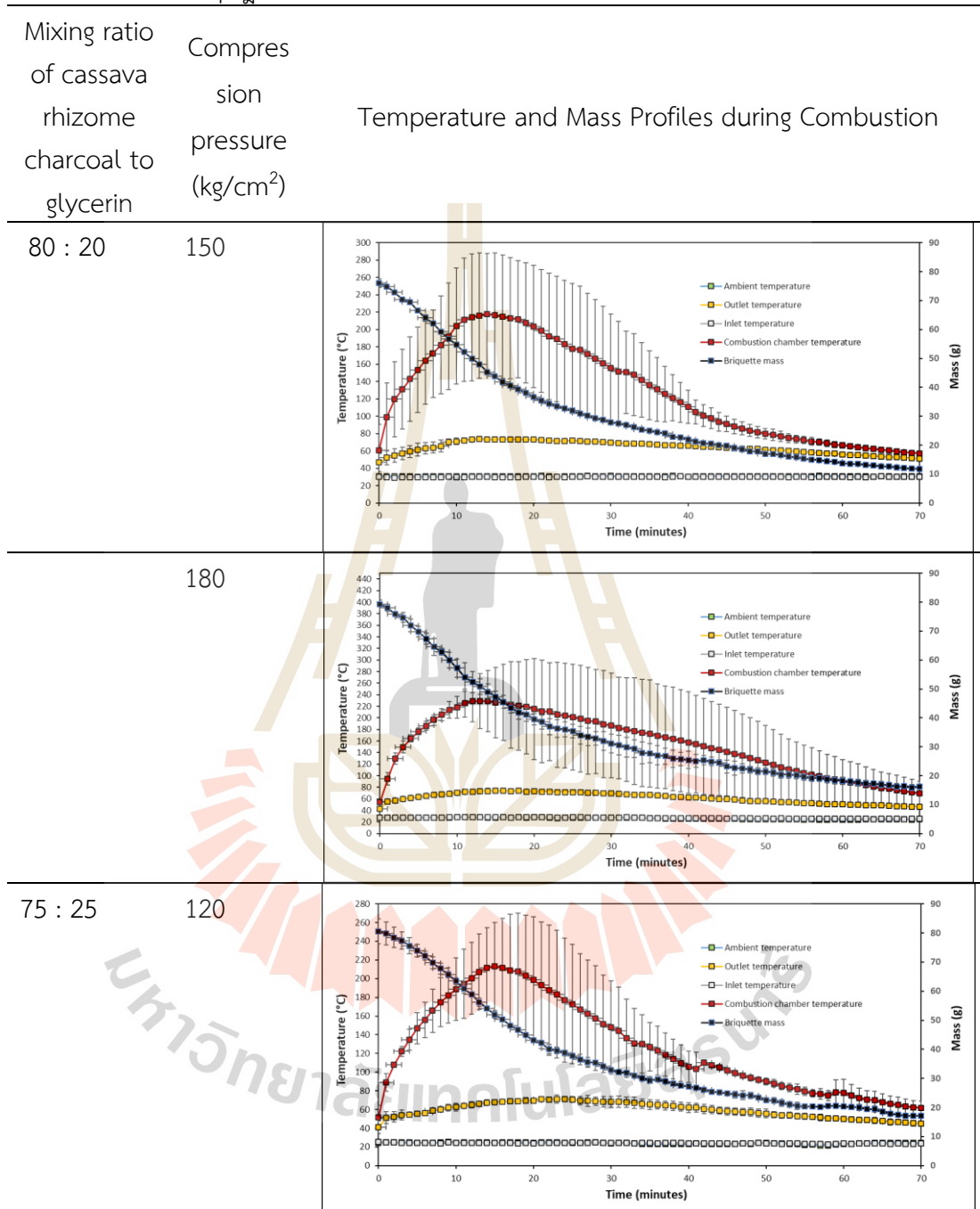
ตารางที่ 4.15 ผลของการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศทฤษฎี 200 %

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Temperature and Mass Profiles during Combustion
100 : 0	120	

ตารางที่ 4.13 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 200 % (ต่อ)



ตารางที่ 4.13 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ผ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 200 % (ต่อ)

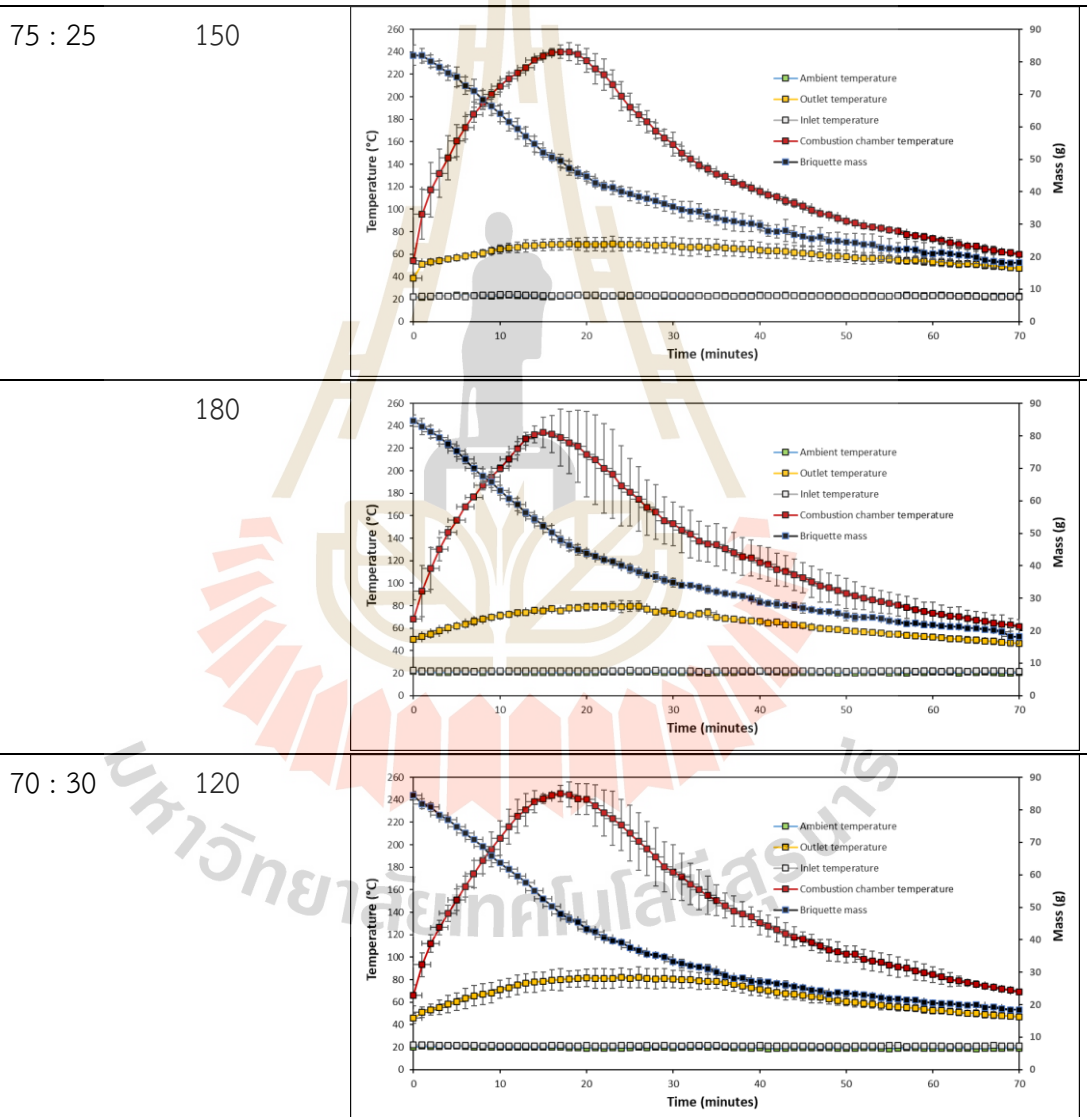


ตารางที่ 4.13 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งอากาศ
ทฤษฎี 200 % (ต่อ)

Mixing ratio
of cassava
rhizome
charcoal to
glycerin

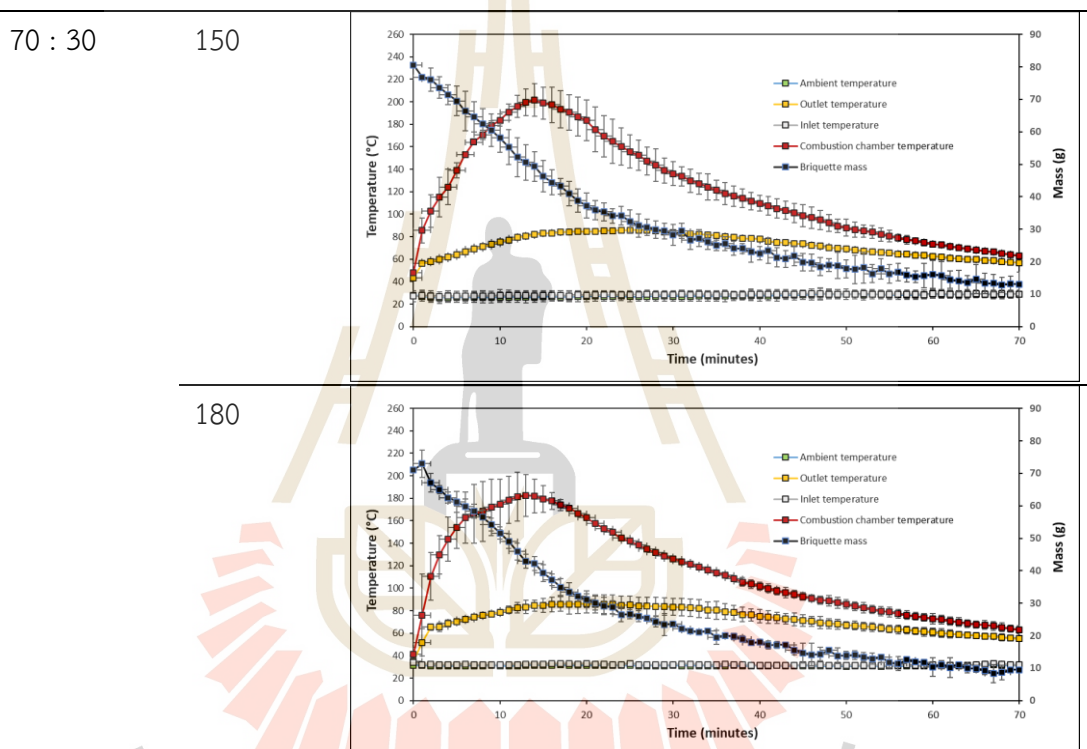
Compres
sion
pressure
(kg/cm²)

Temperature and Mass Profiles during Combustion



ตารางที่ 4.13 ผลของการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ในช่วงของการเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง
อากาศทฤษฎี 200 % (ต่อ)

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin Compression pressure (kg/cm²) Temperature and Mass Profiles during Combustion



ผลการศึกษาดังกล่าวที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 200 % มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการศึกษาดังกล่าวภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 100 % ที่รายงานไว้ในตารางที่ 4.12 โดยอัตราส่วนผสมของถ่านเหง้ามันสำปะหลังกับกลีเซอรินและความดันการกดอัดไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านพฤติกรรมการเผาไหม้ จึงควรพิจารณาสมรรถนะด้านอื่นประกอบการประเมิน อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการเผาไหม้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงหลักภายในระยะเวลา 70 นาที ได้แก่ ช่วงอุ่นก่อนการเผาไหม้ (Preheating) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้และอุณหภูมิทางออกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการระเหยของความชื้นและสารระเหย ส่งผลให้มวลถ่านลดลงอย่างชัดเจน และช่วงการเผาไหม้หลักของถ่านอัดแท่ง (Briquette combustion) ซึ่งอุณหภูมิห้องเผาไหม้มีค่าสูงสุดก่อนจะค่อย ๆ ลดลงตามเวลา อันเป็นผลจากการเผาไหม้ของคาร์บอนเป็นหลัก ภายใต้การ

จ่ายอากาศทฤษฎี 200 % พบว่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้มีแนวโน้มสูงกว่ากรณี 100 % สะท้อนถึงความเพียงพอของออกซิเจนที่เอื้อต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างเสถียร โดยอุณหภูมิทางออกมีแนวโน้มสอดคล้องกับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ขณะที่อุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ การวิเคราะห์มุ่งเน้นเฉพาะช่วงการเผาไหม้ภายในเวลา 70 นาที จึงไม่พิจารณาช่วงมอดดับ (Burnout) ในการอภิปรายผลครั้งนี้

4.3.9 ผลสมรรถนะเชิงความร้อนการทดลอง

หัวข้อนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อน โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in\ at\ T_{out,max}}$) ซึ่งสะท้อนศักยภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบและความสามารถในการให้ความร้อนของถ่านอัดแท่ง อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) ซึ่งแสดงถึงความเร็วในการใช้เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานความร้อนที่เป็นประโยชน์ สมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % แสดงดังตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งภายใต้สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in\ at\ T_{out,max}}$), อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) แสดงดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

4.3.9.1 สมรรถนะเชิงความร้อนของอากาศทฤษฎี 100 %

จากการทดลองศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนอากาศทฤษฎี 100 % ศึกษา ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in\ at\ T_{out,max}}$), อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ในอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดที่ต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 4.14 โดยแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.16 ผลสมรรถนะเชิงความร้อนอากาศแห้ง 100 %

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	$T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$ (Mean $\pm$ SD) (°C)	Combustion rate (Mean $\pm$ SD) (g/min)	Thermal efficiency (Mean $\pm$ SD) (%)
100 : 0	120	52.833 $\pm$ 1.283 ^{abc}	0.961 $\pm$ 0.100 ^{abc}	14.872 $\pm$ 1.561 ^{cd}
	150	47.417 $\pm$ 2.754 ^{bc}	0.948 $\pm$ 0.027 ^{abc}	12.798 $\pm$ 0.385 ^{abcd}
	180	45.167 $\pm$ 2.255 ^a	0.960 $\pm$ 0.066 ^{abc}	12.628 $\pm$ 1.417 ^{abcd}
80 : 20	120	46.667 $\pm$ 2.626 ^{ab}	1.042 $\pm$ 0.078 ^c	10.843 $\pm$ 1.163 ^a
	150	56.583 $\pm$ 5.150 ^{abc}	0.917 $\pm$ 0.015 ^{ab}	14.111 $\pm$ 0.615 ^{abcd}
	180	50.500 $\pm$ 4.822 ^{ab}	0.927 $\pm$ 0.038 ^{ab}	12.200 $\pm$ 0.935 ^{abcd}
75 : 25	120	62.583 $\pm$ 9.385 ^c	0.902 $\pm$ 0.007 ^{ab}	14.901 $\pm$ 1.417 ^d
	150	46.167 $\pm$ 6.788 ^{ab}	0.905 $\pm$ 0.022 ^{ab}	11.591 $\pm$ 1.778 ^{ab}
	180	53.583 $\pm$ 0.382 ^{abc}	0.912 $\pm$ 0.052 ^{ab}	13.293 $\pm$ 0.602 ^{abcd}
70 : 30	120	63.000 $\pm$ 9.331 ^c	0.999 $\pm$ 0.064 ^{bc}	13.531 $\pm$ 2.601 ^{abcd}
	150	57.667 $\pm$ 7.946 ^{bc}	0.964 $\pm$ 0.072 ^{abc}	12.129 $\pm$ 1.175 ^{abc}
	180	62.583 $\pm$ 10.681 ^c	0.883 $\pm$ 0.045 ^a	13.229 $\pm$ 1.761 ^{abcd}

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a–d) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

จากตารางที่ 4.14 พบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in \text{ at } T_{out,max}}$) อยู่ในช่วง $45.167 - 63.000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินในถ่านอัดแท่ง เนื่องจากกลีเซอรินมีค่าความร้อนที่สูงจึงสามารถถ่ายเทให้อากาศได้มาก โดยเฉพาะอัตราส่วนผสม 75 : 25 และ 70 : 30 ซึ่งให้ค่าสูงกว่าสัดส่วน 100 : 0 อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น อัตราส่วน 70 : 30 ที่ความดัน 120 และ 180 kg/cm^2 ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 63.000 ± 9.331 และ $62.583 \pm 10.681 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษรเดียวกันคือ c แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติแต่สูงกว่าสภาวะอื่น ขณะที่อัตราส่วน 100 : 0 ที่ความดัน 180 kg/cm^2 ให้ค่าต่ำสุด $45.167 \pm 2.255 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อยู่ในกลุ่มอักษร a ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่ม c ตามเกณฑ์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ สอดคล้องกับแนวโน้มที่การเติมกลีเซอรินช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in \text{ at } T_{out,max}}$) P-value เท่ากับ 0.002 ในขณะที่ความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.230 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย P-value เท่ากับ 0.053 ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าค่าดังกล่าวถูกควบคุมโดยส่วนผสมของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินเป็นหลัก

อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) มีค่าอยู่ในช่วงค่อนข้างแคบมีค่า $0.883 - 1.042 \text{ g/min}$ และไม่แสดงแนวโน้มเพิ่มหรือลดอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนผสมหรือความดันการกดอัดเนื่องจากการทดลองนั้นคำนวณอากาศเผาไหม้สมบูรณ์ของอากาศทฤษฎี 100 % ในแต่ละอัตราส่วนผสมเมื่อกลีเซอรินมากขึ้นจ่ายอากาศน้อยลง โดยค่าสูงสุดพบที่อัตราส่วน 80 : 20 ความดัน 120 kg/cm^2 เท่ากับ $1.042 \pm 0.078 \text{ g/min}$ ซึ่งอยู่ในกลุ่มอักษร c ขณะที่ค่าต่ำสุดพบที่อัตราส่วน 70 : 30 ความดัน 180 kg/cm^2 เท่ากับ $0.883 \pm 0.045 \text{ g/min}$ อยู่ในกลุ่มอักษร a แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะบางอัตราส่วนผสม ตามผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ อย่างไรก็ตาม สภาวะส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษรซ้อนทับกัน เช่น ab และ abc สะท้อนว่าอัตราการเผาไหม้โดยรวมมีความใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสม P-value เท่ากับ 0.166 ความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.059 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย P-value เท่ากับ 0.183 ทั้งหมดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าอัตราการเผาไหม้ภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 100 % ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความเสถียรและเป็นไปตามการคำนวณของการจ่ายอากาศทฤษฎี

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) มีค่าอยู่ในช่วง $10.843 - 14.901 \text{ %}$ และแสดงแนวโน้มผันแปรตามอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดร่วมกันมากกว่าปัจจัยเดียว โดยค่าสูงสุดพบที่อัตราส่วน 75 : 25 ความดัน 120 kg/cm^2 เท่ากับ $14.901 \pm 1.417 \text{ %}$

ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษร d แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากกลีเซอรินมีค่าความร้อนที่สูงส่งผลให้ในมวลเท่ากันสามารถให้ความร้อนได้มากกว่า ผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มอักษรที่แตกต่างกันสะท้อนระดับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แตกต่างกันจริง ขณะที่กลุ่มอักษรซ้อนทับ เช่น abc และ abcd มีจำนวนมากบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสม P-value เท่ากับ 0.430 และความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.292 ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาแยกกัน แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยมีผลอย่างมีนัยสำคัญ P-value เท่ากับ 0.016 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นกับการจับคู่ของอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับการจัดกลุ่มตัวอักษรของ Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

4.3.9.2 สมรรถนะเชิงความร้อนของอากาศทฤษฎี 200 %

จากการทดลองศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนอากาศทฤษฎี 200 % ศึกษา ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in} \text{ at } T_{out,max}$), อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ในอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.15 โดยแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลอง 2 ซ้ำ

ตารางที่ 4.17 ผลสมรรถนะเชิงความร้อนของร่อนอากาศพญู 200 %

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	T _{out,max} - T _{in} at T _{out,max} (Mean ± SD) (°C)	Combustion rate (Mean ± SD) (g/min)	Thermal efficiency (Mean ± SD) (%)
100 : 0	120	44.625 ± 1.945 ^{ab}	0.949 ± 0.038 ^{ab}	24.869 ± 2.679 ^a
	150	46.500 ± 9.546 ^{abc}	0.872 ± 0.032 ^a	28.828 ± 5.089 ^a
	180	42.250 ± 7.778 ^a	0.890 ± 0.022 ^a	26.589 ± 3.547 ^a
80 : 20	120	49.500 ± 2.121 ^{abc}	1.013 ± 0.003 ^b	20.828 ± 0.996 ^a
	150	43.625 ± 2.652 ^{ab}	0.917 ± 0.030 ^{ab}	22.374 ± 0.400 ^a
	180	46.000 ± 2.121 ^{ab}	0.906 ± 0.034 ^{ab}	23.218 ± 1.250 ^a
75 : 25	120	47.500 ± 2.475 ^{abc}	0.909 ± 0.063 ^{ab}	23.089 ± 4.268 ^a
	150	46.500 ± 7.425 ^{abc}	0.919 ± 0.026 ^{ab}	23.941 ± 2.969 ^a
	180	57.875 ± 5.127 ^{bc}	0.954 ± 0.064 ^{ab}	26.076 ± 0.231 ^a
70 : 30	120	61.250 ± 9.192 ^c	0.944 ± 0.026 ^{ab}	26.577 ± 4.516 ^a
	150	57.500 ± 4.950 ^{bc}	0.972 ± 0.034 ^{ab}	25.036 ± 2.599 ^a
	180	54.125 ± 8.309 ^{abc}	0.935 ± 0.083 ^{ab}	24.087 ± 5.062 ^a

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a-c) are significantly different at p≤0.05 based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) อยู่ในช่วง $42.250 - 61.250$ °C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินในถ่านอัดแท่ง เนื่องจากกลีเซอรินมีค่าความร้อนที่สูงจึงสามารถถ่ายเทให้อากาศได้มาก โดยเฉพาะอัตราส่วนผสม 75 : 25 และ 70 : 30 ซึ่งให้ค่าสูงกว่าสัดส่วน 100 : 0 อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น อัตราส่วน 70 : 30 ที่ความดัน 120 kg/cm^2 ให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 61.250 ± 9.192 °C ตามลำดับ และถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษร c สูงกว่าสถานะอื่น ขณะที่อัตราส่วน 100 : 0 ที่ความดัน 180 kg/cm^2 ให้ค่าต่ำสุด 42.250 ± 7.778 °C อยู่ในกลุ่มอักษร a ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่ม c ตามเกณฑ์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ สอดคล้องกับแนวโน้มที่การเติมกลีเซอรินช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) P-value เท่ากับ 0.012 ในขณะที่ความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.763 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย P-value เท่ากับ 0.412 ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าค่าดังกล่าวถูกควบคุมโดยส่วนผสมของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินเป็นหลัก

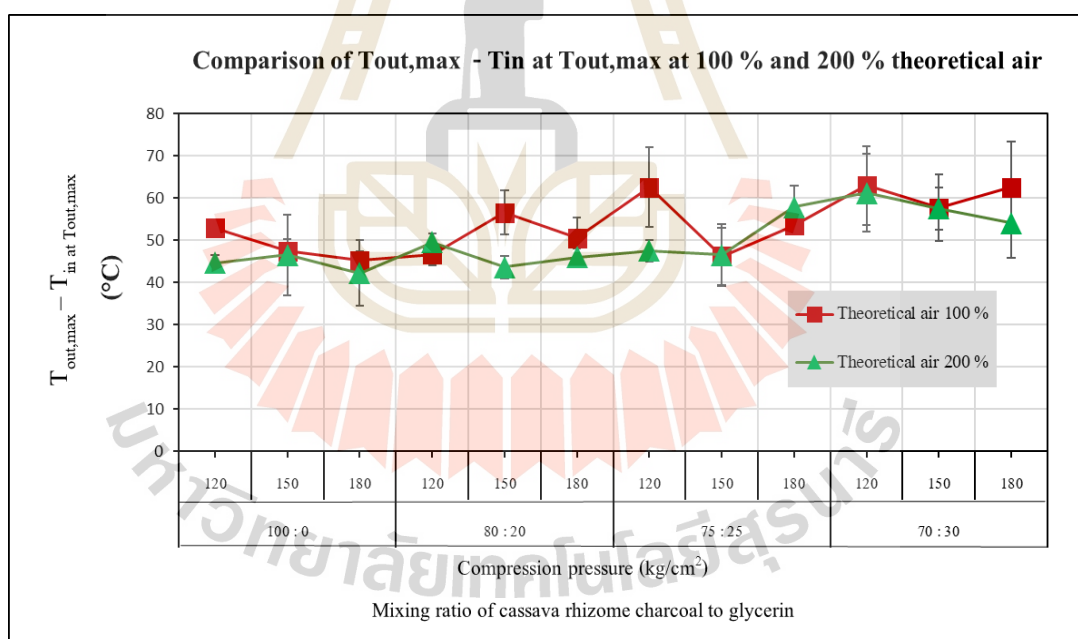
อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) มีค่าอยู่ในช่วงค่อนข้างแคบมีค่า $0.872 - 1.013 \text{ g/min}$ และไม่แสดงแนวโน้มเพิ่มหรือลดอย่างชัดเจนตามอัตราส่วนผสมหรือความดันการกดอัดเนื่องจากการทดลองนั้นคำนวณอากาศเผาไหม้ของอากาศทฤษฎี 200 % ในแต่ละอัตราส่วนผสมเมื่อกลีเซอรินมากขึ้นจ่ายอากาศน้อยลง โดยค่าสูงสุดพบที่อัตราส่วน 80 : 20 ความดัน 120 kg/cm^2 เท่ากับ $1.013 \pm 0.003 \text{ g/min}$ ซึ่งอยู่ในกลุ่มอักษร b ขณะที่ค่าต่ำสุดพบที่อัตราส่วน 100 : 0 ความดัน 150 kg/cm^2 เท่ากับ $0.872 \pm 0.032 \text{ g/min}$ อยู่ในกลุ่มอักษร a แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะบางอัตราส่วนผสม ตามผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ อย่างไรก็ตาม สถานะส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษรซ้อนทับกัน เช่น ab สะท้อนว่าอัตราการเผาไหม้โดยรวมมีความใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสม P-value เท่ากับ 0.285 ความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.252 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย P-value เท่ากับ 0.224 ทั้งหมดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าอัตราการเผาไหม้ภายใต้การจ่ายอากาศทฤษฎี 200 % ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีความเสถียรและเป็นไปตามการคำนวณของการจ่ายอากาศทฤษฎี

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) มีค่าอยู่ในช่วง $20.828 - 28.828$ % โดยค่าสูงสุดพบที่อัตราส่วน 100 : 0 ความดัน 150 kg/cm^2 เท่ากับ 28.828 ± 5.089 % ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มอักษร a แต่ผล Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มอักษรที่ไม่แตกต่างกันสะท้อนระดับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ไม่แตกต่างกัน

กลุ่มอักษรมีเพียง a ทั้งหมดบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสม P-value เท่ากับ 0.155 ความดันการกดอัด P-value เท่ากับ 0.714 และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย P-value เท่ากับ 0.819 ทั้งหมดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการจัดกลุ่มตัวอักษรของ Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

4.3.9.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่ง

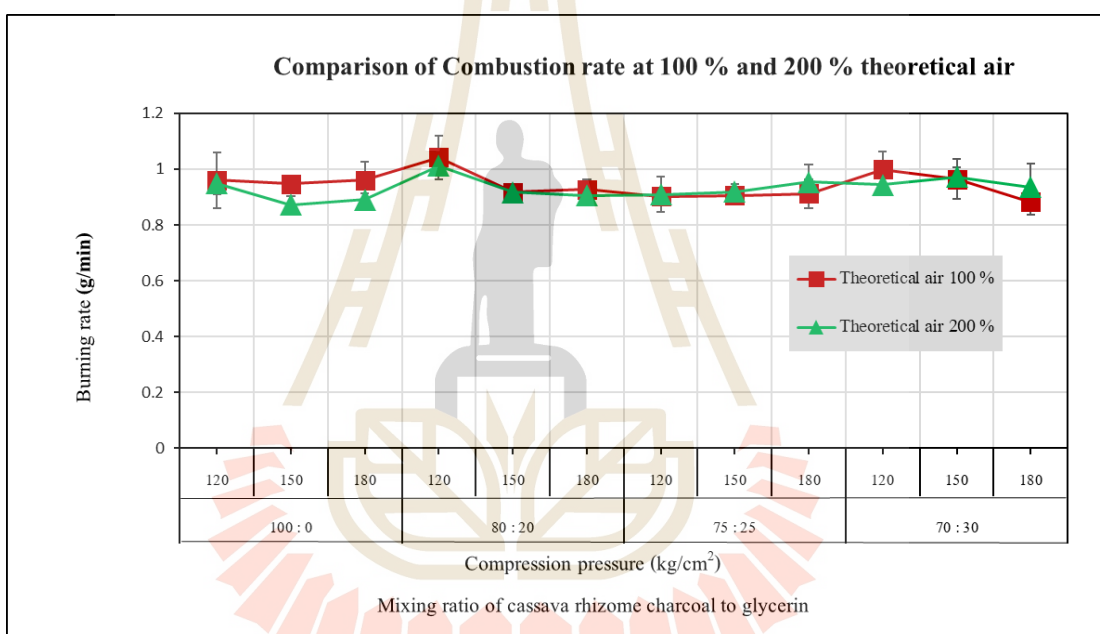
การเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินภายใต้สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) อัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) เพื่อประเมินผลของปริมาณอากาศที่จ่ายต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่งในเชิงวิเคราะห์ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ

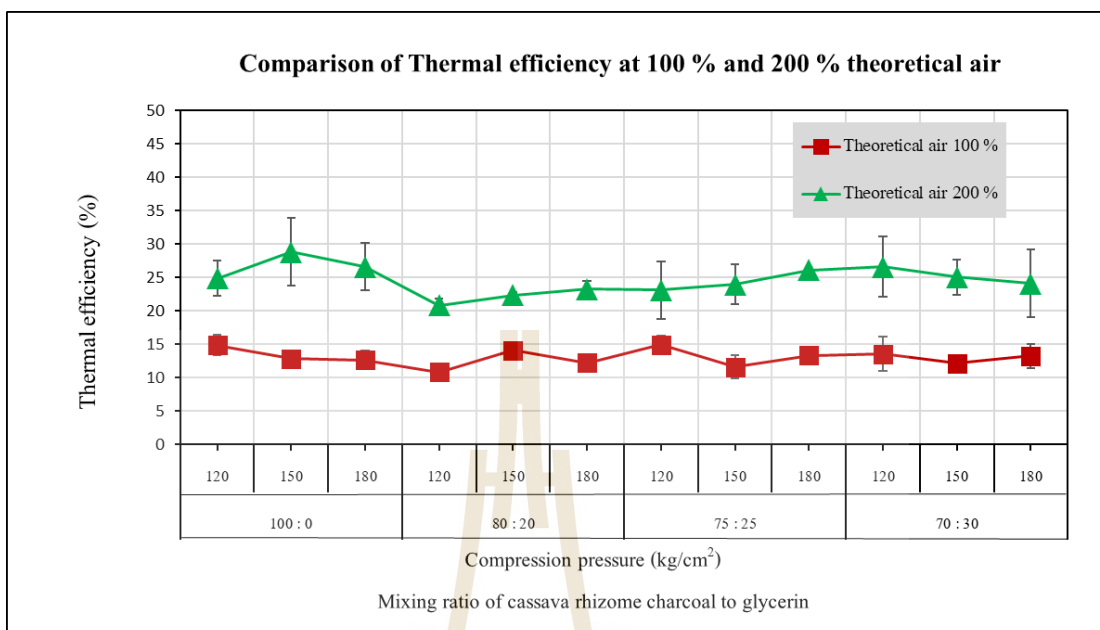
จากรูปที่ 4.13 พบว่าโดยภาพรวมค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) ที่สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และอากาศทฤษฎี 200 % โดยพบว่าสภาวะอากาศทฤษฎี 100 % มีแนวโน้มสูงกว่าอากาศส่วนเกินอากาศทฤษฎี 200 % ในเกือบทุกเงื่อนไขของการกดอัดและอัตราส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าการจ่ายอากาศพอดีส่งผลให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างเข้มข้นและให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงกว่า เนื่องจากความ

เข้มข้นของเชื้อเพลิงต่อปริมาณอากาศเหมาะสม ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ถูกเจือจางมากนัก ในทางตรงกันข้าม ที่อากาศทฤษฎี 200 % แม้การเผาไหม้จะสมบูรณ์มากขึ้นและมีเสถียรภาพสูงขึ้น แต่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) กลับลดลง เนื่องจากอากาศส่วนเกินทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับและพาความร้อนออกจากระบบ (Thermal dilution effect) ส่งผลให้พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของก๊าซผสมลดลง ดังนั้น ความแตกต่างหลักระหว่างอากาศทฤษฎี 100 % และ อากาศทฤษฎี 200% คือระดับความเข้มข้นและความหนาแน่นพลังงานความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ โดยอากาศทฤษฎี 100 % ให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ ($T_{out,max} - T_{in}$ at $T_{out,max}$) สูงกว่า ขณะที่อากาศทฤษฎี 200% ให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้

จากรูปที่ 4.14 พบว่าอัตราการเผาไหม้ (Combustion rate) ที่สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ อากาศทฤษฎี 200 % มีค่าใกล้เคียงกันในเกือบทุกเงื่อนไขของความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสม โดยแนวโน้มโดยรวมไม่มีความแตกต่างระหว่างอากาศทฤษฎีทั้งสองสภาวะ เนื่องจากถ่านอัดแท่งถูกกดอัดเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ดังนั้นถึงแม้เพิ่มปริมาณอากาศแต่พื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยายังเท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของเชื้อเพลิงมากกว่าปริมาณอากาศส่วนเกินในช่วงที่ศึกษา ดังนั้นการเพิ่มอากาศจากอากาศทฤษฎี 100 % เป็นอากาศทฤษฎี 200 % ส่งผลต่อความหนาแน่นพลังงานความร้อนมากกว่าอัตราการเผาไหม้โดยตรง



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากรูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ที่สภาวะอากาศทฤษฎี 100 % และ อากาศทฤษฎี 200 % เมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังสมการที่ 2.20 ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศกับพลังงานป้อนเข้าคือการสูญเสียมวลของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะอากาศทฤษฎี 200 % ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าอากาศทฤษฎี 100 % ทุกอัตราส่วนผสมและความดันการกดอัดอย่างชัดเจน เพราะว่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากมวลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านระบบเพิ่มขึ้นเท่าตัว แต่อัตราการสูญเสียมวลของอากาศทฤษฎี 100 % และ อากาศทฤษฎี 200 % ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 4.14 ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนนั้นมากกว่าอย่างชัดเจน ขณะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศ อากาศทฤษฎี 100 % และ อากาศทฤษฎี 200 % ก็ใกล้เคียงกันแม้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างทางออกและทางเข้าของอากาศทฤษฎี 200 % จะลดลงจากผลการเจือจางความร้อนในอากาศส่วนเกินก็ตาม กล่าวได้ว่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นในกรณีอากาศทฤษฎี 200 % ไม่ได้มาจากอุณหภูมิที่สูงกว่าหรืออัตราการสูญเสียมวลน้อยกว่า แต่เกิดจากผลของการเพิ่มมวลการไหลของอากาศในสมการคำนวณ ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งหมดที่กล่าวมาจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สภาวะอากาศทฤษฎี 200 % สูงกว่าสภาวะอากาศทฤษฎี 100 % อย่างเด่นชัด

4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินในงานวิจัยนี้ ได้พิจารณาทั้งต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนแปรผัน (Variable cost) ร่วมกับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-Even Point: BEP) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) โดยต้นทุนคงที่เท่ากับ 35,000 บาท ซึ่งเป็นค่าเครื่องอัดถ่านแม่แรงไฮดรอลิก ขณะที่ต้นทุนแปรผันประกอบด้วย เหง้ามันสำปะหลังราคา 500 บาทต่อตัน (0.50 บาท/kg) ค่าเผาและร่อนถ่าน 20 บาท/kg แป้งมันสำปะหลัง 50 บาท/kg กลีเซอรินดิบประมาณ 15 บาท/kg และค่าแรงงาน 350 บาท/วัน จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตถ่านอัดแท่งได้ 384 ก้อนต่อวัน โดยจากส่วนผสมคิดต้นทุนต่อก้อนเป็นประมาณ 2.69 บาท/ก้อน และเมื่อรวมค่าแรงงาน 350 บาท/384 ก้อน = 0.91 บาท/ก้อน ส่งผลให้ต้นทุนรวมเท่ากับ 3.60 บาท/ก้อน เมื่อกำหนดราคาจำหน่ายที่ 5 บาท/ก้อน จะได้กำไรต่อหน่วยเท่ากับ 1.40 บาท/ก้อน และมีกำไรสุทธิต่อวันเท่ากับ 1.40 บาท/ก้อน $\times$ 384 ก้อน/วัน = 537.6 บาท/วัน จากนั้นคำนวณจุดคุ้มทุน (BEP) ได้จากเงินลงทุนเริ่มต้น(35,000 บาท)/กำไรสุทธิต่อก้อน(1.40 บาท/ก้อน) เท่ากับ 25,000 ก้อน และระยะเวลาคืนทุน (PB) ได้จากเงินลงทุนเริ่มต้น (35,000 บาท)/กำไรสุทธิต่อวัน(537.6 บาท/วัน) ประมาณ 65 วันทำการ



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก

การพัฒนาเครื่องอัดถ่านแบ่งเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะทดลองขั้นต้นและระยะทดลองเชิงลึก ระยะขั้นต้นใช้แม่แรงไฮดรอลิก 6 ตัน อัดได้ครั้งละ 1 ก้อน ใช้เวลา 4 นาทีต่อรอบ ผลิตได้ประมาณ 120 ก้อนต่อวัน แต่ยังมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ ระยะทดลองเชิงลึกได้พัฒนาเป็นแม่แรง 20 ตัน สามารถอัดได้ครั้งละ 8 ก้อน ใช้เวลา 10 นาทีต่อรอบ ทำให้กำลังการผลิตเพิ่มเป็นประมาณ 384 ก้อนต่อวัน พร้อมติดตั้งเกจวัดความดันเพื่อควบคุมแรงอัดได้แม่นยำ และใช้แรงงานเพียง 1 คน เครื่องที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มกำลังการผลิตและประสิทธิภาพการทำงานอย่างชัดเจน เหมาะสำหรับการเตรียมตัวอย่างถ่านอัดแท่งในงานวิจัยนี้

5.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนกลีเซอรินและความการดันกดอัดต่อสมบัติของถ่านอัดแท่ง

ผลการทดลองขั้นต้นพบว่าอัตราส่วน 100 : 0 ให้ความแข็งแรงและความคงรูปดีที่สุด โดยเฉพาะความสูง 20 mm ขณะที่การเพิ่มกลีเซอรินทำให้ผิวเรียบและค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ความแข็งแรงลดลงเมื่อแรงกดต่ำหรือความสูงเพิ่มขึ้น การทดลองเชิงลึกพบว่าอัตราส่วนผสมและความดันกดอัดมีผลชัดเจนต่อสมบัติถ่านอัดแท่ง โดยอัตราส่วน 80 : 20 ที่ความดัน 150 kg/cm² ให้สมดุลด้านความแข็งแรงและลักษณะภายนอกดีที่สุด ส่วนค่าความชื้นทุกสูตรอยู่ในช่วงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 238/2547 ไม่เกิน 8 % และ International Organization for Standardization ไม่เกิน 15 % ค่าความหนาแน่นรวมทุกสูตรอยู่ในช่วงค่าของงานวิจัยไม่เกิน 0.8 g/cm³ ขณะที่อัตราส่วนผสม 100 : 0 ที่ความดันการกดอัด 180 kg/cm² ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดสูงสุด 9.96 kg/cm² แต่ทุกสูตรค่าความแข็งแรงยังอยู่ในช่วงงานวิจัย ในส่วนค่าความร้อนที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 ที่ 180 kg/cm² ให้ค่าความร้อนสูงสุด 6,164 cal/g แต่ทุกสูตรค่าความร้อนยังอยู่ในช่วงมาตรฐาน การเพิ่มกลีเซอรินช่วยเพิ่มค่าความร้อน แต่ลดความแข็งแรง ในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเห้งมันสำปะหลังที่ต้องการความแข็งแรงควรเลือกอัตราส่วนผสม 100 : 0 ที่ความดันการกดอัด 180 kg/cm² และถ้าต้องการค่าความร้อนที่มากต้องเลือกอัตราส่วนผสมกลีเซอรินที่มากในที่นี่คืออัตราส่วนผสม 70 : 30

5.1.3 พฤติกรรมการเผาไหม้และการปล่อยมลพิษของถ่านอัดแท่ง

ผลการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ทั้งการทดลองขั้นต้นและเชิงลึก แสดงลักษณะการเผาไหม้ที่เป็นระบบและชัดเจน โดยช่วงเริ่มต้นอุณหภูมิถ่านและห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นรวดเร็วสะท้อนถึงการติดไฟง่าย จากนั้นเข้าสู่ช่วงไหม้คงตัวที่ให้อุณหภูมิสูงและถ่ายเทความร้อนได้ต่อเนื่องเหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน การทดลองเชิงลึกภายใต้การจ่ายอากาศ 100 % และ 200 % พบว่าแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงก่อนการเผาไหม้ ช่วงการเผาไหม้หลักของถ่าน และช่วงมอดดับ เมื่อเพิ่มอากาศเป็น 200 % รูปแบบการเผาไหม้ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทำให้การเผาไหม้เกิดเร็วขึ้นและระยะเวลาจนเหลือแค่ขี้เถ้าสั้นลง

5.1.4 มลพิษจากการเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง

ผลการทดลองเชิงลึกภายใต้อากาศทฤษฎี 100 % พบว่าปริมาณมลพิษสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนกลีเซอริน โดยเมื่อเพิ่มกลีเซอริน ปริมาณควันและค่า CO เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากกลีเซอรินแตกตัวให้สารระเหยสูงและเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในช่วงต้น สูตร 100 : 0 แทบไม่เกิดควัน ขณะที่ 70 : 30 ให้ควันหนาแน่นที่สุด โดยควันเด่นชัดในช่วงต้นและลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงเผาไหม้คาร์บอนคงเหลือ องค์ประกอบก๊าซโอเลียมพบว่า ค่า CO₂ ต่ำและค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.1 % ไม่ตรวจพบ NO_x และ SO₂ ส่วน CO สูงสุด 167 ppm ที่อัตราส่วนผสม 75 : 25 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² และค่าเฉลี่ยสูงสุด 77.67 ppm ที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 ความดันการกดอัด 180 kg/cm² อย่างไรก็ตาม ค่ามลพิษทั้งหมดต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย Irish BioEnergy Association และข้อกำหนดของ European Parliament ภายใต้ Directive (EU) 2015/2193 และ Commission Regulation (EU) 2015/1185 แสดงว่าการเผาไหม้ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางสิ่งแวดล้อม

5.1.5 สมรรถนะเชิงความร้อนถ่านอัดแท่ง

ผลการประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนพบว่า ในการทดลองขั้นต้น การเพิ่มสัดส่วนกลีเซอรินทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น โดยสูตร 85 : 15 ให้ค่าสูงสุด 3.798 g/min ขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเผาไหม้ช้าที่สุด ด้านประสิทธิภาพการใช้ความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันทุกสูตร โดยสูตร 85 : 15 สูง 26 mm ให้ค่าสูงสุด 13.069 % ใกล้เคียงถ่านกะลามะพร้าว การทดลองเชิงลึกภายใต้อากาศทฤษฎี 100 % และ 200 % พบว่า ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างทางออกและทางเข้าอากาศสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² มีค่า 63.00 °C และที่อัตราส่วนผสม 70 : 30 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² มีค่า 61.25 °C ตามลำดับ ขณะที่อัตราการเผาไหม้ใกล้เคียงกันทั้งสองสภาวะโดยค่าสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 80 : 20 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² มีค่า 1.042 g/min และที่อัตราส่วนผสม 80 : 20 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² มีค่า 1.013 g/min ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณอากาศส่วนเกินไม่ได้มีผลโดยตรงต่ออัตราการเผาไหม้ ด้าน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 75 : 25 ความดันการกดอัด 120 kg/cm² มีค่า 14.901 % และที่อัตราส่วนผสม 100 : 0 ความดันการกดอัด 150 kg/cm² มีค่า 28.828 % สูงกว่าเนื่องจากมวลอากาศที่ไหลผ่านระบบเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทรวมสูงขึ้น แม้ความแตกต่างอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก

จากการใช้งานเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก พบว่ายังต้องพึ่งพาแรงงานคนในขั้นตอนผสม เทวตฤติบ และโยกแม่แรง ซึ่งอาจทำให้แรงกดไม่สม่ำเสมอ เกิดความล้า และส่งผลต่อคุณภาพ ดังนั้น ควรพัฒนาเครื่องต้นแบบโดยเพิ่มกลไกทุ่นแรง เช่น ระบบกวนผสมด้วยมอเตอร์ ถึงป้อนวัตถุดิบควบคุมปริมาณ และปรับระบบอัดเป็นปั๊มเท้าหรือระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมแรงกดให้คงที่ ลดแรงงาน เพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความสม่ำเสมอของถ่านอัดแท่งในระยะยาว

5.2.2 ลักษณะรูปทรงและอัตราส่วนผสมของถ่านอัดแท่ง

ผลการทดลองชี้ว่าอัตราส่วนผสมกลีเซอรินมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมรรถนะเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่ง แต่บางพารามิเตอร์ยังเห็นความแตกต่างไม่ชัดเจน ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาเปรียบเทียบรูปทรงถ่านอัดแท่งที่หลากหลาย เช่น ทรงกระบอกตัน ทรงกระบอกเจาะรู หรือหลายช่องอากาศ และขยายช่วงอัตราส่วนผสมกลีเซอรินให้สูงขึ้น เพื่อให้เห็นแนวโน้มด้านสมบัติความร้อนชัดเจนมากขึ้น โดยควรประเมินร่วมกับความแข็งแรงเชิงกลและความคงรูป เพื่อหาสัดส่วนและรูปแบบที่เหมาะสมทั้งด้านพลังงานและการใช้งานจริง

5.2.3 การออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้

จากการออกแบบห้องเผาไหม้พบว่าโครงสร้าง วัสดุ และระบบวัดผลมีผลต่อความแม่นยำของข้อมูลอย่างชัดเจน ดังนั้น ควรพัฒนาโดยเลือกใช้วัสดุทนไฟน้ำหนักเบาหรือฉนวนที่สะสมความร้อนได้ดี พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพฉนวนผนังและฝาปิดเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและลดการแผ่รังสีของอุณหภูมิ นอกจากนี้ ควรใช้โพลีเอสเตอร์ที่มีความละเอียดและทนความร้อนทนแรงสั่นสะเทือนได้ดี พร้อมสอบเทียบสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลอัตราการสูญเสียมวลและอัตราการเผาไหม้ในระยะยาว

รายการอ้างอิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.(2558).แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579. <https://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/AEDP2015.pdf>
- กฤตภาส มงคลธำรงกุล. (2567). การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวลสำหรับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในจังหวัดระยอง. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 34(1), 1–12.
- กฤษฎา บุญชม และ นิรุบล ไชยสมปาน. (2563). การศึกษาถ่านอัดแท่งจากไม้ลำไย. *วารสารนครสวรรค์*, 13(2), 51–56.
- จารุณี เข้มพิลาค์ และ ภูมิรินทร์ คงโต. (2565). การทอรีแฟกชันเห้งน้ำมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง. *วารสารวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (JARST)*, 21(1), 88–94.
- นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล และ ธรพร บุศย์น้ำเพชร. (2559). ลักษณะการขึ้นรูปและตัวประสานที่แตกต่างกันต่อ สมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผักตบชวา. *Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University*, 3(6), 86-100.
- ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ และ ธาณิ มหายศนันท์. (2548). การศึกษาการอัดถ่านเห้งน้ำมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก. *วิศวกรรมสาร มก.*, 19(56), 32–40.
- แพรวตะวัน จารุตัน และ วิชชุดา ภาโสเม. (2564). กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งในสวนยางพารา และการถ่ายทอดผ่านเทคโนโลยีอินโฟกราฟิก. *วารสารวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย*, 4(1), 28–43.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2558). กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 23(2), 140–159.
- รอกีเยาะ สาและ และ ฮาลีเมะ ฮูตู. (2554). การศึกษาถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น. มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- โรสลีนา อนันตกุลวงศ์, รอดิยะห์ เจ๊ะแม และ นุรมายามีน สาเร๊ะนุ. (2562). การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย.*, 4(1), 47–53.
- ลักขมิ สุทธิวิไลรัตน์, ประภัสสร ภาคอรธ, และ ขวัญพี สิทธีรสอาด. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ของต้นปาล์มน้ำมัน. *วารสารวิชาการ*, 10(2), 45–52.
- สมชาย พุ่มอิม และ เฉลิมเกียรติ ปลาทอง. (2543). การพัฒนาการใช้เทคโนโลยีที่สะอาดกับถ่านหินในประเทศไทย. *เอกสารการประชุมวิชาการ Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand* (หน้า 341- 345)
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2562). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน: ถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547*. กระทรวงอุตสาหกรรม.

- สุชาดา ศรีบุญเรือง, กมลภัทร ศิริพงษ์, และ เพ็ญจันทร์ วิจิตร. (2568). ศึกษาอัตราส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังในการทำถ่านอัดแท่งจากเปลือกผลโกโก้. *วารสารเกษตรรายไฟ*, 3(1), 17–27.
- เสริมศักดิ์ เกิดวัน, สุธาพร เกตุพันธ์, และ รุ่งโรจน์ จินตวง. (2561). การผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาคุ. โครงการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ, ทิปรุณ คุณาพรวิวัฒน์, พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์, จักรพันธ์ กันหา, และ วรพจน์ พันธุ์คง. (2551). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมขี้ข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน [บทความนำเสนอในการประชุมวิชาการ]. *การประชุมวิชาการเครือข่ายการวิจัยของสถาบันอุดมศึกษา*, 454–458. 17–19 มกราคม 2551, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, กรุงเทพมหานคร.
- Ahmad, R. K., Sulaiman, S. A., Yusup, S., Dol, S. S., Inayat, M., & Umar, H. A. (2022). Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101499.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke (ASTM D3173-11)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard test method for gross calorific value of coal and coke (ASTM D5865)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils (ASTM D2974-14)*. ASTM International.
- Aransiola, E. F., Oyewusi, T. F., Osunbitan, J. A., & Ogunjimi, L. A. O. (2019). Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. *Energy Reports*, 5, 909–918.
- Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Mass and energy balances: Basic principles for calculation, design, and optimization of macro/nano systems*. Springer.
- Auntaisong, P., & Maneechot, R. (2019). THE CONSTRUCTURE AND EFFICIENCY EVALUATE OF CHARCOAL BRIQUETTE MACHINE FROM CASSIA PODS. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 7(2), 147–157.
- Bamgboye, A. I., & Bolufawi, S. J. (2009). Performance evaluation of briquettes produced from selected agricultural residues. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, 11, 1364.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Elsevier.

- Behr, A., Eilting, J., Irawadi, K., Leschinski, J., & Lindner, F. (2008). Improved utilisation of renewable resources: New important derivatives of glycerol. *Green Chemistry*, 10, 13–30.
- Bernardes, F. F., Romanelli, T. L., Pereira, A. K. S., Cupertino, G. F. M., Fernandes, M. A., Brito, J. O., de Souza, E. C., Saloni, D., & Dias Júnior, A. F. (2023). Energy performance of different charcoal production systems. *Energies*, 16(21), 7318.
- Bohon, M. D., Metzger, B. A., Linak, W. P., King, C. J., & Roberts, W. L. (2011). Glycerol combustion and emissions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2717–2724.
- Borowski, G., Stepniewski, W., & Wójcik-Oliveira, K. (2017). Effect of starch binder on charcoal briquette properties. *International Agrophysics*, 31(4), 571–574.
- Bunyamanid, Y., Limphitakphong, N., Chavalparit, O., & Tantisattayakul, T. (2016). An analysis of energy and carbon intensities and exergy efficiency in natural gas combined-cycle power plants: A case study of Thailand. *MATEC Web of Conferences*, 68, 14001.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chin, O. C., & Siddiqui, K. M. (2000). Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 223–228.
- Christoforou, E., & Fokaides, P. A. (2019). *Advances in solid biofuels*. In *Green energy and technology* (pp. 1–130). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>
- Davies, R. M., & Davies, O. A. (2013). Physical and combustion characteristics of briquettes made from water hyacinth and phytoplankton scum as binder. *Journal of Combustion*, 2013(1), Article ID 549894.
- Deutsches Institut fuer Normung. (2023). *Certification scheme: Wood briquettes according to DIN EN ISO 17225-3 (May 2023 edition)*.
- Ekong, G. I., Adawo, A. M., John, S. E., & Edet, U. M. O. (2023). The Design Parameters Analysis and Testing of a Compression Testing Machine. *International Journal of Engineering and Techniques*, 9(3), 1–11.
- Eriksson, S., & Prior, M. (1990). *The briquetting of agricultural wastes for fuel* (11th ed., p. 137). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

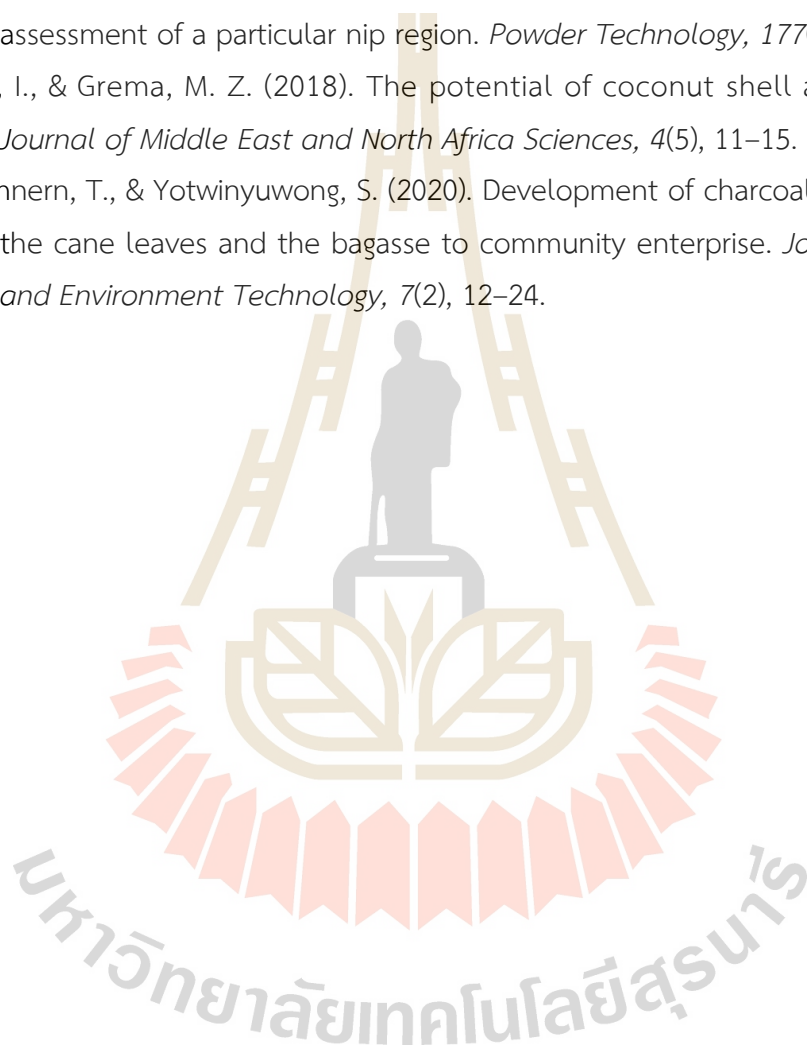
- European Commission. (2015). *Commission Regulation (EU) 2015/1185 of 24 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel local space heaters (Text with EEA relevance)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1528971208462&uri=CELEX:32015R1185>
- European Parliament. (2015). *Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants (Text with EEA relevance)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32015L2193>
- Ezéchiél, K., Joel, T. K., Abdon, A., & Darman, R. D. (2022). Accessibility and effects of binder types on the physical and energetic properties of ecological coal. *Heliyon*, 8(11), 11410.
- Frank, O. O., & Akhihero, T. E. (2013). Energy technology policy. *Journal of Energy Technology and Policy*, 3, 56.
- Granado, M. P. P., Suhogusoff, Y. V. M., Santos, L. R. O., Yamaji, F. M., & De Conti, A. C. (2020). Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. *Renewable Energy*, 167, 306–312.
- Grover, P. D., & Mishra, S. K. (1996). *Biomass briquetting: Technology and practices* (Field Document No. 46). Regional Wood Energy Development Programme in Asia; Food and Agriculture Organization.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 17831-2:2015 – Solid biofuels — Determination of mechanical durability of pellets and briquettes — Part 2: Briquettes*. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2021). *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements (ISO 17225-1:2021)*. International Organization for Standardization.
- IRBEA (Irish BioEnergy Association). (2016). *Study on biomass combustion emissions: Appendix 1 – Technical literature review report for biomass combustion emission study: Biomass appliances – emissions*. Irish BioEnergy Association. <https://www.irbea.org/wp-content/uploads/2016/12/IrBEA-BiomassEmissionsReportAndAppendices.pdf>

- Jongpluempiti, J., & Tangchaichit, K. (2012). Comparison proximate analysis and heating value between cassava rhizome and perennial wood. *Advanced Materials Research*, 415–417, 1693–1696.
- Kadhim, M. Q., & Oshchepkov, P. P. (2024). Comparative analysis of diesel fuel types on engine performance and emissions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 2702–2708.
- Kaliyan, N., Morey, R. V., White, M. D., & Doering, A. (2009). Roll press briquetting and pelleting of corn stover and switchgrass. *Transactions of the ASABE*, 52(2), 543–555.
- Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustainability*, 12(11), 4609.
- Kristoferson, L. A., & Bokalders, V. (1986). *Renewable energy technologies: Their applications in developing countries* (p. 319). Pergamon Press.
- Legacy Foundation. (2003). Fuel briquette press kit—A construction manual. Legacy Foundation.
- Li, G., Hu, R., Hao, Y., Yang, T., Li, L., Luo, Z., Xie, L., Zhao, N., Liu, C., Sun, C., & Shen, G. (2023). CO₂ and air pollutant emissions from bio-coal briquettes. *Environmental Technology & Innovation*, 29, 102975. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102975>
- Mahayosanon, T. (2005). *A study on the design and construction of a briquette production machine for household-level production* [Unpublished master's thesis]. Kasetsart University.
- Maninder, Kathuria, R. S., & Grover, S. (2012). Using agricultural residues as a biomass briquetting: An alternative source of energy. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEEE)*, 1(5), 11–15.
- Masse, A. A., Sikazwe, K. S., Lichinga, K. N., Nazayoeli, R. E., & Shija, H. (2023). *Biomass briquettes production handbook*. Tanzania Industrial Research and Development Organization (TIRDO) and REPOA. <https://www.tirdo.or.tz/storage/publications/LE59YikFaoV4aaS21uVayYUuhMfere0HrxalV3bP.pdf>
- Mitchell, E. J. S., Gudka, B., Whittaker, C., Shield, I., Price Allison, A., Maxwell, D., Jones, J. M., & Williams, A. (2020). The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small scale domestic heating. *Fuel Processing Technology*, 210, Article 106552.

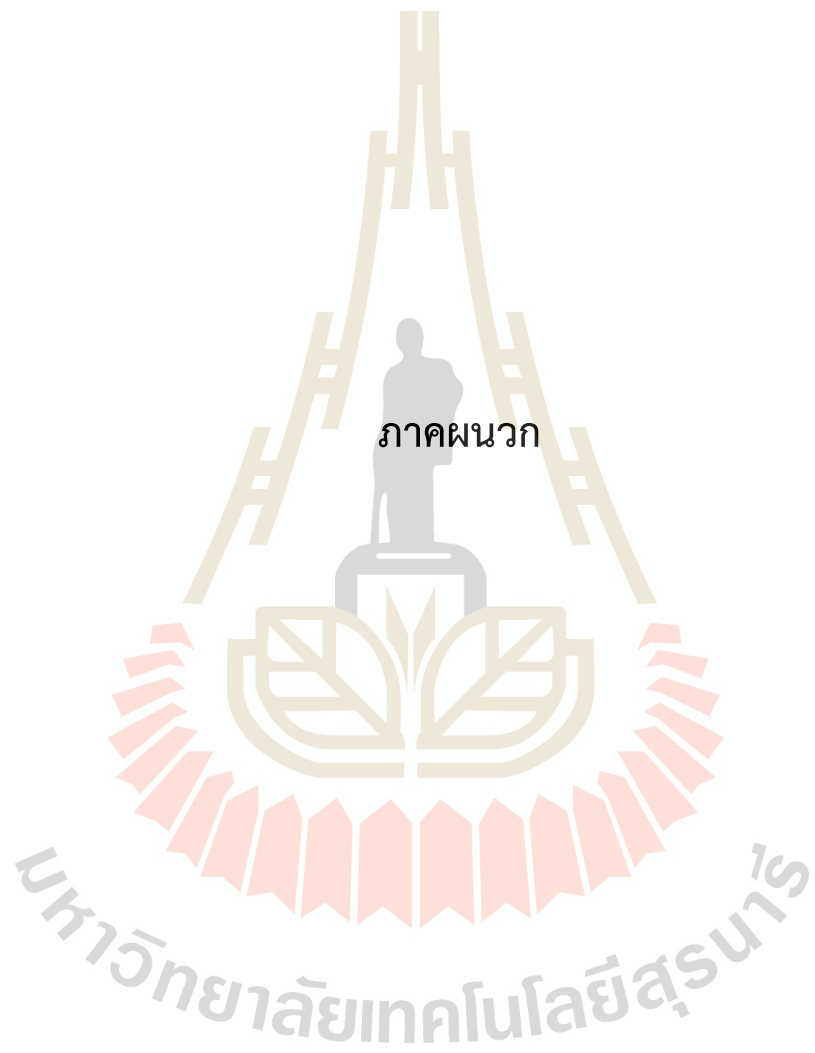
- Mitchell, E. J. S., Langton, A. R. L., Jones, J. M., Williams, A., Layden, P., & Johnson, R. (2016). The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*, 142, 115–123.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). Wiley.
- Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022). A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Energies*, 15(7), 2426.
- Pattiya, A. (2011). Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology*, 102(2), 1959–1967. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.117>
- Potip, S., & Wongwuttanasatian, T. (2018). Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combustion Science and Technology*, 190(11), 2030–2043.
- Pukdee-asa, M., & Pimpan, P. (2022). Fuel briquettes from waste of lemon grass and banana peel. *Nakhon Sawan Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 14(19), 107–121.
- Rath, D. P., Mahapatro, A., & Pattanayak, B. (2023). Briquette production and performance evaluation from coal and agricultural waste. *Materials Today: Proceedings*, 80, 241–248.
- Sakkampang, C. (2014). *A study of biomass briquette from glycerin and agriculture biomass* (Ph.D. thesis). Khon Kaen University, Thailand.
- Seetapong, N., Mankaket, S., Rahem, S., Chanlert, P., & Chulok, S. (2024). Exploring binder efficacy in the fabrication of charcoal briquettes from palmyra palm and oil palm shells: A comprehensive analysis. *BioResources*, 19(3), 5047–5057.
- Sen, R., Wiwatpanyaporn, S., & Annachhatre, A. P. (2016). Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, 17(2), 158–174.
- Sharma, P. K., Wakchaure, G. C., & Samuel, D. V. K. (2006). Effect of material and binders on storage and burning quality of biomass briquettes. *Journal of Agricultural Engineering*, 43(4), 71–74.

- Shekh, M. I., Deshmukh, S. M., Samal, K., Kumar, S., & Ganguly, A. (2023). Performance evaluation of biomass briquettes from agro-residue in India. *Journal of Ecology and Conservation*, 1(1), 13–19.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Solano, D., Vinyes, P., & Arranz, P. (2016). *Biomass briquetting process*. UNDP-CEDRO Publication.
- Sotannde, O. A., Oluyeye, A. O., & Abah, G. B. (2010). Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of *Azadirachta indica*. *Journal of Forestry Research*, 21(1), 63–67.
- Srimoon, R., Darapong, P., & Kanavong, V. (2014). Extraction of Alexandrian laurel (*Calophyllum inophyllum* L.) seed oil for biodiesel production. *RMUTSB Academic Journal*, 2(2), 131–138.
- Steinmetz, S. A., Herrington, J. S., Winterrowd, C. K., Roberts, W. L., Wendt, J. O. L., & Linak, W. P. (2013). Crude glycerol combustion: Particulate, acrolein, and other volatile organic emissions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 2749–2757.
- Steinmetz, S. A., Herrington, J. S., Winterrowd, C. K., Roberts, W. L., Wendt, J. O. L., & Linak, W. P. (2013). Crude glycerol combustion: Particulate, acrolein, and other volatile organic emissions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2), 2749–2757.
- Tippayawong, N., Rerkkriangkrai, P., Aggarangsi, P., & Pattiya, A. (2017). Biochar production from cassava rhizome in a semi-continuous carbonization system. *Energy Procedia*, 141, 109–113.
- Tumuluru, J. S., Tabil, L. G., Song, Y., Iroba, K. L., & Meda, V. (2015). Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes. *BioEnergy Research*, 8(1), 388–401.
- Tumuluru, S. J., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707.
- U.S. Energy Information Administration. (2018, January). *Monthly energy review January 2018*. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf>

- Wakchaure, G. C., & Sharma, R. K. (2007). Physical quality of some biomass briquettes. *Journal of Agricultural Engineering*, 44, 48–52.
- Wongwuttanasatian, T., & Sakkampang, C. (2016). Combustion Characteristics and Emission of Briquette Fuel from Biomass Mixed with Glycerin. *Combustion Science and Technology*, 188(6), 1011–1019.
- Yehia, K. A. (2007). Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region. *Powder Technology*, 177(3), 148–153.
- Yerima, I., & Grema, M. Z. (2018). The potential of coconut shell as biofuel. *The Journal of Middle East and North Africa Sciences*, 4(5), 11–15.
- Yoddamnern, T., & Yotwinyuwong, S. (2020). Development of charcoal briquette from the cane leaves and the bagasse to community enterprise. *Journal of Energy and Environment Technology*, 7(2), 12–24.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ขนาดของเครื่องอัดผ่านและการออกแบบระบบทดลอง

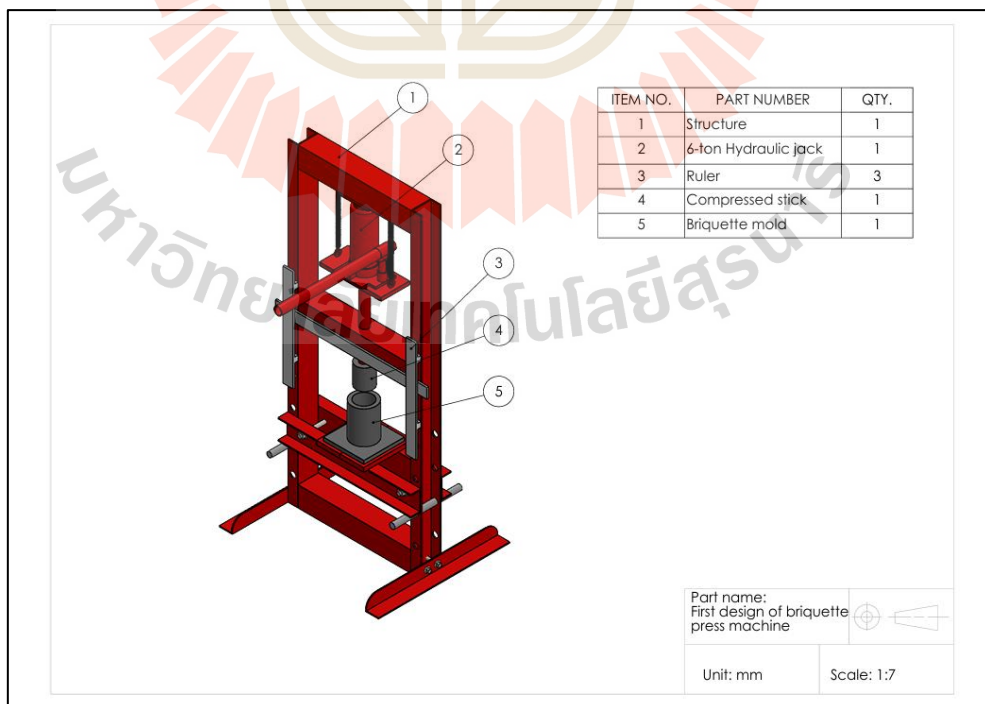
ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก นี้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงรายละเอียดด้านการออกแบบการทดลองและขนาดของเครื่องอัดถ่านอัดแท่งที่ใช้ในการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจลักษณะทางกายภาพ การจัดวางชิ้นส่วน สัดส่วนของอุปกรณ์ และโค้ดที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการสอบเทียบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบเชิงความร้อนได้อย่างชัดเจน โดยเนื้อหาครอบคลุมแบบโครงสร้างหลัก ตำแหน่งอุปกรณ์สำคัญ และมิติของชิ้นส่วนแต่ละส่วน ซึ่งข้อมูลในภาคผนวกนี้ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนให้เกิดความถูกต้องตรวจสอบซ้ำได้ และช่วยให้สามารถนำแบบไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคต

ก.1 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

ก.1.1 ตำแหน่งชิ้นส่วนประกอบหลักเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

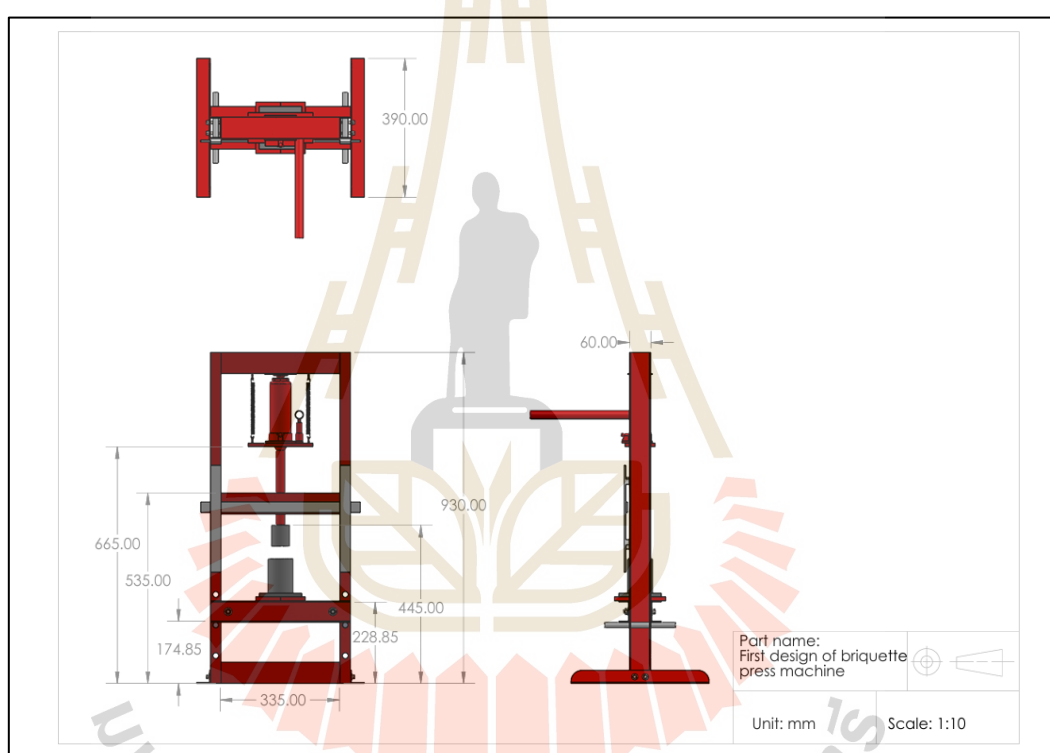
จากรูปที่ ก.1 แสดงการออกแบบเครื่องอัดถ่านอัดแท่งซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลัก (Structure) ที่ทำหน้าที่รองรับแรงกดจากแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน โดยไม้วัดระยะ (Ruler) สำหรับควบคุมระยะการกดอัดแนวตั้ง ส่วนแท่งอัด (Compressed stick) ทำหน้าที่ถ่ายทอดแรงจากแม่แรงลงสู่แม่พิมพ์ถ่านอัดแท่ง (Briquette mold) ซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดรูปทรงและขนาดของถ่านอัดแท่งโดยตรง การออกแบบดังกล่าวเน้นการถ่ายแรงอย่างมีประสิทธิภาพในแนวตั้ง และความสะดวกในการถอดเปลี่ยนแม่พิมพ์ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริงและการทดสอบในงานวิจัย



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งชิ้นส่วนประกอบหลักเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

ก.1.2 ขนาดของโครงสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

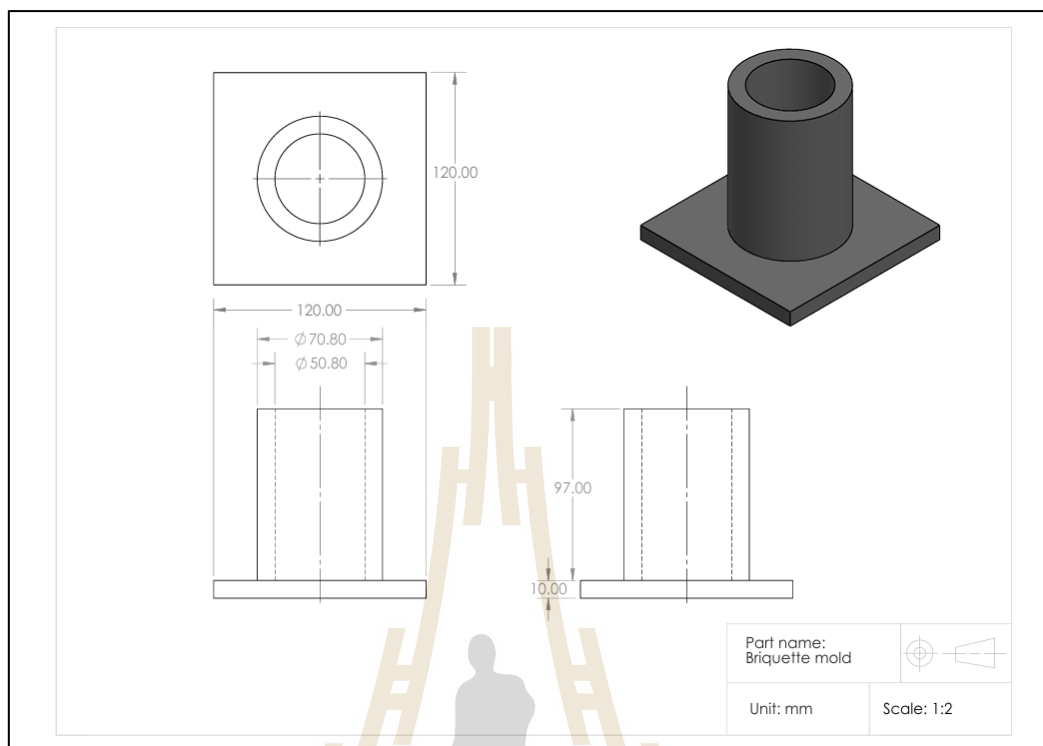
โครงสร้างเครื่องอัดถ่านอัดแท่งถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดแต่แข็งแรง โครงสร้างนี้สั่งซื้อมาพร้อมแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน แบบสำเร็จ โดยมีความสูงรวมประมาณ 930 mm และความกว้างฐานประมาณ 335 mm ตำแหน่งส่วนอัดและแม่พิมพ์ถูกจัดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.2 ช่วยให้แรงอัดถ่ายทอดในแนวตรง ลดการเอียงศูนย์ และเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน ภาพรวมของการออกแบบเน้นความสมดุลระหว่างความแข็งแรง ความสะดวกในการใช้งาน และความประหยัดพื้นที่ เหมาะสำหรับการใช้งานในงานทดลองและห้องปฏิบัติการ



รูปที่ ก.2 ขนาดของโครงสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

ก.1.3 ขนาดของแม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

แม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้นนั้นขึ้นรูปด้วยเหล็ก มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50.8 mm ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งด้วย ขนาดของแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ ก.3

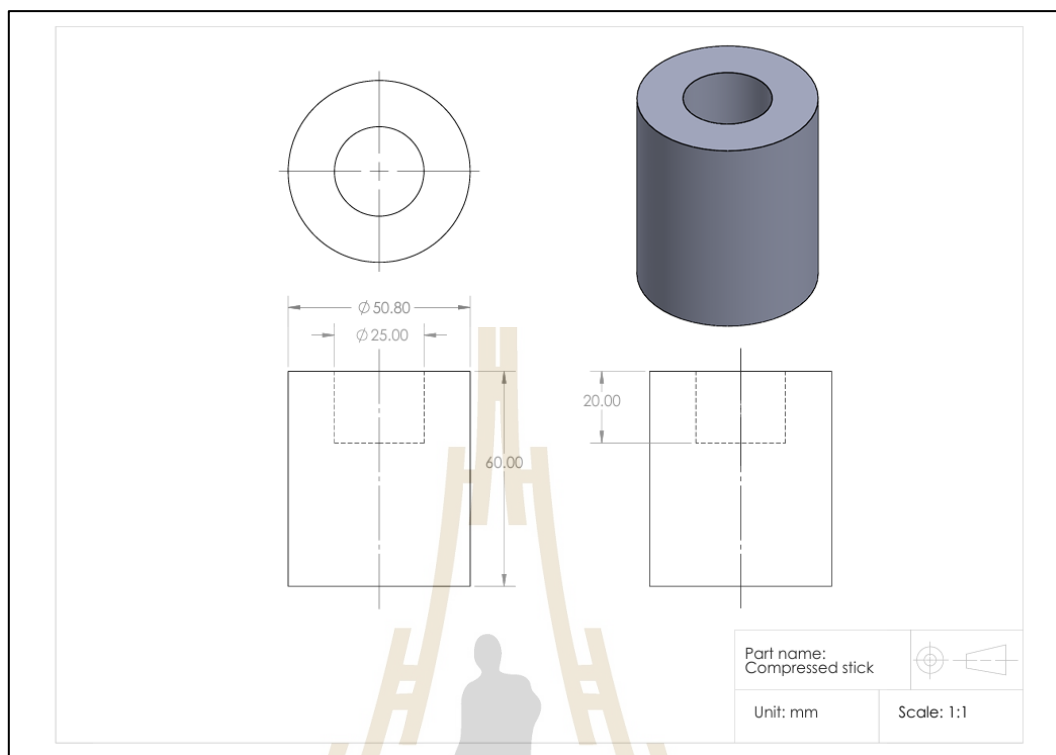


รูปที่ ก.3 ขนาดของแม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

ก.1.4 ขนาดของแท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้น

แท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขั้นต้นนั้นขึ้นรูปด้วยเหล็กทรงกระบอกตัน มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางสวมพอดีกับแม่พิมพ์ โดยต้องมีการเจาะรูเพื่อสวมใส่กับโครงสร้าง ขนาดของแท่งอัดแสดงดังรูปที่ ก.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.4 ขนาดของแท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองขึ้นต้น

ก.2 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อนขึ้นต้น

ในภาคผนวกนี้นำเสนอชุดโค้ดที่ใช้ในระบบทดสอบเชิงความร้อนขึ้นต้น ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์ ตรวจวัด และบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเชิงความร้อน เช่น ค่าอุณหภูมิ และ เวลา โค้ดดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อสนับสนุนกระบวนการเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้อง มีความต่อเนื่อง และสามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้อย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ การแสดงโค้ดในภาคผนวกมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้อ่านสามารถตรวจสอบขั้นตอนการทำงานของระบบ และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุง หรือประยุกต์ใช้ระบบทดสอบในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป แสดงดังรูปที่ ก.5


```

3sensorthermocouple.ino
1  #include <max6675.h>
2
3  // กำหนดขาเชื่อมต่อ
4  int soPin = 12; // SO ใช้ร่วมกัน
5  int csPin1 = 10; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวแรก
6  int csPin2 = 9; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่สอง
7  int csPin3 = 8; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่สาม
8  int sckPin = 13; // SCK ใช้ร่วมกัน
9
10 // สร้างอ็อบเจกต์สำหรับเซนเซอร์แต่ละตัว
11 MAX6675 thermocouple1(sckPin, csPin1, soPin);
12 MAX6675 thermocouple2(sckPin, csPin2, soPin);
13 MAX6675 thermocouple3(sckPin, csPin3, soPin);
14
15 unsigned long previousMillis; // ตัวแปรสำหรับเก็บเวลาที่ผ่านมา
16 const long interval = 60000; // ตั้งค่าให้บันทึกทุก 1 นาที (60000 มิลลิวินาที)
17 int logNumber = 1; // ตัวแปรสำหรับลำดับการบันทึก
18 unsigned long startMillis; // ตัวแปรสำหรับเก็บเวลาเริ่มต้น
19
20 void setup() {
21   Serial.begin(9600);
22   delay(500);
23   Serial.println("Log Number, Timestamp (minutes), Temperature 1, Temperature 2, Temperature 3"); // พิมพ์หัวคอลัมน์สำหรับไฟล์ CSV
24
25   startMillis = millis(); // บันทึกเวลาเริ่มต้น
26   previousMillis = startMillis;
27
28   // รัวและบันทึกค่าทันทีที่เริ่มต้น (เวลา 0 นาที)
29   float temp1 = thermocouple1.readCelsius();
30   float temp2 = thermocouple2.readCelsius();
31   float temp3 = thermocouple3.readCelsius();
32   Serial.print(logNumber++);
33   Serial.print(",");
34   Serial.print(0); // เวลา 0 นาที
35   Serial.print(",");
36   Serial.print(temp1);
37
38   Serial.print(temp1);
39   Serial.print(",");
40   Serial.print(temp2);
41   Serial.print(",");
42   Serial.print(temp3); // จบด้วยการขึ้นบรรทัดใหม่เพื่อให้ข้อมูลจัดเป็นแถวถัดไปใน CSV
43 }
44
45 void loop() {
46   // ตรวจสอบเวลาในตอนนี้
47   unsigned long currentMillis = millis();
48
49   // ถ้าผ่านไปครบ 1 นาที
50   if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
51     previousMillis = currentMillis; // อัปเดตเวลา
52
53     // อ่านค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์
54     float temp1 = thermocouple1.readCelsius();
55     float temp2 = thermocouple2.readCelsius();
56     float temp3 = thermocouple3.readCelsius();
57
58     // คำนวณเวลาดังแต่เริ่มต้นโปรแกรมเป็นนาที
59     unsigned long elapsedMinutes = (currentMillis - startMillis) / 60000;
60
61     // แสดงข้อมูลในรูปแบบ CSV
62     Serial.print(logNumber++);
63     Serial.print(",");
64     Serial.print(elapsedMinutes); // เวลาที่ผ่านไปเป็นนาที
65     Serial.print(",");
66     Serial.print(temp1);
67     Serial.print(",");
68     Serial.print(temp2);
69     Serial.print(",");
70     Serial.print(temp3); // จบด้วยการขึ้นบรรทัดใหม่เพื่อให้ข้อมูลจัดเป็นแถวถัดไปใน CSV
71   }
72 }

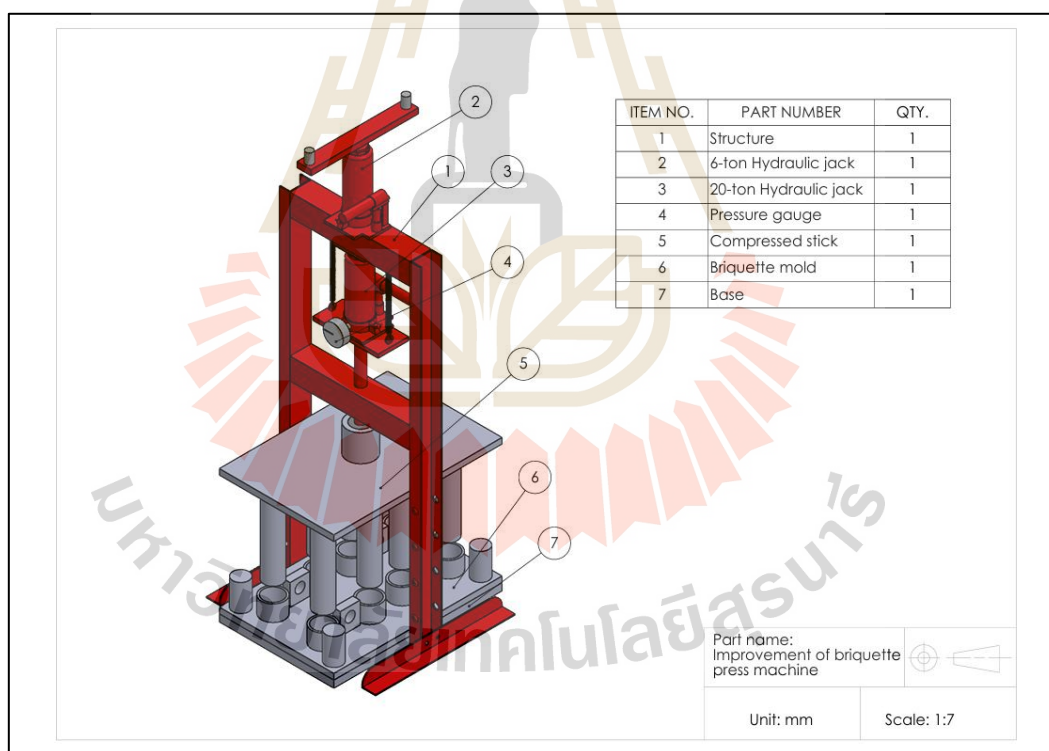
```

รูปที่ ก.5 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อนขั้นต้น

ก.3 การออกแบบเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

ก.3.1 ตำแหน่งชิ้นส่วนประกอบหลักเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

จากรูปที่ ก.6 แสดงการออกแบบเครื่องอัดถ่านอัดแท่งที่พัฒนาขึ้นของเครื่องอัดถ่านในการทดลองขั้นต้น โดยทำการถอดคานรับแรงตรงกลางออกทำได้โดยง่ายเพื่อให้มีพื้นที่ในการประกอบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างหลัก (Structure) ที่ทำหน้าที่รองรับแรงกดจากแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ตัน และแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน ตัวเดิมจากการทดลองขั้นต้นในการช่วยยกแม่พิมพ์ซึ่งออกแบบเพื่อการทำงานเพียงคนเดียวได้ โดยเพิ่มการติดตั้งเกจวัดความดัน Pressure gauge ช่วยให้สามารถตรวจสอบและกำหนดแรงอัดในแต่ละรอบการทดลองได้อย่างแม่นยำ ส่วนแท่งอัด (Compressed stick) ทำหน้าที่ถ่ายทอดแรงจากแม่แรงลงสู่แม่พิมพ์อัดแท่ง (Briquette mold) ซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดรูปทรงและขนาดของถ่านอัดแท่งโดยตรง การออกแบบดังกล่าวเน้นการถ่ายแรงอย่างมีประสิทธิภาพในแนวตั้ง และความสะดวกในการยกแม่พิมพ์ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง และการทดสอบเชิงลึกในงานวิจัย

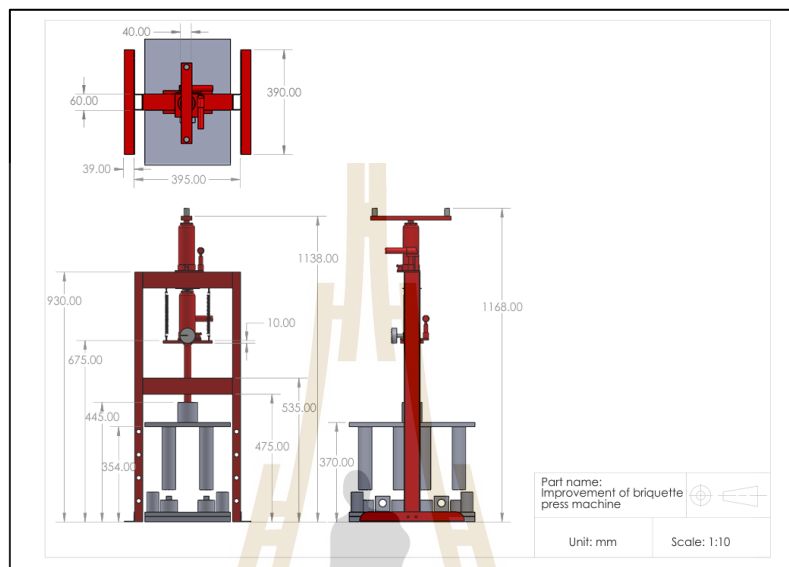


รูปที่ ก.6 ตำแหน่งชิ้นส่วนประกอบหลักเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

ก.3.2 ขนาดของโครงสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

โครงสร้างเครื่องอัดถ่านอัดแท่งที่พัฒนาขึ้นนั้น มีความสูงรวมประมาณ 1,168 mm ตำแหน่งส่วนแท่งอัดและแม่พิมพ์ถูกจัดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.7 ช่วย
ให้แรงอัดถ่ายทอดในแนวตรง ลดการเยื้องศูนย์ และเพิ่มความปลอดภัยในการทำงาน ภาพรวมของ

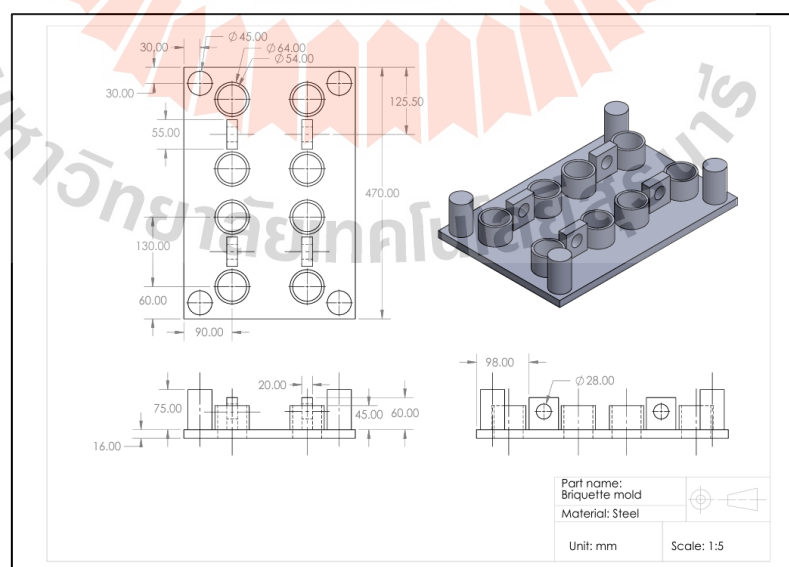
การออกแบบเน้นความสมดุลระหว่างความแข็งแรง ความสะดวกในการใช้งาน และความประหยัดพื้นที่ เหมาะสำหรับการใช้งานในงานทดลอง



รูปที่ ก.7 ขนาดของโครงสร้างเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

ก.3.3 ขนาดของแม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

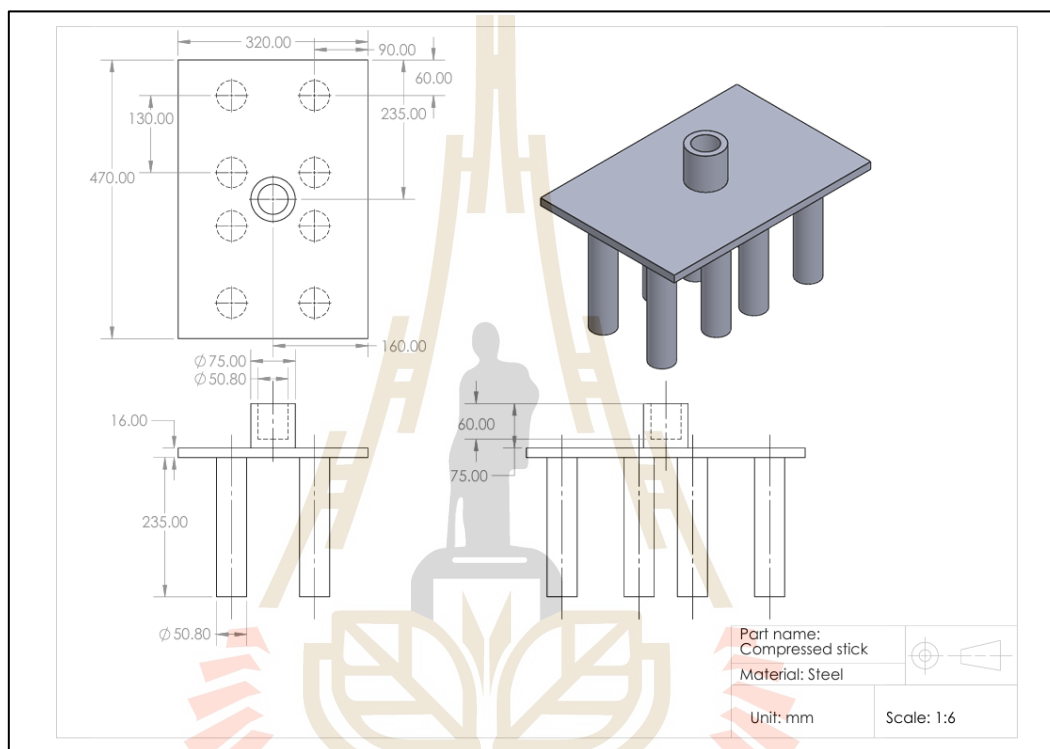
แม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองเชิงลึกที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นขึ้นรูปด้วยเหล็ก มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 54mm จำนวน 8 รู ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งด้วย ขนาดของแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 ขนาดของแม่พิมพ์เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

ก.3.4 ขนาดของแท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

แท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลองเชิงกลชิ้นนี้ขึ้นรูปด้วยเหล็กทรงกระบอกตัน มีขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลางสวมคลอนกับแม่พิมพ์ โดยมี 8 แท่งสำหรับการอัดถ่าน 8 ก้อน ขนาดของแท่งอัดแสดงดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.9 ขนาดของแท่งอัดเครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิกในการทดลอง

ก.4 ขนาดและตำแหน่งต่างๆ ของห้องเผาไหม้การทดลอง

ในการออกแบบและสร้างระบบทดสอบเชิงความร้อนแบบเชิงกล ห้องเผาไหม้ถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อการควบคุมสภาวะการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อนออกสู่ระบบโดยรอบ ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดโดยรวม 280 mm x 280 mm x 230 mm (กว้าง x สูง x ยาว) ผลิตจากอิฐทนไฟที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุด 1,300 °C และมีความหนา 25 mm (1 inch) ทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานความร้อนภายในห้องเผาไหม้ โครงสร้างดังกล่าวได้รับการออกแบบให้รองรับการทดลองเผาไหม้ถ่านอัดแท่งภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้อย่างเหมาะสม จากรูปที่ ก.10 แสดงขนาดและตำแหน่งต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้ พบว่าห้องเผาไหม้ถูกออกแบบให้มีช่องทางเข้าและทางออกของอากาศในแนวแกนตรงข้ามกัน โดยใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นทางผ่านของอากาศเพื่อความสะดวกในการติดตั้งและลดน้ำหนักของระบบ ตำแหน่งของท่ออากาศถูกกำหนดให้สอดคล้องกับตำแหน่งเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้โดยที่อากาศร้อน

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลมาตรฐานกับค่าสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้

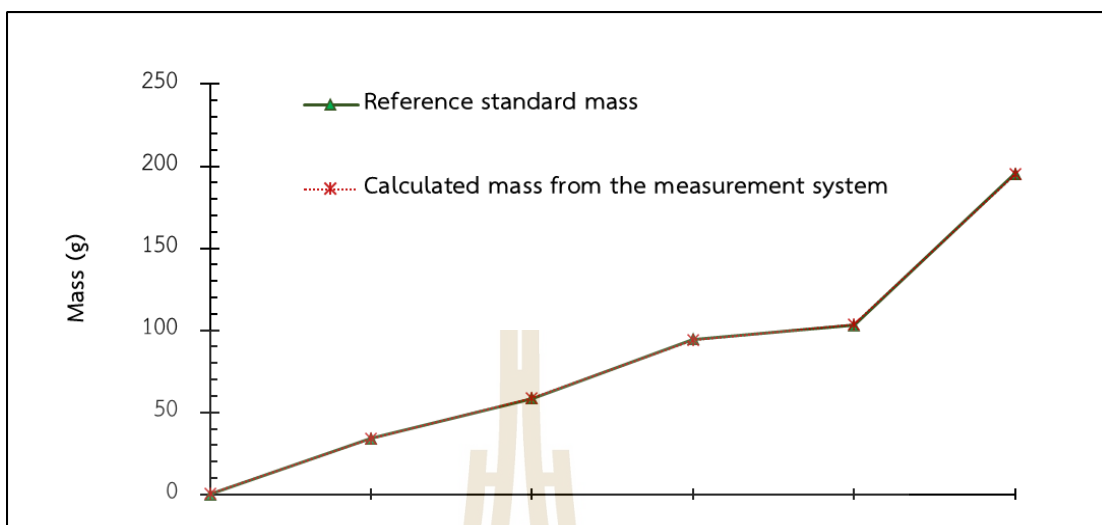
มวลที่คำนวณได้จากระบบ (g)	มวลมาตรฐานอ้างอิง (g)	ค่าสัญญาณดิจิทัลจากโมดูล HX711 (ADC count)
0.75	0	116890
34.12	34.26	149134
58.37	58.63	171866
94.38	94.41	205215
103.81	103.06	213728
195.51	195.52	303489

จากผลการสอบเทียบ Load Cell Straight Bar with Hook ร่วมกับโมดูล HX711 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้จาก HX711 (ADC count) และค่าน้ำหนักจริงมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังแสดงในสมการ ก.1

$$y = 953.75x + 116152 \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ y คือ ค่าสัญญาณดิจิทัลจากโมดูล HX711 (ADC count)
x คือ ค่าน้ำหนักจริง (g)

ค่าความชันของสมการ (953.75) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิจิทัลต่อหน่วยมวล ซึ่งสะท้อนความไวของระบบวัด ขณะที่ค่าคงที่ (116152) เป็นค่าออฟเซตของระบบที่เกิดจากสัญญาณพื้นฐานของโหลดเซลล์และวงจรขยายสัญญาณ เมื่อไม่มีการกระทำของมวล สมการดังกล่าวถูกนำไปใช้ในโปรแกรมเพื่อแปลงค่าดิบที่อ่านได้จาก HX711 ให้เป็นค่ามวล โดยทำการจัดรูปสมการเพื่อคำนวณหามวลจากค่า ADC count ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถแสดงค่ามวลได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ จากสมการได้ทำการนำทดสอบการชั่งมวลว่าระบบนั้นได้มวลสอดคล้องกันหรือไม่ อธิบายดังรูปที่ ก.11



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลอ้างอิงมาตรฐานและมวลที่คำนวณได้จากระบบ

จากการประเมินความสอดคล้องของสมการสอบเทียบระหว่างมวลอ้างอิงมาตรฐานและมวลที่คำนวณได้จากระบบวัด พบว่าสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) เท่ากับ 1.000 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองมีลักษณะเชิงเส้นสูงมาก โดยสมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด สะท้อนถึงความเหมาะสมของแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ในการสอบเทียบโพลีเซลล์ร่วมกับโมดูล HX711 นอกจากนี้ ค่า Root Mean Square Error of Calibration (RMSEC) ที่มีค่าเท่ากับ 0.450 g บ่งชี้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างมวลที่คำนวณได้จากระบบและมวลอ้างอิงอยู่ในระดับต่ำมาก เมื่อเทียบกับช่วงมวลที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าระบบวัดมีความแม่นยำสูงและสามารถนำสมการสอบเทียบดังกล่าวไปใช้ในการวัดมวลในการทดลองจริงได้อย่างน่าเชื่อถือ ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่ากระบวนการสอบเทียบที่ดำเนินการมีประสิทธิภาพ และสมการสอบเทียบที่ได้มีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบวัดมวลของการทดลองเชิงลึกในงานวิจัยนี้

ก.6 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อน

เพื่อให้การทดสอบเชิงความร้อนสามารถดำเนินการได้อย่างเป็นระบบและมีความถูกต้อง การพัฒนาโปรแกรมควบคุมและบันทึกข้อมูลจึงเป็นส่วนสำคัญของระบบทดสอบเชิงความร้อนเชิงลึก ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโค้ดสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ภายในระบบทดสอบ โดยโค้ดดังกล่าวทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ แปลงค่าที่วัดได้ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้โดยในโค้ดนี้บันทึกข้อมูล 4 ตำแหน่ง และซิงคลแบบต่อเนื่อง ทุกค่าถูกบันทึกทุก ๆ 1 นาที รวมถึงจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างต่อเนื่องและเป็นลำดับ โค้ดที่พัฒนาขึ้นได้ผ่านการทดสอบและปรับปรุงจากผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัด เพื่อให้ค่าที่แสดงผลและค่าที่บันทึกมีความสอดคล้องกับสถานะจริงของการทดลอง ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการ

ทดสอบเชิงความร้อน และสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้อย่างเหมาะสม แสดงดังรูปที่ ก.12

```

4sensorthermocoupleandHX711.ino
1  #include <max6675.h>
2  #include "HX711.h"
3
4  // 🌿 กำหนดขาเชื่อมต่อ MAX6675
5  int soPin = 12; // SO ใช้งาน
6  int sckPin = 13; // SCK ใช้งาน
7  int csPin1 = 10; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่ 1
8  int csPin2 = 9; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่ 2
9  int csPin3 = 8; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่ 3
10 int csPin4 = 7; // CS สำหรับเซนเซอร์ตัวที่ 4
11
12 // 🧠 สร้างอ็อบเจกต์ MAX6675
13 MAX6675 thermocouple1(sckPin, csPin1, soPin);
14 MAX6675 thermocouple2(sckPin, csPin2, soPin);
15 MAX6675 thermocouple3(sckPin, csPin3, soPin);
16 MAX6675 thermocouple4(sckPin, csPin4, soPin);
17
18 // 📡 ขาเชื่อมต่อ HX711
19 const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2;
20 const int LOADCELL_SCK_PIN = 3;
21 HX711 scale;
22
23 // ⌚ ตัวแปรเวลา
24 unsigned long previousMillis;
25 const long interval = 60000; // 1 นาที (60000 มิลลิวินาที)
26 int logNumber = 1;
27 unsigned long startMillis;
28
29 void setup() {
30   Serial.begin(9600);
31   delay(500);
32

```

รูปที่ ก.12 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อน



```

33 Serial.println("Initializing HX711...");
34 scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
35
36 // ❶ ตรวจสอบให้ HX711 พร้อมก่อนเริ่มอ่าน
37 bool hx711Ready = false;
38 for (int i = 0; i < 10; i++) { // ลองตรวจสอบ 10 ครั้ง (5 วินาที)
39   if (scale.is_ready()) {
40     hx711Ready = true;
41     break;
42   }
43   Serial.println("Waiting for HX711...");
44   delay(500);
45 }
46
47 if (hx711Ready) {
48   Serial.println("HX711 Ready!");
49 } else {
50   Serial.println("⚠ HX711 not detected. Please check connection.");
51 }
52
53 // 📄 พิมพ์หัวคอลัมน์ CSV
54 Serial.println("Log No,Time(min),Temp1,Temp2,Temp3,Temp4,Weight(g)");
55
56 startMillis = millis();
57 previousMillis = startMillis;
58
59 // อ่านค่าครั้งแรก
60 logData(0);
61 }
62
63 void loop() {
64   unsigned long currentMillis = millis();
65
66   // ถ้าครบเวลา 1 นาที → อ่านและบันทึก
67   if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
68     previousMillis = currentMillis;
69     unsigned long elapsedMinutes = (currentMillis - startMillis) / 60000;
70     logData(elapsedMinutes);
71   }
72
73   delay(100);
74 }
75
76 // 📄 ฟังก์ชันบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและน้ำหนัก
77 void logData(unsigned long elapsedMinutes) {
78   // อ่านค่าอุณหภูมิจาก 4 เซนเซอร์
79   float temp1 = thermocouple1.readCelsius();
80   float temp2 = thermocouple2.readCelsius();
81   float temp3 = thermocouple3.readCelsius();
82   float temp4 = thermocouple4.readCelsius();
83
84   // อ่านค่าน้ำหนักจาก HX711
85   float weight = NAN;
86   if (scale.is_ready()) {
87     long reading = scale.read();
88     weight = ((reading - 116152) / 953.75); // ✅ สมการคาลิเบรต
89   } else {
90     Serial.println("⚠ HX711 not responding during measurement.");
91   }
92
93   // แสดงผลในรูปแบบ CSV
94   Serial.print(logNumber++);
95   Serial.print(",");
96   Serial.print(elapsedMinutes);
97   Serial.print(",");
98   Serial.print(temp1);
99   Serial.print(",");
100  Serial.print(temp2);
101  Serial.print(",");
102  Serial.print(temp3);
103  Serial.print(",");
104  Serial.print(temp4);
105  Serial.print(",");
106  Serial.println(weight, 2);
107 }

```

รูปที่ ก.12 โค้ดระบบทดสอบเชิงความร้อน (ต่อ)



ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข นี้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงตารางผลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณ ที่ได้จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดอย่างเป็นระบบ โดยรวบรวมข้อมูลเชิงตัวเลขที่ได้จากการทดลองในแต่ละเงื่อนไข และอัตราส่วนผสมไว้อย่างครบถ้วน เพื่อให้ผู้อ่านสามารถตรวจสอบรายละเอียดของผลการทดลองได้อย่างชัดเจน และใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์และอภิปรายผลที่น่าสนใจ ตารางผลการทดลองในภาคผนวกนี้จึงมีบทบาทสำคัญในการยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

ข.1 อัตราส่วนผสมและผลการสกัดไบโอดีเซล

ในการสกัดไบโอดีเซลอัตราส่วนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน มีอัตราส่วนประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 0.5 % โดยมวลต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์มและละลายในเมทานอลที่มีปริมาณ 25 % โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม ในการศึกษาครั้งนี้สกัดไบโอดีเซลทั้งหมด 4 ครั้ง ใช้ น้ำมันพืชครั้งละ 5 L แสดงดังตารางที่ ข.1 เนื่องจากถ้าใช้เยอะและกวนผสมไม่ทั่วถึงการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจะไม่สมบูรณ์ และผลผลิตจากกระบวนการแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 อัตราส่วนผสมการสกัดไบโอดีเซล

ลำดับที่	น้ำมันพืช			เมทานอล			โซดาไฟ
	L	g	kg/L	L	g	kg/L	g
1	5	4414.90	0.88	1.25	924.25	0.74	25
2	5	4246.25	0.85	1.25	969.25	0.78	25
3	5	4376.25	0.88	1.25	913.10	0.73	25
4	5	4388.08	0.88	1.25	979.15	0.78	25
AVERAGE		4356.37	0.87		946.44	0.76	
STDEV.S		75.17	0.02		32.63	0.03	

ตารางที่ ข.2 ผลของการสกัดไบโอดีเซล

ลำดับที่	ไบโอดีเซล			กลีเซอริน	กลีเซอริน/ไบโอดีเซล
	L	g	kg/L	g	kg/kg
1	4.0	3510.96	0.88	1386.6	0.39
2	3.6	3041.82	0.84	1781.55	0.59
3	4.5	3699.61	0.82	1008.66	0.27
4	4.1	3404.44	0.83	779.07	0.23
AVERAGE	4.05	3414.21	0.84	1238.97	0.37
STDEV.S	0.37	276.64	0.02	439.98	0.16

ข.2 ตารางผลของการทดลองขั้นต้น

ตารางที่ ข.3 ผลความหนาแน่นถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Bulk density (Mean $\pm$ SD) (g/cm ³)
Coconut shell charcoal	-	0.930 $\pm$ 0.039
briquette		
100 : 0	20	0.536 $\pm$ 0.006 ^d
	23	0.481 $\pm$ 0.010 ^b
	26	0.426 $\pm$ 0.015 ^a
95 : 5	20	0.518 $\pm$ 0.009 ^{cd}
	23	0.477 $\pm$ 0.003 ^b
	26	0.436 $\pm$ 0.002 ^a
90 : 10	20	0.510 $\pm$ 0.011 ^c
	23	0.488 $\pm$ 0.008 ^b
	26	0.428 $\pm$ 0.019 ^a
85 : 15	20	0.527 $\pm$ 0.012 ^{cd}
	23	0.480 $\pm$ 0.005 ^b
	26	0.430 $\pm$ 0.004 ^a

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a – d) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

ตารางที่ ข.4 ผลค่าความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Heating value (cal/g)
Coconut shell charcoal	-	
briquette		6,473
100 : 0	20	5,704
	23	5,707
	26	5,710
95 : 5	20	5,820
	23	5,766
	26	5,658
90 : 10	20	5,764
	23	5,834
	26	5,751
85 : 15	20	6,067
	23	5,984
	26	5,900

ตารางที่ ข.5 ผลอัตราการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Combustion rate (Mean $\pm$ SD) (g/min)
Coconut shell charcoal briquette	-	2.348 $\pm$ 0.371
100 : 0	20	3.506 $\pm$ 1.743 ^{bcd}
	23	2.536 $\pm$ 0.157 ^{ab}
	26	2.911 $\pm$ 0.281 ^{abcd}
95 : 5	20	2.802 $\pm$ 0.307 ^{abcd}
	23	2.625 $\pm$ 0.515 ^{abc}
	26	3.025 $\pm$ 0.253 ^{abcd}
90 : 10	20	2.311 $\pm$ 0.129 ^a
	23	2.670 $\pm$ 0.241 ^{abc}
	26	2.678 $\pm$ 0.045 ^{abc}
85 : 15	20	3.426 $\pm$ 0.133 ^{abcd}
	23	3.724 $\pm$ 0.062 ^{cd}
	26	3.798 $\pm$ 0.549 ^d

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a – d) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

ตารางที่ ข.6 ผลประสิทธิภาพการใช้ความร้อนถ่านอัดแท่งในการทดลองขั้นต้น

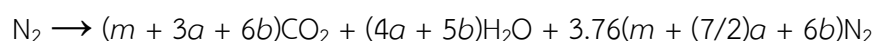
Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Height (mm)	Thermal efficiency (Mean $\pm$ SD) (%)
Coconut shell charcoal briquette	-	13.794 $\pm$ 3.406
100 : 0	20	9.360 $\pm$ 4.472 ^a
	23	11.345 $\pm$ 0.447 ^{ab}
	26	10.327 $\pm$ 1.534 ^{ab}
95 : 5	20	10.651 $\pm$ 2.280 ^{ab}
	23	8.712 $\pm$ 1.164 ^a
	26	11.334 $\pm$ 0.521 ^{ab}
90 : 10	20	10.612 $\pm$ 1.757 ^{ab}
	23	9.047 $\pm$ 0.390 ^a
	26	10.076 $\pm$ 1.455 ^{ab}
85 : 15	20	10.927 $\pm$ 1.581 ^{ab}
	23	11.340 $\pm$ 0.671 ^{ab}
	26	13.069 $\pm$ 0.215 ^b

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a – b) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้การทดลองเชิงลึก ในที่นี้ ยกตัวอย่างอัตราส่วนผสม 80 : 20 : 15 (ผงถ่านห้ำน้ำมันสำปะหลัง : กลีเซอริน : แป้งมันสำปะหลัง) โดยมวล จากสมการที่ 2.7

$$mC + a(C_3H_8O_3) + b(C_6H_{10}O_5) + (m + (7/2)a + 6b)O_2 + 3.76(m + (7/2)a + 6b) \quad (2.7)$$



โดยที่ m คือ สัดส่วนของคาร์บอนจากถ่าน (mol)

a คือ สัดส่วนของกลีเซอริน (mol)

b คือ สัดส่วนของแป้งมันสำปะหลัง (mol)

1. สมมติฐาน

1.1 สมมติฐานเกี่ยวกับเชื้อเพลิง

กำหนดให้ถ่านอัดแท่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ ผงถ่านหังน้ำมัน
สำหรับ ก๊าซเซอริน และแป้งมันสำหรับ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

ผงถ่านหังน้ำมันสำหรับ สมมติให้เป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ ผงถ่านหังน้ำมันสำหรับ
สูตรเคมี C มวลโมเลกุล 12.011 g/mol

กลีเซอริน (Glycerin) สูตรเคมี $C_3H_8O_3$ มวลโมเลกุล 92.094 g/mol

แป้งมันสำหรับ (Starch unit) แทนด้วยหน่วยโครงสร้างพื้นฐาน ($C_6H_{10}O_5$) มวล
โมเลกุล 162.141 g/mol

1.2 สมมติฐานมวลรวมของเชื้อเพลิง

กำหนดให้มวลถ่านอัดแท่งที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วรวมที่ใช้ในการคำนวณ
เท่ากับ 82.907 g โดยมวลทุกอัตราส่วนผสมและทุกความดันการกดอัดมีมวลต่อ 1 ก้อน ของถ่านอัด
แท่งอยู่ที่ 27.636 ± 0.741 g ในการทดลองแต่ละครั้งใช้จำนวน 3 ก้อน มวลของแต่ละองค์ประกอบ
ในแต่ละอัตราส่วนผสมคำนวณจากสัดส่วนโดยมวลของอัตราส่วนผสมนั้น ๆ

1.3 สมมติฐานเกี่ยวกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

อากาศประกอบด้วย

ออกซิเจน (O_2) = 21% โดยปริมาตร

ไนโตรเจน (N_2) = 79% โดยปริมาตร

อัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อออกซิเจนในอากาศ $N_2/O_2 \approx 3.76$

ดังนั้น ปริมาณอากาศรวมที่ใช้คำนวณจะคิดจาก $\text{mol air} = \text{mol } O_2 \times (1+3.76)$

1.4 สมมติฐานสภาวะการคำนวณแก๊ส

การแปลงโมลเป็นปริมาตรแก๊ส คำนวณที่ สภาวะมาตรฐาน (STP)

$1 \text{ mol gas} = 22.414 \text{ L}$

ระยะเวลาเผาไหม้ที่ใช้ในการแปลงอัตราการไหลของอากาศ

$t = 10 \text{ min}$

2. การคำนวณ

2.1 ข้อมูลกำหนด

มวลถ่านอัดแท่งรวม $m_{\text{briquette}} = 82.90666667 \text{ g}$

อัตราส่วนผสมโดยมวล (parts) 80 : 20 : 15 (ผงถ่านหังน้ำมันสำหรับ : กลีเซอริน
: แป้งมันสำหรับ)

ผลรวมอัตราส่วน $\Sigma \text{parts} = 115$

2.2 การคำนวณมวลของแต่ละองค์ประกอบ

2.2.1 มวลถ่านห้ำมันสำปะหลัง (สมมติเป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ C)

$$m_c = m_{\text{briquette}} \times (80/115) \\ = 82.90666667 \text{ g} \times (80/115) = 57.6742 \text{ g}$$

2.2.2 มวลกลีเซอริน ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$)

$$m_{\text{gly}} = m_{\text{briquette}} \times (20/115) \\ = 82.90666667 \text{ g} \times (20/115) = 14.4186 \text{ g}$$

2.2.3 มวลแป้งมันสำปะหลัง ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)

$$m_{\text{starch}} = m_{\text{briquette}} \times (15/115) \\ = 82.90666667 \text{ g} \times (15/115) = 10.8139 \text{ g}$$

2.3 การแปลงมวลเป็นจำนวนโมล

2.3.1 โมลคาร์บอนจากถ่านห้ำมันสำปะหลัง

$$m = (57.6742 \text{ g}) / (12.011 \text{ g/mol}) = 4.8018 \text{ mol}$$

2.3.2 โมลกลีเซอริน

$$a = (14.4186 \text{ g}) / (92.094 \text{ g/mol}) = 0.15656 \text{ mol}$$

2.3.3 โมลแป้งมันสำปะหลัง

$$b = (10.8139 \text{ g}) / (162.141 \text{ g/mol}) = 0.0666945 \text{ mol}$$

2.4 การคำนวณโมลออกซิเจนเชิงทฤษฎี

$$\begin{aligned} \text{mol O}_2 &= m + (7/2)a + 6b \\ &= 4.8018 \text{ mol} + 3.5 \times 0.15656 \text{ mol} + 6 \times 0.0666945 \text{ mol} \\ &= 4.8018 + 0.54796 + 0.40017 \\ &= 5.74992 \text{ mol} \end{aligned}$$

2.5 การแปลงโมล O_2 เป็นมวล

$$\begin{aligned} m_{\text{O}_2} &= \text{mol O}_2 \times M_{\text{O}_2} \\ &= 5.74992 \text{ mol} \times 32 \text{ g/mol} \\ &= 183.997 \text{ g} \end{aligned}$$

2.6 การคำนวณโมลอากาศที่ต้องใช้ (รวม N_2)

กำหนดให้อากาศมีสัดส่วน $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 1 : 3.76$

$$\begin{aligned} \text{mol air} &= \text{mol O}_2 \times (1+3.76) \\ &= 5.74992 \text{ mol} \times 4.76 \\ &= 27.3696 \text{ mol} \end{aligned}$$

2.7 การคำนวณมวลอากาศ

สมมติฐานอากาศ อากาศแห้งประกอบด้วย (โดยปริมาตร $\approx$ โดยโมล)

$$\text{ออกซิเจน (O}_2\text{)} = 21\%$$

$$\text{ไนโตรเจน (N}_2\text{)} = 79\%$$

มวลโมลของแก๊สแต่ละชนิด

$$M_{\text{O}_2} = 32 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \text{ g/mol}$$

การคำนวณมวลโมลเฉลี่ยของอากาศ

$$\begin{aligned} M_{\text{air}} &= (0.21 \times 32) + (0.79 \times 28) \\ &= 28.85 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

การคำนวณมวลอากาศ

$$\begin{aligned} m_{\text{air}} &= \text{mol air} \times M_{\text{air}} \\ &= 27.3696 \text{ mol} \times 28.85 \text{ g/mol} \\ &= 789.64 \text{ g} \end{aligned}$$

2.8 การคำนวณปริมาตรอากาศที่ STP

กำหนดให้ $1 \text{ mol gas} = 22.414 \text{ L}$

$$\begin{aligned} V_{\text{air,STP}} &= 27.3696 \text{ mol} \times 22.414 \text{ L/mol} \\ &= 613.46 \text{ L} \\ &= 0.61346 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

2.9 การแปลงเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

เนื่องจากกำหนดการเผาไหม้ใช้เวลา 10 นาที อากาศพอดีได้ดังนี้ (อากาศ 100 %)

$$\begin{aligned} &= (0.61346 \text{ m}^3 / 10 \text{ min}) \times (60 \text{ min} / \text{hr}) \\ &= 3.68 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

โดยที่ท่อลมเข้ามีขนาด 27 mm คำนวณจากสมการ $v = Q/A$ ได้ความเร็วลมอากาศ เป็น 1.78 m/s

การคำนวณอากาศเกิน 200 %

$$\begin{aligned} &= 2 \times 3.68 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 7.36 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

โดยที่ท่อลมเข้ามีขนาด 27 mm คำนวณจากสมการ $v = Q/A$ ได้ความเร็วลมอากาศ เป็น 3.56 m/s



ภาคผนวก ค
ผลงานทางวิชาการ

ภาคผนวก ค

ค.1 ผลงานที่ได้รับการจดทะเบียนสิทธิบัตรระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท

ค.1.1 เครื่องอัดถ่านแท่งแบบใช้แม่แรงไฮดรอลิก

 คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ การประดิษฐ์ ☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์ ☒ อนุสิทธิบัตร ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542		แบบ สป/สผ/อสป/001-ก หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า				
		สำหรับเจ้าหน้าที่ <table border="1"> <tr> <td>วันรับคำขอ</td> <td>11/03/2569</td> <td rowspan="2">เลขที่คำขอ 2603000943</td> </tr> <tr> <td>วันยื่นคำขอ</td> <td>11/03/2569</td> </tr> </table>		วันรับคำขอ	11/03/2569	เลขที่คำขอ 2603000943
วันรับคำขอ	11/03/2569	เลขที่คำขอ 2603000943				
วันยื่นคำขอ	11/03/2569					
		สืบค้นงานก่อนการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์				
		วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา			
		วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร			
		ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่				
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ เครื่องอัดถ่านแท่งแบบใช้แม่แรงไฮดรอลิก						

ค.1.2 สูตรถ่านอัดแท่งจากเห้งหมื่นสำปะหลัง

 คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ การประดิษฐ์ ☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์ ☒ อนุสิทธิบัตร ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542		แบบ สป/สผ/อสป/001-ก หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า				
		สำหรับเจ้าหน้าที่ <table border="1"> <tr> <td>วันรับคำขอ</td> <td>11/03/2569</td> <td rowspan="2">เลขที่คำขอ 2603000945</td> </tr> <tr> <td>วันยื่นคำขอ</td> <td>11/03/2569</td> </tr> </table>		วันรับคำขอ	11/03/2569	เลขที่คำขอ 2603000945
วันรับคำขอ	11/03/2569	เลขที่คำขอ 2603000945				
วันยื่นคำขอ	11/03/2569					
		สืบค้นงานก่อนการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์				
		วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา			
		วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร			
		ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่				
1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ สูตรถ่านอัดแท่งจากเห้งหมื่นสำปะหลัง						

ค.2 ผลงานนำเสนอบทความวิชาการระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท

ค.2.2 ประชุมวิชาการระดับชาติ



สถาบันวิจัยพุทธศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ขอขอบพระคุณเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า
คุณวราวุฒิ สมินาง, คุณกระวี ตรีอำรรค, คุณเทวรัตน์ ตรีอำรรค และคุณบุญทริกา ศิลา

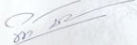
ได้เสนอบทความ D-02 เรื่อง

สมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน

ในการประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์
ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 24)

จัดขึ้นระหว่างวันที่ 20-21 กุมภาพันธ์ 2568
ณ กรีนเลค รีสอร์ท เชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

ให้ไว้ ณ วันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2568


 (รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ)
 นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน


 รองศาสตราจารย์ ดร.อรณิศวรรค์ ดีทยาภท)
 ประธานการจัดประชุมวิชาการฯ


 (ศาสตราจารย์ ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)
 ที่ปรึกษางานประชุมวิชาการฯ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน COMBUSTION PERFORMANCE OF BRIQUETTE FUEL FROM CASSAVA RHIZOME MIXED WITH GLYCERIN

วรวิทย์ สมินาง¹

กระวี ตรีอำนาจ¹

เทวรินทร์ ตรีอำนาจ²

บุญพริกา ศิลา³

¹ สำนักวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² สำนักวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

*Corresponding author:

Tel.: 062-5792114

E-mail address: worawutsame@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน ในอัตราส่วนถ่านเหง้ามัน:กลีเซอริน ที่แตกต่างกันคือ 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 ขึ้นรูปโดยใช้การกดอัดด้วยแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ตัน การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น และค่าความร้อนโดยเครื่อง Bomb Calorimeter (IKA / C PKG) พบว่าความชื้นและความร้อนมีค่าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 การทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้ด้วยการวัดค่าอุณหภูมิของถ่าน ห้องเผาไหม้ และน้ำที่ใช้ต้ม โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ MAX6675 เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน ในการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง พบว่าถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังไม่มีการผสมกลีเซอริน 100:0 มีค่าความร้อน 5,707 แคลอรีต่อกรัม ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 9.28 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเผาไหม้ 2.50 กรัมต่อนาที ส่วนการผสมกลีเซอรินในอัตราส่วน 95:5 มีค่าความร้อน 5,748 แคลอรีต่อกรัม ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 10.60 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเผาไหม้ 2.80 กรัมต่อนาที อัตราส่วนผสม 90:10 มีค่าความร้อน 5,783 แคลอรีต่อกรัม ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 10.60 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเผาไหม้ 2.31 กรัมต่อนาที และอัตราส่วนผสมกลีเซอรินสูงที่สุดในการศึกษา 85:15 มีค่าความร้อน 5,984 แคลอรีต่อกรัม ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 10.91 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเผาไหม้ 3.43 กรัมต่อนาที อัตราส่วนผสม 85:15 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มส่วนผสมกลีเซอรินในจำนวนที่มากขึ้นส่งผลให้ถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังมีค่าความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และอัตราการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เป็นการนำกลีเซอรินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้เป็นประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่ง; เหง้ามันสำปะหลัง; กลีเซอริน; ค่าความร้อน; ประสิทธิภาพ

Abstract

This research focuses on studying the combustion performance and heating value of briquette charcoal made from cassava rhizome mixed with glycerin at different ratios: 100:0, 95:5, 90:10, and 85:15. The briquettes were formed using a 6-ton hydraulic press. Fuel properties, including moisture content, density, and heating value with Bomb Calorimeter (IKA / C PKG), were tested. It was found that the moisture content and heating value met the Community Product Standard (CPS 238/2547). Combustion performance was evaluated by measuring the temperatures of the charcoal, combustion chamber, and boiling water with MAX6675 temperature sensors to calculate thermal efficiency. The results showed that cassava rhizome charcoal without glycerin (100:0) had a heating value of 5,707 cal/g, thermal efficiency of 9.28%, and a burning rate of 2.50 g/min. The 95:5 mixture ratio yielded a heating value of 5,748 cal/g, thermal efficiency of 10.60%, and a burning rate of 2.80 g/min. The 90:10 ratio showed a heating value of 5,783 cal/g, thermal efficiency of 10.60%, and a burning rate of 2.31 g/min. The highest glycerin ratio studied, 85:15, resulted in a heating value of 5,984 cal/g, thermal efficiency of 10.91%, and a burning rate of 3.43 g/min. The findings indicate that increasing the glycerin content improves the heating value, thermal efficiency, and burning rate of cassava rhizome charcoal. This approach also demonstrates the potential reuse of glycerin, a byproduct of biodiesel production, as a valuable resource.

Keywords: Briquette; Cassava rhizome; Glycerin; Heating value; Efficiency



1. บทนำ

ปัญหาภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจกขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การเกษตร การคมนาคม และการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งทั้งหมดนี้ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและปัญหาสภาพอากาศที่แปรปรวน ด้วยเหตุนี้ เชื้อเพลิงทางเลือกที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชีวมวลจึงได้รับความสนใจมากขึ้น ในปัจจุบันพลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในทางเลือกสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลจากประเทศสหรัฐอเมริการะบุว่า ในช่วงปี 2008 การบริโภคพลังงานชีวมวลอยู่ที่ 3,851 ล้านล้าน Btu และเพิ่มขึ้นเป็น 4,765 ล้านล้าน Btu ในปี 2016 โดยส่วนใหญ่พลังงานชีวมวลมีมาจากรำและเชื้อเพลิงชีวภาพ นอกจากนี้ ยังมีการใช้วัตถุดิบจากการเกษตร เช่น กากอ้อย แกลบ และฟาง ในหลายประเทศทั่วโลก เพื่อสนับสนุนการผลิตพลังงานทดแทน ข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญและศักยภาพของพลังงานชีวมวลในการเป็นพลังงานทดแทน [1] และวิกฤตพลังงานและราคาน้ำมันที่สูงขึ้นเป็นปัญหาระดับโลก การลดการใช้พลังงานจากแหล่งที่ไม่หมุนเวียน เช่น น้ำมันและถ่านหิน ช่วยบรรเทาปัญหาการขาดแคลนพลังงานและลดมลพิษ ปัจจุบันการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น ลม น้ำ แสงอาทิตย์ และชีวมวลได้รับความสนใจ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่ง [2]

ชีวมวลคือวัสดุอินทรีย์จากพืช เช่น สาหร่าย ต้นไม้ และของเสียอินทรีย์ ที่เกิดจากการสังเคราะห์แสง พลังงานในชีวมวลถูกปลดปล่อยผ่านการเผาไหม้หรือย่อยสลาย โดยเคยเป็นแหล่งพลังงานสำคัญคิดเป็น 10-14% ของพลังงานโลก [3] กระบวนการไพโรไลซิสคือการแปลงชีวมวลเป็นถ่านโดยการให้ความร้อนในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ (Combustion) [4] และกลีเซอรินถือว่าเป็นขยะที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันใช้น้ำมันทำปฏิกิริยากับเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ [5] การใช้อัตราส่วนผสมกลีเซอริน 5-10% ในการผลิตถ่านอัดแท่งมีผลต่อค่าความร้อน รวมถึงลดมลพิษจากการเผาไหม้ อัตราส่วนนี้ช่วยให้มลพิษไม่เกินระดับที่กำหนดเหมาะสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [6] การประเมินประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของถ่านอัดแท่งจากผักกาดเขียวปลีทำได้โดยการวัดอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 แบบ โดยแต่ละตัวอย่างหนัก 500 กรัม ตัวอย่างเหล่านี้ถูกใช้ต้มน้ำ 2,000 กรัมจนถึงจุดเดือด จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์ตามปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ [7]

จากการรวบรวมงานวิจัยทำให้ทราบถึงการขาดการวิจัยเกี่ยวกับถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเหง้าหัวมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอริน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่นำเสนอการทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งดังกล่าวถึงข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากลีเซอรินเมื่อใช้เป็นสารผสมจะช่วยให้ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งได้ ผลการศึกษานี้ให้ข้อมูลที่มีค่าสำหรับการปรับปรุงการผลิตและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากชีวมวลเพื่อการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกลีเซอรินต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของถ่านอัดแท่ง โดยศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะและลักษณะการเผาไหม้ และค่าความร้อนที่ได้ โดยเฉพาะในอัตราส่วนกลีเซอรินที่อยู่ในช่วง 5-15% ผลการศึกษานี้จะช่วยในการกำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพสูง ค่าความร้อนสูง และมลพิษต่ำ ซึ่งทำให้เหมาะสมเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก ช่วยในการพัฒนาและเสริมสร้างเทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่งจากชีวมวลเพื่อประโยชน์ทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ถ่านเหง้ามันสำปะหลัง

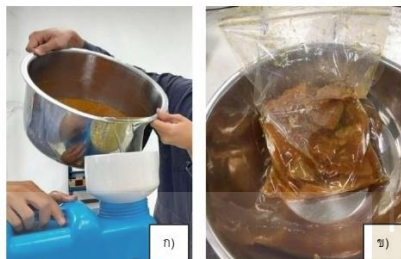
ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่แปลงเหง้ามันสำปะหลังให้เป็นถ่านโดยการให้ความร้อนในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ (Combustion) เหง้ามันสำปะหลังที่ได้ในพื้นที่จังหวัดขอนแก่นซึ่งเป็นเศษเหลือทางการเกษตร ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 400-800 °C ในเตาคาร์บอนไนเซชันซึ่งไม่มีออกซิเจน [4] โดยมีกระบวนการผลิตถ่านเหง้ามันสำปะหลังอธิบายตามรูปที่ 1ก) - 1ค) และถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ได้มีค่าความร้อนอยู่ที่ 5,947 แคลอรีต่อกรัม



รูปที่ 1 ก) ตัดเลือกเหง้ามันสำปะหลัง, ข) กระบวนการไพโรไลซิส และ ค) หลัจากกระบวนการไพโรไลซิส

2.2 การสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ตามรูปที่ 2 โดยนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 0.5% โดยน้ำหนักต่อน้ำมัน และละลายในเมทานอลที่มีปริมาณ 25% ของน้ำมัน หลังจากนั้นก็เติมสารละลายลงในน้ำมันที่ถูกอุ่นไว้ล่วงหน้า ปิดภาชนะและรักษาอุณหภูมิคงที่ที่ 60 °C พร้อมทั้งกวนส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาแล้ว จะเทส่วนผสมลงในเหยือกและปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน จากนั้นจึงแยกชั้นกลีเซอรินที่อยู่ด้านล่างออกไป [5]



รูปที่ 2 ก) แยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอริน และ ข) กลีเซอรินที่ได้จากการบวกรสชาติไบโอดีเซล

2.3 เครื่องอัดแท่งไฮดรอลิก

จากการศึกษาการอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งแบบแม่แรงไฮดรอลิกเพื่อวัตถุประสงค์ให้เหมาะสำหรับเกษตรกรรายย่อย [8] ที่ต้องการทำแท่งอัดแท่งเพราะการออกแบบไม่ซับซ้อนและอุปกรณ์การสร้างเครื่องอัดแท่งหาได้ทั่วไปตามท้องตลาด งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แม่แรงขนาด 6 ตัน เพื่ออัดขึ้นรูปแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว (50.8 มิลลิเมตร) โดยใช้ท่อเหล็กกลวงขึ้นรูปเป็นแม่พิมพ์ทรงกระบอกที่สามารถปรับความหนาแน่นของก้อนดินได้ด้วยการตั้งระยะอัดตามต้องการ แบบของเครื่องอัดแท่งแบบแม่แรงไฮดรอลิก เป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบเครื่องอัดแท่งแบบแม่แรงไฮดรอลิก

2.4 กระบวนการผลิตแท่งอัดแห้ง

ในกระบวนการผลิตแท่งอัดแห้งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.4.1 บดดินให้มีอนุภาคเล็กลงจากนี้ร่อนผ่านตะแกรง

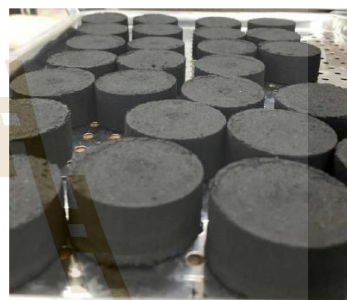
2.4.2 ต้มน้ำอุณหภูมิ 90 °C ผสมเชื้อเพลิงถ่านรวมกลีเซอริน : น้ำ : แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 1 : 1 : 0.15 โดยแป้งมันสำปะหลังถูกใช้เป็นตัวยึดประสานที่ไม่มีสารอันตรายปนเปื้อน [9] อัตราส่วนผสมในการทดลองนี้ เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิง

ลำดับที่	อัตราส่วนผสมถ่านแห้งมันสำปะหลัง : กลีเซอริน
1	100 : 0
2	95 : 5
3	90 : 10
4	85 : 15

2.4.3 นำเชื้อเพลิงที่ผสมรวมแป้งมันสำปะหลังและน้ำแล้วมาอัดขึ้นรูปเป็นก้อน ก้อนละ 40 กรัม อัตราส่วนผสมละ 20 ก้อน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร และความสูง 20 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการควบคุมความหนาแน่นของแท่งอัดแห้งให้คงที่

2.4.4 อบแท่งอัดแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นของแท่งอัดแห้งจากการตากแดด แท่งอัดแห้งที่ได้มีลักษณะตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แท่งอัดแห้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรินอัดแห้ง

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเป็นลักษณะทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานความร้อนรวมถึงความชื้นจากเชื้อเพลิงอัดแห้ง [10] รายละเอียดของการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	วิธีทดสอบ
ค่าความร้อน (Heating Value)	ASTM D5865
ความชื้น (Moisture Content)	ASTM D3173

2.5.1 การหาค่าความร้อน (Lower Heating Value) โดยเครื่อง Bomb Calorimeter (IKA / C PKG) ค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในบางครั้งอาจเรียกว่าค่าความร้อนของการเผาไหม้ โดยวัดในหน่วยแคลอรีต่อกรัมของเชื้อเพลิง (cal/g) ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 ทำการทดสอบหาค่าความร้อนวัดดูบสารตั้งต้น ได้แก่ แท่งอัดแห้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอริน และเชื้อเพลิงถ่านอัดแห้งมันสำปะหลังผสมกลี



เซอร์นิตแห่ง ทดสอบค่าความร้อนทุกอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 1 จำนวน 3 ซ้ำ นอกจากนี้ยังทดสอบค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจาก กะละมะพร้าวที่ซื้อได้ทั่วไปในท้องตลาด แสดงค่าความร้อนดังตารางที่ 4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง เพื่อนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบค่าที่ผสม ขึ้น

2.5.2 การหาปริมาณความชื้น (Moisture Content) การวิเคราะห์ ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D3173 ตัวอย่างจะให้ความร้อน อย่างสม่ำเสมอในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิระหว่าง 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ให้น้ำในตัวอย่างระเหยออก จนหมด ทำการทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 1 จำนวน 3 ก่อนในการสุ่มแต่ละอัตราส่วนผสมรวมไปถึงถ่านกะละมะพร้าวที่ซื้อ ได้ทั่วไป การหาปริมาณความชื้นได้จากสมการที่ 1

$$M = \frac{A-B}{A} \quad (1)$$

เมื่อ M คือ ค่าความชื้น (%)

A คือ น้ำหนักตัวอย่างทดลองก่อนอบ (g)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังอบ (g)

2.5.3 การหาค่าความหนาแน่น (Density Value) ของเชื้อเพลิง หาได้ตามสมการที่ 2 โดยทำการทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามตาราง ที่ 1 จำนวน 3 ก่อน โดยการสุ่มแต่ละอัตราส่วนผสมรวมไปถึงถ่าน กะละมะพร้าวที่ซื้อได้ทั่วไป

$$D = \frac{M}{V} \quad (2)$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)

M คือ น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (g)

V คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิง (m^3)

2.5.4 คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 238/2547 [11]

ตารางที่ 3 คุณลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 238/2547

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	ถ่านอัดแท่ง มพช.238/2547
ลักษณะทั่วไป	รูปทรงเดียวกัน ขนาดใกล้เคียง กัน สีดำสม่ำเสมอ ไม่เปราะ อาจแตกหักได้บ้าง
ค่าความร้อน (Heating Value)	ไม่ควรต่ำกว่า 5,000 แคลอรี/กรัม
ความชื้น (Moisture Content)	ไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

2.6 การหาสมรรถนะการเผาไหม้

2.6.1 อัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) หมายถึง อัตราที่วัสดุ เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้หรือถูกใช้งานในหน่วยเวลาหนึ่ง ซึ่งแสดงถึง

ประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้จะถูกใช้ในการ ศึกษากระบวนการเผาไหม้ในวัสดุต่าง ๆ เช่น เชื้อเพลิงแข็ง (ถ่านอัดแท่ง) เชื้อเพลิงเหลว หรือในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่ เกี่ยวข้องกับพลังงาน สูตรคำนวณอัตราการเผาไหม้ ดังสมการที่ 3 โดยการทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแล้วจับเวลากับมวลของ เชื้อเพลิงที่หายไป ทดสอบอัตราส่วนผสมละ 3 ซ้ำ รวมไปถึงถ่าน กะละมะพร้าวที่ซื้อได้ทั่วไป

$$m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3)$$

เมื่อ m คือ อัตราการเผาไหม้ (g/min)

Δm คือ การเปลี่ยนแปลงของมวลเชื้อเพลิง (g)

Δt คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลา (minute)

2.6.2 ประสิทธิภาพการต้มน้ำ หมายถึง ความสามารถของถ่าน อัดแท่งในการแปลงพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไปเป็น ความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ โดยมีการวัดผลจากจำนวนพลังงานที่ใช้ใน การต้มน้ำและเปรียบเทียบกับพลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง เหน้จมีนสำปะหลังผสมกลีเซอรินอัดแท่ง โดยวิธีการต้มน้ำเพื่อหา ความสามารถของถ่านในการให้ความร้อนแก่น้ำ ทำการทดสอบต้มน้ำ 1,000 กรัม ในหม้อต้มน้ำอะลูมิเนียมเกรด 1060 ต่อถ่านที่แห้งแล้วแต่ ละอัตราส่วน 4 ก้อนรวมประมาณ 80-90 กรัม โดยประมาณ ต่อ 1 การ ทดลองและรวมไปถึงถ่านกะละมะพร้าวที่ซื้อได้ทั่วไป การวัดอุณหภูมิ เหน้หลังจากให้ความร้อนแก่ถ่านเหมือนกันเป็นเวลา 1 นาที ด้วยหัวพัน ไฟใช้กับแก๊สกระป๋อง วัดอุณหภูมิโดยใช้ Arduino Uno R3 เป็นตัวเก็บ ข้อมูลแบบอัตโนมัติ ใช้ Sensor MAX6675 คู่กับ Thermocouple Type K จำนวน 3 ชุด เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิ 3 ตำแหน่งคือ อุณหภูมิถ่าน อุณหภูมิห้องเผาไหม้ และ อุณหภูมิของน้ำ ทำการต้มน้ำจนเมื่ออุณหภูมิ ประมาณ 60 °C เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำสุญเสียมวลเนื่องจากการเดือด เป็นไอ ทำการทดสอบแต่ละตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้ว นำไปคำนวณหาประสิทธิภาพ ตามสมการที่ 4 สมมติให้อุณหภูมิหม้อ ต้มน้ำเท่ากับอุณหภูมิของน้ำ การทำงานของระบบเป็นดังแสดงรูปที่ 5

$$\eta_{th} = \frac{Q_{water} + Q_{pot}}{Q_{fuel}} \times 100\% \quad (4)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพการต้มน้ำ (%)

Q_{water} คือ พลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำ (J)

$Q_{water} = m_{water} \square C_{p,water} \square \Delta T_{water}$

m_{water} คือ มวลของน้ำ (g)

$C_{p,water}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ 4.18 J/g (°C)

ΔT_{water} คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)

Q_{pot} คือ พลังงานที่ใช้กับหม้อต้มน้ำ (J)

$Q_{pot} = m_{pot} \square C_{p,pot} \square \Delta T_{water}$

m_{pot} คือ มวลของหม้อต้มน้ำ (g)



$C_{p, pot}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของหม้ออะลูมิเนียม
เกรด 1060 มีค่าเท่ากับ $0.896 \text{ J/g } (^{\circ}\text{C})$
 Q_{fuel} คือ พลังงานจากเชื้อเพลิง (J)
 $Q_{fuel} = M_{fuel} \cdot LHV$
 M_{fuel} คือ มวลก่อนเผาไหม้ – มวลหลังเผาไหม้ (g)
LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (J/g)



รูปที่ 5 การทำงานของระบบ

2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

เป็นวิธีพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคำตอบสนอง (Response) หรือลักษณะคุณภาพ (Quality) สนใจศึกษาหรือปรับปรุงของผลิตภัณฑ์ (ผลลัพธ์: Output) จากระบบหรือกระบวนการ ในการศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เป็นการสนใจศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว คือ อัตราส่วนผสมของกลีเซอรินที่มีผลต่อ ค่าความร้อน อัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินหรือไม่ โดยใช้โปรแกรม Excel Data Analysis ANOVA: Single Factor วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างละ 3 ซ้ำมาวิเคราะห์ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 = อัตราส่วนผสมไม่มีผลต่อค่าที่ต้องการศึกษา

H_1 = อัตราส่วนผสมมีผลต่อค่าที่ต้องการศึกษา

ถ้าค่า F ที่ได้จากวิเคราะห์ ANOVA: Single Factor วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % นั้นมีค่ามากกว่าค่า F_{crit} จะสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

3. ผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

จากการหาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงได้แก่ ค่าความร้อน (Lower Heating Value) และ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับ คุณสมบัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ได้ดังตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงถ่าน

เหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินอัดแท่ง เป็นทรงกระบอกตัน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 51.53 มิลลิเมตร ความสูงเฉลี่ย 20.63 มิลลิเมตร และน้ำหนักเฉลี่ย 22.48 กรัม

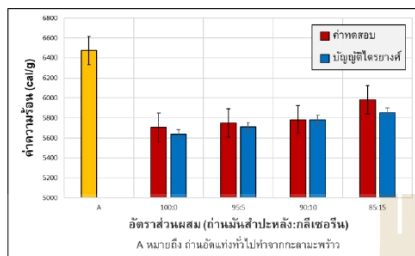
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

อัตราส่วนผสม	ความร้อน (cal/g)	ความชื้น (%)	ทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547	> 5,000	< 8	รูปทรงเดียวกัน ขนาดใกล้เคียงกัน สีดำ สม่ำเสมอ ไม่เปราะ อาจแตกหักได้บ้าง	-
วัตถุดิบตั้งต้น				
ผงถ่านเหง้ามันสำปะหลัง	5,947			
แป้งมันสำปะหลัง	3,563			
กลีเซอริน	7,612			
ถ่านอัดก้อนทั่วไป (กะลามะพร้าว)				
กะลามะพร้าว	6,473	5.70	ผ่าน	0.93
ผงถ่านเหง้ามันสำปะหลัง : กลีเซอริน				
100 : 0	5,707	7.40	ผ่าน	0.54
95 : 5	5,748	4.11	ผ่าน	0.52
90 : 10	5,783	3.69	ผ่าน	0.51
85 : 15	5,984	3.52	ผ่าน	0.54

จากตารางที่ 4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ทำทดสอบเปรียบเทียบกับ คุณสมบัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 จะเห็นได้ว่าความร้อน ความชื้น และลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง นั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ทุกอัตราส่วนผสม

ในการศึกษานี้จะเน้นการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ที่มีตัวแปรต้นมาจากการเปลี่ยนอัตราส่วนการเพิ่มกลีเซอรินดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ Anova: Single Factor ว่าอัตราส่วนผสมกลีเซอรินนั้นมีผลต่อความร้อนหรือไม่ จากการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % นั้นพบว่าอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของกลีเซอรินมีผลต่อค่าความร้อน ทำการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นชัดดังแสดงรูปที่ 6

การประจักษ์การ เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล
ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 24)
วันที่ 20-21 กุมภาพันธ์ 2568 ณ วิทยาลัยเทคโนโลยี



รูปที่ 6 ค่าความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยน

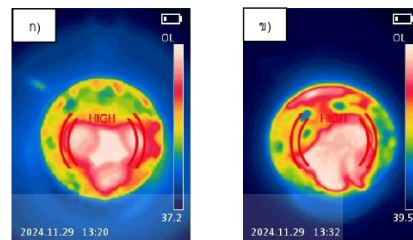
จากรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนผสม และ ค่าความร้อน ค่าความร้อนแปรผันตรงการเพิ่มขึ้นของกลีเซอริน และมีแนวโน้มเป็นไปตามการเทียบปฏิกิริยาเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งค่าความร้อนค่าหนึ่งสำหรับสภาวะเพียงอย่างเดียวมีค่า 5,707 cal/g และค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนผสม ผงถ่านหุงต้มสำหรับสภาวะ : กลีเซอริน อยู่ที่อัตราส่วน 85 : 15 มีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 5,984 cal/g แต่ค่าที่แตกต่างไปจากสภาวะจากตารางที่ 4 นั้นมีค่าสูงถึง 6,473 cal/g โดยที่ความร้อนอื่นๆเช่น เชื้อเพลิงถ่านหินมีค่าความร้อนอยู่ 6,192 cal/g [6]

3.2 สมรรถนะของเชื้อเพลิง

ในการทดสอบได้ทราบถึงสมรรถนะของเชื้อเพลิงถ่านหุงต้มสำหรับสภาวะผสมกลีเซอรินที่อุณหภูมิสูงสุดของ ถ่าน หุงต้มใหม่ และอุณหภูมิใหม่ อัตราการเผาไหม้และประสิทธิภาพ ได้ค่าตามตารางที่ 5 และพฤติกรรมของการเผาไหม้เป็นดังรูปที่ 7 กราฟแสดงอุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดังรูปที่ 8 กราฟแสดงอัตราการเผาไหม้ดังรูปที่ 9 และกราฟแสดงประสิทธิภาพของถ่านที่ให้อุณหภูมิกับน้ำดังรูปที่ 10

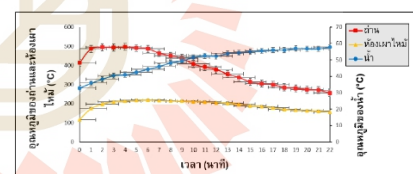
ตารางที่ 5 สมรรถนะของเชื้อเพลิง

อัตราส่วนผสม	T _{ถัง} (°C)	T _{ถัง} (°C)	T _{ถัง} ใหม่ (°C)	m _{ถัง} (g/min)	η _{ถัง} (%)
ถ่านอัดก้อน ทั่วไป	64	612	209	2.35	13.77
(สภาวะปรกติ)					
ผงถ่านหุงต้มสำหรับสภาวะ : กลีเซอริน					
100 : 0	62	426	221	2.50	9.28
95 : 5	56	501	262	2.80	10.60
90 : 10	58	397	269	2.31	10.60
85 : 15	61	483	307	3.43	10.91



รูปที่ 7 ก) พฤติกรรมของการเผาไหม้เริ่มต้น และ ข) พฤติกรรมของการเผาไหม้หลังทดลอง

รูปภาพที่ 7 แสดงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของวัสดุในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ (ภาพ ก) และช่วงหลังการเผาไหม้ (ภาพ ข) ผ่านการวัดและแสดงผลด้วยภาพถ่ายความร้อน จากUNI-T UT1120S Infrared Thermal Imager ซึ่งสามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงของการกระจายความร้อนได้อย่างชัดเจนในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้ (ภาพ ก) พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงสุดปรากฏเป็นสีแดงเข้ม กระจุกดุอยู่ที่บริเวณศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการเผาไหม้เฉพาะจุด โดยรอบของพื้นที่ดังกล่าวแสดงเป็นสีเขียวและน้ำเงิน ซึ่งบ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้เห็นได้ว่าในช่วงนี้การเผาไหม้ยังไม่กระจายตัวอย่างทั่วถึง และมีความรุนแรงจำกัดอยู่ในบริเวณที่เป็นศูนย์กลางของการจุดติดไฟเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงหลังการเผาไหม้ (ภาพ ข) สีแดงที่แสดงถึงอุณหภูมิสูงได้ขยายตัวและกระจายออกไปมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่เสถียรและทั่วถึงขึ้น ความร้อนกระจายตัวไปยังพื้นที่รอบนอก ทำให้พื้นที่สีเขียวและน้ำเงินลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด พฤติกรรมนี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของกระบวนการเผาไหม้จากช่วงเริ่มต้นไปสู่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น พฤติกรรมของการเผาไหม้เป็นคล้ายกันแบบที่ถูกอัตราส่วนผสม



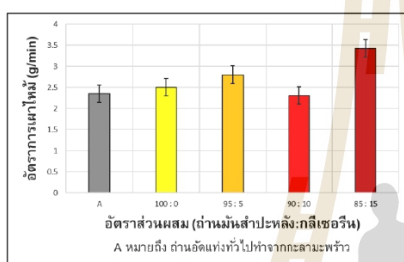
รูปที่ 8 อุณหภูมิการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ ถ่าน, หุงต้มใหม่ และน้ำ ตามเวลา โดยถ่านเผาไหม้ในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว 1 ถึง 2 นาที อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 500 °C ในช่วงต้น ก่อนลดลงเหลือประมาณ 260 °C เมื่อการเผาไหม้ผ่านไปประมาณ 220 °C ในช่วงกลาง การทดลองจากนั้นอุณหภูมิค่อยๆ ลดลง ขณะที่น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 33 °C จนถึง 60 °C ในช่วงท้าย กราฟนี้แสดงถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของถ่านผ่านหุงต้มใหม่



ไปสู่ น้ำ ซึ่งสะท้อนถึงการทำงานและประสิทธิภาพของระบบถ่ายเทความร้อน ซึ่งอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ มีแนวโน้มแบบนั้นเช่นกัน

ในการศึกษานี้จะเน้นการวิเคราะห์สมรรถนะของเชื้อเพลิงค่าเผาไหม้สำหรับหลังผสมกลีเซอรินอัดแท่ง ซึ่งอัตราการเผาไหม้ที่มีนัยสำคัญ ที่มีตัวแปรต้นมาจากการเปลี่ยนอัตราส่วนการเพิ่มกลีเซอริน ดังนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ Anova: Single Factor ว่าอัตราส่วนผสมกลีเซอรินนั้นมีผลต่ออัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหรือไม่ จากการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของกลีเซอรินมีผลต่ออัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นชัดเจนแสดงรูปที่ 9

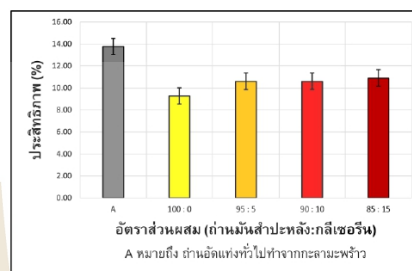


รูปที่ 9 อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 9 ที่แสดงให้เห็นถึงอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันระหว่างถ่านมันสำปะหลังและกลีเซอริน พบว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยกลุ่มที่ใช้ถ่านมันสำปะหลังล้วน 100:0 มีอัตราการเผาไหม้ต่ำสุดอยู่ที่ 2.50 g/min เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ผสมกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มกลีเซอรินในเชื้อเพลิงช่วยเพิ่มความสามารถในการเผาไหม้ เนื่องจากกลีเซอรินมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความชื้นและเพิ่มพลังงานเชื้อเพลิงอัตราการเผาไหม้เริ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในสัดส่วน 95:5 และ 90:10 และเพิ่มขึ้นสูงสุดในอัตราส่วน 85:15 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงที่สุดในกลุ่มที่ทดสอบ มีค่า 3.43 g/min อัตราการเพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นถึงบทบาทของกลีเซอรินที่มีส่วนช่วยเพิ่มพลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการเผาไหม้ได้จากการคำนวณความหนาแน่นจากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งทั่วไปทำจากกะลามะพร้าว มีอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพียง 2.35 g/min มีความหนาแน่นมากที่สุดอยู่ที่ 0.93 g/cm³ แต่มีอัตราการเผาไหม้น้อยที่สุด ซึ่งกล่าวได้ว่าความหนาแน่นที่มากของถ่านที่มากส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ช้าลง แต่สังเกตเห็นว่าอัตราส่วนผสม 90:10 นั้นมีแนวโน้มที่ไม่ควรจะเป็น เนื่องจากสาเหตุในกระบวนการผสมกลีเซอรินนั้นอาจมีความผิดพลาดในอัตราส่วนผสมหรือการกระจายตัวของกลีเซอรินไม่ทั่วถึง

ในการศึกษานี้จะเน้นการวิเคราะห์สมรรถนะของเชื้อเพลิงค่าเผาไหม้สำหรับหลังผสมกลีเซอรินอัดแท่ง ได้ทำการวิเคราะห์ Anova:

Single Factor ว่าอัตราส่วนผสมกลีเซอรินนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงหรือไม่ จากการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของกลีเซอริน ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของเชื้อเพลิง และค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพแสดงรูปที่ 10



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 10 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์นั้นรวมการสูญเสียความร้อนที่ตัวเตาและการสูญเสียความร้อนแก่บรรยากาศโดยรวมด้วย สามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของการผสมกลีเซอรินส่งผลต่อประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอย่างเห็นได้ชัดคือค่าประสิทธิภาพแปรผันตรงของการเพิ่มขึ้นของกลีเซอรินและแปรผกผันตรงกับค่าความร้อนที่แสดงในรูปที่ 6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยกราฟประกอบไปด้วย 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ ถ่านอัดแท่งชนิดทั่วไปทำจากกะลามะพร้าว และสัดส่วนผสม (ถ่านมันสำปะหลัง : กลีเซอริน) 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 ซึ่งแต่ละสัดส่วนมีประสิทธิภาพแตกต่างกันไปตามปริมาณของกลีเซอรินที่ผสมเข้าไปถ่านชนิดทั่วไปทำจากกะลามะพร้าว ซึ่งแสดงด้วยแท่งสีเทา มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น โดยอยู่ที่ 13.77 % ในขณะที่กลุ่มถ่านอัดแท่งจากถ่านมันสำปะหลังผสมกลีเซอริน 100:0 (แท่งสีเหลือง) ซึ่งไม่มีการผสมกลีเซอรินเลยมีประสิทธิภาพ 9.28 % ค่อยข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการผสมกลีเซอรินในสัดส่วน 95:5 (แท่งสีส้ม) ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10.60 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมกลีเซอรินในปริมาณเล็กน้อยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ เมื่อสัดส่วนของกลีเซอรินเพิ่มขึ้นเป็น 90:10 (แท่งสีแดงอ่อน) ประสิทธิภาพ 10.60 % และ 85:15 (แท่งสีแดงเข้ม) ประสิทธิภาพสูงที่สุดในกลุ่มถ่านมันสำปะหลังอัดแท่งอยู่ที่ 10.91 % สะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินนั้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เนื่องจากค่าความร้อนของกลีเซอรินมีค่าสูงกว่าถ่านจากถ่านมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนผสมของกลีเซอรินที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 - 10 % ซึ่งอัตราส่วนผสมนี้ไม่ทำให้เกิดมลพิษในการใช้งานถ่านอัดแท่งเกินระดับที่กำหนดเหมาะสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่ง [6] แต่สังเกตเห็นว่าถ่านอัดแท่งทั่วไป มีความหนาแน่นสูงและอัตราการเผาไหม้ต่ำส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพนั้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 4



4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาที่มุ่งเน้นหาสมรรถนะของถ่านหว่ามสำหรับเพลิงที่มีตัวแปรต้นคือการเปลี่ยนอัตราการผลิตขึ้นของกลีเซอริน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบ 4 อัตราส่วนผสม (ถ่านหว่ามสำหรับเพลิง : กลีเซอริน) คือ 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 มีถ่านหว่ามทั้งหมด 10 กิโลกรัม จากกลีเซอริน 5 กิโลกรัม นำมาเปรียบเทียบด้วย ได้ข้อสรุปว่าจากการทดสอบ ด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ทุกอัตราส่วนผสมโดยที่ค่าความร้อนสูงสุดของกลุ่ม ถ่านหว่ามสำหรับเพลิงอัตราส่วน 85:15 มีค่าที่ 5,984 cal/g และค่าความร้อนที่แปรผันตรงตามอัตราส่วนผสมกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้น สมรรถนะของเชื้อเพลิงสรุปได้ว่าอัตราการเผาไหม้ที่แปรผันผกผันกับความหนาแน่นโดย มีแนวโน้มของอัตราการเผาไหม้แปรผันตรง กับอัตราส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นของกลีเซอริน ค่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสูงสุดของกลุ่มถ่านหว่ามสำหรับเพลิงอัตราส่วน 85:15 มีค่าที่ 3.43 g/min และประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามการผสมเพิ่มขึ้นของกลีเซอริน โดยที่ค่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงสูงสุดของกลุ่มถ่านหว่ามสำหรับเพลิงอัตราส่วน 85:15 มีค่าที่ 10.91 % ในการศึกษาครั้งนี้ยังขาดการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นที่มีผลต่อสมรรถนะของเชื้อเพลิง และหาอัตราส่วนผสมของกลีเซอรินที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ความแตกต่างอย่างชัดเจนที่สุด และต้องคำนึงถึงการปล่อยมลพิษของการเผาไหม้กลีเซอริน ในการศึกษาต่อไปจะทำการศึกษารายละเอียดที่กล่าวข้างต้น

ในการศึกษาต่อไปจะพิจารณาแนวทางการศึกษาอุณหภูมิการติดไฟมีความสัมพันธ์อย่างไรกับการเพิ่มอัตราส่วนผสมของกลีเซอริน และการเพิ่มกลีเซอรินให้มากขึ้นรวมถึงหาทางเพิ่มความหนาแน่นของถ่านให้สูงขึ้น ทั้งนี้จะต้องพิจารณาควบคู่กับค่ามลพิษที่อาจเพิ่มสูงขึ้น โดยจะต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานในระดับครัวเรือนอย่างปลอดภัย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] EIA (U.S. Energy Information Administration), Monthly Energy Review January 2018. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf>. [Accessed: Jan. 25, 2018].
- [2] Yoddanem, T., & Yotwinyuwong, S. (2020). DEVELOPMENT OF CHARCOAL BRIQUETTE FROM THE CANE LEAVES AND THE BAGASSE TO COMMUNITY ENTERPRISE. Journal of Energy and Environment Technology, 7(2), 12-24.
- [3] McKendry, P. (2001). Energy production from biomass (part 1) overview of biomass. Bioresource Technology, 83(2002), 37-46.

- [4] Bernardes, F. F., Romanelli, T. L., Pereira, A. K. S., Cupertino, G. F. M., Fernandes, M. A., Brito, J. O., de Souza, E. C., Saloni, D., & Dias Júnior, A. F. (2023). Energy Performance of Different Charcoal Production Systems. Energies, 16(21).
- [5] Srimoon, R., Darapong, P., & Kanavong, V. (2014). Extraction of Alexandrian Laurel (Calophyllum inophyllum L.) Seed Oil for Biodiesel Production. RMUTSB Acad. J., 2(2), 131-138.
- [6] Potip, S., & Wongwuttanasatian, T. (2018). Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. Combustion Science and Technology, 190(11), 2030-2043.
- [7] Auntsong, P., & Maneechot, R. (2019). THE CONSTRUCTURE AND EFFICIENCY EVALUATE OF CHARCOAL BRIQUETTE MACHINE FROM CASSIA PODS. UDON THANI RAJABHAT UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCES AND TECHNOLOGY, 7(2), 147-157.
- [8] อุษาบริสุทธิ์, ป., & มหายนันท์, ช. (2548). การศึกษาการอัดถ่านหว่ามสำหรับเพลิงโดยใช้เครื่องอัดถ่านแบบแม่แรงไฮดรอลิก. วิศวกรรมสาร, 19(56), 32-40.
- [9] Pukdee-asa, M., & Pimpan, P. (2022). Fuel Briquettes from Waste of Lemon Grass and Banana Peel. Nakhon Sawan Rajabhat University Journal of Science and Technology, 14(19), 107-121.
- [10] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นถ่านเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. โครงการพัฒนาศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียประจำปี 2554 การนำร่องการใช้ประโยชน์ของเสีย. สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม.
- [11] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2562). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547. กระทรวงอุตสาหกรรม.

ค.3 ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

2026
March.
27-29
Osaka, Japan



ISEAS
 8th International Symposium on
 Engineering and Applied Science



Acceptance Letter

International Symposium on Engineering and Applied Science
 March 27-29, 2026 Osaka, Japan

Paper ID: ISEAS-01791
 Title: Investigation of Parameters Affecting the Quality of Glycerin-Based Charcoal Briquettes
 Dear Worawut Samenang , Krawee Treeamnuuk , Tawarat Treeamnuuk , Wasawat Thingborirak

We sincerely appreciate your paper submission. On conclusion of the peer-reviewed process, we are pleased to inform you that your paper is accepted for Oral presentation at International Symposium on Engineering and Applied Science (ISEAS) in Osaka, Japan. Decisions were made based on a double-blind review process. The exact time and room of your presentation session will be specified in the ISEAS Conference Program online at <https://prohef2010.org/iseas/> at the mid of February.

If you have any further questions, please do not hesitate to contact the secretariat of ISEAS 2026 by sending your email to iseas@iseas.org with your manuscript ID number listed above on all communications. Again, congratulations on the acceptance of your paper. On behalf of the Program Committee, we look forward to your full participation in the ISEAS 2026 Conference.

Yours Sincerely,
 The Program Committee of ISEAS
 Conference Venue :
 Osaka International Convention Center
 5-3-51, Nakanoshima Kita-ku, Osaka 530-0005 Japan



Investigation of Parameters Affecting the Quality of Glycerin-Based Charcoal Briquettes

Worawut Samenang^a, Krawee Treeamnuk^a Tawarat Treeamnuk^{b,*} and
Wasawat Thingborirak^a

^a School of Mechanical Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
E-mail address: worawutsame@gmail.com
E-mail address: krawee@sut.ac.th

^b School of Agricultural Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*corresponding author E-mail address: tawarat@sut.ac.th

Abstract

This research investigates parameters affecting the quality of glycerin-based charcoal briquettes, focusing on the mass mixing ratio of charcoal to glycerin and the compression pressure during briquetting at ratios of 100:0, 80:20, 75:25, and 70:30, and pressures of 120, 150, and 180 kg/cm². Briquette quality was evaluated by moisture content, density, compressive strength, and heating value. The 70:30 ratio at 180 kg/cm² gave the highest heating value (6,164 cal/g), while 100:0 at the same pressure showed the highest compressive strength (9.96 kg/cm²). The briquettes met CPS 238/2004, DIN EN ISO 17225-3, and ISO 17225-1:2021 standards and aligned with recent studies. Factor analysis showed that the mixing ratio primarily affected density and heating value, while compression pressure influenced strength, with moisture inversely related. ANN sensitivity analysis confirmed the mixing ratio as the key factor, whereas compression pressure had a minor effect. Overall, suitable mixing ratios and compression pressures are crucial for producing high-quality briquettes, and predictive modeling offers potential for process optimization.

Keywords: Briquette, Glycerin, Moisture, Compressive strength, Heating value

1. Background/ Objectives and Goals

In recent decades, the world has been facing a shortage of fuel resources, particularly fossil fuels, which are limited and rapidly depleting due to excessive consumption (International Energy Agency, 2021). Currently, fossil fuels still account for about 80% of global energy production, but this share is expected to decline to 73% by 2030,

reflecting an ongoing energy transition (Investopedia, 2023). Moreover, the combustion of fossil fuels remains the primary source of greenhouse gas emissions, with the electricity and heat production sectors responsible for approximately 34% of total emissions in 2019 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), which is a major factor accelerating global warming and environmental crises.

The transition to sustainable renewable energy is inevitable, particularly through the use of locally available biomass fuels, which are low-cost and environmentally friendly. Briquette fuel is an attractive option because it offers high energy output, long combustion duration, and low smoke emissions, making it suitable for both household and small-scale industrial applications (Sotannde et al., 2010). Notably, economic crops such as cassava generate substantial residues after cultivation, harvesting, and processing, which can be utilized as fuel. These residues include peels from root processing, as well as stalks and rhizomes left in the fields. The rhizome is the hard part of the stem attached to the fresh root, and none of these three components are suitable for animal feed (Khempilak & Kongto, 2022). However, cassava rhizomes have potential as biomass fuel for charcoal production, which can subsequently be processed into briquettes. Another promising residue is glycerin, a by-product of biodiesel production (Srimoon et al., 2014). Although glycerin has a high calorific value, it remains underutilized. Mixing glycerin with biomass to enhance the heating value and improve the combustion performance of briquette fuel is therefore a technically and economically feasible approach.

This study therefore focuses on investigating the physical and thermal properties of biomass briquettes made from cassava rhizomes, mixed with glycerin at various ratios, and compressed under different pressures. The results aim to determine the optimal mixing ratio for producing briquettes with suitable moisture content, density, heating value, and compressive strength, making them a viable alternative energy source. The study evaluates the results in accordance with CPS No. 238/2004 (Thai Industrial Standards Institute, 2019) and international standards, including DIN EN ISO 17225-3 (Deutsches Institut fuer Normung, 2023) and ISO 17225-1:2021 (International Organization for Standardization, 2021). This approach ensures that the produced briquettes meet quality standards comparable at the international level and supports the development and advancement of biomass briquette production technology for economic and environmental benefits.

2. Methods

2.1 Briquette Charcoal Production

Cassava rhizomes were converted into charcoal, then ground into finer particles and sieved through a 30-mesh screen for use in briquette formation. Glycerin was obtained via transesterification, in which used palm oil from frying (Srimoon et al., 2014), as illustrated in Figure 1. Cassava starch was dissolved in room-temperature water and then heated under controlled conditions between 80°C and 100°C to serve as a binder free from harmful contaminants (Pukdee-asa & Pimpan, 2022). The charcoal powder was then mixed with glycerin, water, and cassava starch at a mass ratio of 1:1:0.15 (Usuborisut & Mahayosanon, 2005) until a homogeneous mixture was achieved. The mixing ratios in this study presented in Table 1

Table 1

Mixing ratios of cassava rhizome charcoal and glycerin

Number	Cassava rhizome charcoal : Glycerin (mass ratio)
1	100 : 0
2	80 : 20
3	75 : 25
4	70 : 30

Figure 1

On the left is cassava rhizome charcoal powder, and on the right is glycerin



Figure 2

Batch-type briquetting machine



Each mixing ratio was massed at 50 g for all mixing ratios. The briquettes were then compressed under three pressure levels: 120, 150, and 180 kg/cm². The resulting briquettes were dried in a hot-air oven at 60 °C for 48 hours. The briquette pressing machine powered by a 20 ton hydraulic press force. The mold has a diameter of 54 mm and can produce 8 briquettes per batch, as shown in Figure 2.

2.2 Properties of Charcoal Briquettes

2.2.1 Moisture content

The moisture content was analyzed according to ASTM D 3173-11 (2017). The samples were uniformly heated in a hot-air oven at 104–110 °C for 24 hours to evaporate all moisture. The moisture content of the samples was calculated using the following equation 1.

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

Where M is the moisture content percentage (%), W_1 is the mass of the sample before drying (g) and W_2 is the mass of the sample after drying (g)

2.2.2 Bulk density

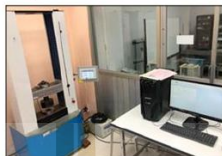
The values were recorded and used to calculate the property according to the following equation 2 in accordance with ASTM D2974-14 (2020).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Where ρ is the density of the briquette (g/cm³), M is the mass of the briquette (g) and V is the volume of the briquette (cm³)

2.2.3 Compressive strength

The compressive strength of the briquettes was evaluated to determine their ability to resist crushing or permanent deformation. Each briquette was subjected to a continuous vertical load, using a Universal Testing Machine (UTM) TTR/THAI Model MUL-125 with a capacity of 100 kN, as shown in Figure 3. The test was conducted in accordance with ISO 17831-2:2015.

Figure 3*Universal Testing Machine (UTM) TTR/THAI Model MUL-125***2.2.4 Lower Heating Value (LHV)**

The heating value represents the amount of heat released when the fuel briquette is completely combusted, expressed in calories per gram (cal/g) of fuel. It was measured using an Automatic Calorimeter (Bomb Calorimeter) Model IKA/C5000 PKG, as shown in Figure 4, following ASTM D5865 (2019).

2.3 Data analysis

The test results were analyzed using Principal Component Analysis (PCA) (Jolliffe & Cadima, 2016) and Artificial Neural Network (ANN) (Haykin, 2009; IBM Corp., 2020) to identify the factors influencing the properties of the produced briquettes.

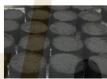
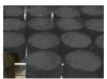
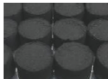
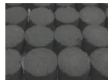
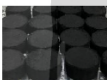
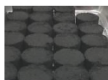
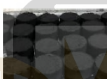
Figure 4*Automatic calorimeter (Bomb cal) Model IKA / C5000 PKG***3. Results****3.1 Characteristics and Dimensions of Charcoal Briquettes**

The characteristics of the briquettes are summarized in Table 2. The results indicate that both the mixing ratio and compression pressure significantly influence the briquette shape and structural integrity. Briquettes produced with a 100:0 ratio (no glycerin) were dense and mechanically strong, maintaining stable shapes even under low compression pressures due to the effective binding properties of cassava starch. Increasing the glycerin content reduced bonding efficiency, as the oily nature of glycerin hindered adhesion between particles, thereby decreasing briquette strength. Briquettes with mixing ratios of 80:20, 75:25, and 70:30 exhibited smoother and glossier surfaces, attributed to glycerin's surface-enhancing effect, with the 80:20

ratio identified as the most suitable for production. In terms of compression pressure, 180 kg/cm² was found excessive, causing bulging at the top, while 150 kg/cm² and 120 kg/cm² showed no significant differences. However, the 150 kg/cm² pressure yielded briquettes with the best combination of strength and appearance. The characteristics observed across all mixing ratios and compression pressures were consistent with the requirements specified in CPS 238/2004 and DIN EN ISO 17225-3 standards.

Table 2

Characteristics of briquettes from cassava rhizome charcoal mixed with glycerin

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)		
	180	150	120
100 : 0			
80 : 20			
75 : 25			
70 : 30			

These standards specify that briquettes should exhibit uniform size, consistent shape, and an even black color, with minor cracking permissible. Visual observation confirmed that shape and uniformity improved when both glycerin ratio and compression pressure were maintained within their optimal ranges. Compression pressure had no significant effect on briquette diameter, as the 54 mm mold governed the cross-sectional size. However, the mixing ratio and compression pressure significantly affected briquette length; increasing the glycerin ratio at a constant pressure produced shorter briquettes due to the resistance of solid charcoal particles to compression. According to DIN EN ISO 17225-3, the diameter, width, and length of briquettes must be clearly specified to ensure quality consistency.

3.2 Physical properties

Table 3, the physical properties of briquettes at various ratios showed average moisture contents ranging from 0.968% to 2.579%, which fall within the limits specified by ISO 17225-1:2021 (not exceeding 15%) and CPS 238/2004 (not exceeding 8%), indicating that the produced briquettes have suitable moisture levels for combustion and storage.

Table 3

Physical properties of briquettes made from cassava rhizome charcoal mixed with glycerin

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Moisture content (Mean $\pm$ SD) (%)	Bulk density (Mean $\pm$ SD) (g/cm ³)	Compressive strength (Mean $\pm$ SD) (kg/cm ²)
100 : 0	180	0.968 $\pm$ 0.218 ^a	0.432 $\pm$ 0.003 ^{ab}	9.96 $\pm$ 0.52 ^f
	150	1.001 $\pm$ 0.217 ^a	0.428 $\pm$ 0.004 ^a	8.59 $\pm$ 0.89 ^{ef}
	120	1.164 $\pm$ 0.101 ^{ab}	0.416 $\pm$ 0.004 ^a	6.18 $\pm$ 1.68 ^d
80 : 20	180	1.622 $\pm$ 0.317 ^{abc}	0.469 $\pm$ 0.007 ^{def}	4.11 $\pm$ 0.12 ^{bc}
	150	1.748 $\pm$ 0.338 ^{bcd}	0.464 $\pm$ 0.011 ^{cde}	3.00 $\pm$ 0.68 ^{ab}
	120	1.505 $\pm$ 0.233 ^{abc}	0.448 $\pm$ 0.010 ^{bc}	1.80 $\pm$ 0.40 ^a
75 : 25	180	2.118 $\pm$ 0.284 ^{cde}	0.485 $\pm$ 0.015 ^{fg}	4.37 $\pm$ 1.03 ^{bc}
	150	2.247 $\pm$ 0.298 ^{cde}	0.477 $\pm$ 0.005 ^{ef}	5.60 $\pm$ 0.96 ^{cd}
	120	2.382 $\pm$ 0.115 ^{de}	0.454 $\pm$ 0.011 ^{cd}	5.51 $\pm$ 1.13 ^{cd}
70 : 30	180	2.032 $\pm$ 1.030 ^{cde}	0.514 $\pm$ 0.008 ^h	7.90 $\pm$ 0.80 ^e
	150	2.579 $\pm$ 0.353 ^e	0.507 $\pm$ 0.017 ^h	4.84 $\pm$ 0.44 ^{cd}
	120	2.110 $\pm$ 0.377 ^{cde}	0.497 $\pm$ 0.014 ^{gh}	4.62 $\pm$ 1.11 ^{bcd}

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a–h) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on DMRT test.

It was observed that increasing glycerin tended to slightly raise moisture content, particularly at the 70:30 ratio which exhibited the highest moisture of 2.579% at a compaction pressure of 150 kg/cm². The bulk density ranged from 0.416 to 0.514 g/cm³, below the limit of 0.8 g/cm³ reported by Mahayosanon (2005). Regarding compressive strength, only the 100:0 ratio at compaction pressures of 180 and 150 kg/cm² reached 9.96 and 8.59 kg/cm², respectively, which lie within the 8–15 kg/cm² range reported by prior studies (Sen et al., 2016). These results indicate that while adding glycerin increases density, it clearly reduces compressive strength; therefore, the 70:30 ratio at 180 kg/cm², which achieved a compressive strength of 7.90 kg/cm²

close to values reported in the literature is considered the most suitable condition for producing biomass briquettes with physical properties consistent with standards and previous research.

3.3 Thermal properties

As shown in Table 4, among the raw materials, glycerin exhibited the highest LHV (7,612 cal/g), followed by cassava rhizome charcoal (5,947 cal/g), while cassava starch had the lowest value (3,563 cal/g). This trend reflects the inherent properties of glycerin, an organic compound with oil-like characteristics that make it highly flammable and energy-dense upon combustion. Although cassava starch functions effectively as a binder, its low energy content suggests that it should be used sparingly to avoid reducing the overall fuel quality.

Table 4

Lower heating value of briquettes made from cassava rhizome charcoal mixed with glycerin

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Lower Heating Value; LHV (cal/g)	Standard	
			ISO 17225-1:2021 (cal/g)	CPS 238/2004 (cal/g)
Raw materials	Cassava rhizome charcoal powder	5,947	3,800	5,000
	glycerin	7,612		
	cassava starch	3,563		
100 : 0	180	5,570		
	150	5,714		
	120	5,690		
80 : 20	180	5,763		
	150	5,910		
	120	5,886		
75 : 25	180	6,033		
	150	5,800		
	120	5,722		
70 : 30	180	6,164		
	150	6,050		
	120	6,062		

The briquettes produced in this study exhibited LHV values exceeding the minimum requirements specified in ISO 17225-1:2021 ($\geq 3,800$ cal/g) and CPS 238/2004

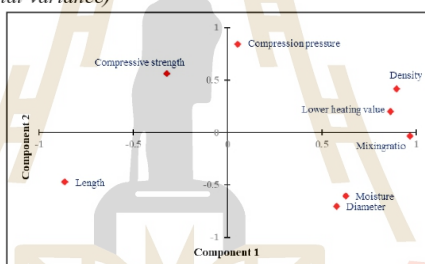
($\geq 5,000$ cal/g), regardless of the applied compaction pressure. This clearly indicates that the briquettes possess good fuel quality and are suitable for use as solid biofuels. The highest LHV of 6,164 cal/g was obtained from the 70:30 mixture under a compression pressure of 180 kg/cm², followed closely by the 75:25 ratio. This trend demonstrates that increasing the proportion of glycerin—an energy-dense component—significantly enhances the thermal energy content of the briquettes. Although compaction pressure influences physical properties such as density and compressive strength, its effect on LHV is relatively minor, particularly in formulations containing glycerin. In other words, the heating value of the briquettes is primarily governed by the raw material mixing ratio rather than by compaction pressure.

3.4 Data analysis

3.4.1 Principal Component Analysis: PCA

Figure 5

Component Plot of Charcoal Briquette Properties (the 1st and 2nd components explain 79.966% of the total variance)



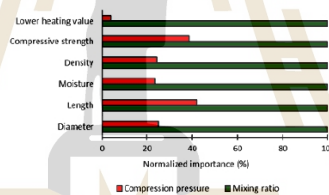
The component plot revealed a positive correlation between the mixing ratio, density, and Lower Heating Value (LHV). As the proportion of glycerin increased, both density and heating value tended to rise. In contrast, briquette length exhibited a negative correlation with the mixing ratio and density, indicating that higher glycerin content resulted in shorter briquettes. Compression pressure was strongly correlated with compressive strength, suggesting that increased compaction directly enhances the briquettes' resistance to deformation. It also showed a negative correlation with moisture content and diameter, implying that higher compaction pressure reduces both parameters. Overall, these findings indicate that the mixing ratio is the principal factor influencing the thermal energy properties and density of the briquettes, while compression pressure primarily governs their mechanical strength and structural integrity.

3.4.2 Artificial Neural Network: ANN

The analysis of independent variables affecting briquette properties (Figure 6) demonstrated that the mixing ratio is the dominant factor governing all examined characteristics, while compression pressure has a secondary influence. Normalized importance analysis revealed that the mixing ratio had the highest contribution (100%) for all properties, whereas compression pressure accounted for only 25.1%, 42.1%, 23.5%, 24.4%, 38.8%, and 3.8% for diameter, length, moisture content, density, compressive strength, and Lower Heating Value (LHV), respectively. These results indicate that the mixing ratio primarily determines the briquette's geometry, moisture retention, density, strength, and calorific value, whereas compression pressure mainly enhances compaction. The consistency between the Artificial Neural Network (ANN) and Principal Component Analysis (PCA) outcomes confirms that the mixing ratio is the key parameter governing both thermal and mechanical performance, and should be prioritized in optimizing briquette production.

Figure 6

Normalized Importance of Compression Pressure and Mixing Ratio on Briquette Properties



4. Conclusion

The study revealed that a compression pressure of 180 kg/cm² and a mixing ratio of 70:30 produced the highest LHV of 6,164 cal/g, exceeding the standards specified in ISO 17225-1:2021 and CPS 238/2547. However, excessive glycerin content reduced mechanical strength despite improving surface smoothness and increasing the heating value. The optimal compression pressure was determined to be 150 kg/cm², yielding briquettes with high strength and good structural integrity. All briquette samples exhibited moisture content and density within acceptable standard limits. Results from both Principal Component Analysis (PCA) and Artificial Neural Network (ANN) confirmed that the mixing ratio is the primary factor influencing the physical and thermal characteristics—particularly density and heating value—whereas compression pressure plays a secondary role in enhancing strength and structural

cohesion. The variable influence analysis provides practical guidance for production optimization: increasing glycerin content improves calorific value, while higher compression pressure and lower glycerin content enhance mechanical strength and handling performance. These findings offer valuable insights for developing high-quality, high-performance briquette fuels.

5. References

- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke (ASTM D3173-11)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard test method for gross calorific value of coal and coke (ASTM D5865)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils (ASTM D2974-14)*. ASTM International.
- Deutsches Institut fuer Normung. (2023). *Certification scheme: Wood briquettes according to DIN EN ISO 17225-3 (May 2023 edition)*.
- Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines* (3rd ed.). Pearson Education.
- IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics algorithms*. IBM Knowledge Center.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- International Energy Agency. (2021). *World energy outlook 2021*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 17831-2:2015 – Solid biofuels — Determination of mechanical durability of pellets and briquettes — Part 2: Briquettes*. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2021). *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements (ISO 17225-1:2021)*. International Organization for Standardization.
- Investopedia. (2023). *Oil, gas and coal demand could peak by 2030, IEA says*. <https://www.investopedia.com/oil-gas-and-coal-demand-could-peak-by-2030-idea-says-8374365>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

- Khempilak, J., & Kongto, P. (2022). Torrefaction of cassava rhizomes for high-quality solid biofuel production. *Journal of Applied Research and Development in Science and Technology (JARST)*, 21(1), 88–94.
- Mahayosanon, T. (2005). *A study on the design and construction of a briquette production machine for household-level production* [Unpublished master's thesis]. Kasetsart University.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Pukdee-asa, M., & Pimpan, P. (2022). Fuel briquettes from waste of lemon grass and banana peel. *Nakhon Sawan Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 14(19), 107–121.
- Sen, R., Wiwatpanyaporn, S., & Annachatre, A. P. (2016). Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, 17(2), 158–174. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2016.076750>
- Sotannde, O. A., Oluyegbe, A. O., & Abah, G. B. (2010). Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of *Azadirachta indica*. *Journal of Forestry Research*, 21(1), 63–67. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0010-6>
- Srimoon, R., Darapong, P., & Kanavong, V. (2014). Extraction of Alexandrian laurel (*Calophyllum inophyllum* L.) seed oil for biodiesel production. *RMUTSB Academic Journal*, 2(2), 131–138.
- Thai Industrial Standards Institute. (2019). *Community product standard: Charcoal briquettes (CPS 238/2004)*. Ministry of Industry.
- Usuborisut, P., & Mahayosanon, T. (2005). Study on cassava rhizome charcoal briquetting using a hydraulic press machine. *Kasetsart Journal of Engineering*, 19(56), 32–40.



ค.4 ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ TCI กลุ่ม 1 ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน
คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

ขอรับรองว่าบทความ

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) สมบัติของถ่านอัดแท่งจากส่วนผสมผงมันสำปะหลังและกลีเซอริน

(ภาษาอังกฤษ) Properties of briquettes from a mixture of cassava rhizomes and glycerin

โดย วรวิทย์ สมินาง เทวรัตน์ ตรีอำนาจ กระจวี ตรีอำนาจ และอภิสิทธิ์ ภัคดีแก้ว

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และตีพิมพ์ใน
วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน
ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม - เมษายน 2569

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย สิทธิวงษ์)

บรรณาธิการ วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมบัติของถ่านอัดแท่งจากส่วนผสมเหง้ามันสำปะหลังและกลีเซอริน

Properties of briquettes from a mixture of cassava rhizomes and glycerin

วรวุฒิ สมินาง¹ เทวรัตน์ ตริอำนาจ² กระวี ตริอำนาจ^{1*} และอภิสิทธิ์ ภักดีแก้ว³Worawut Samenang¹, Tawarat Treeamnu², Krawee Treeamnu^{1*}and Aphisik Pakdeekaew³¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา¹Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province²สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา²Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani Province

*Corresponding Author E-mail Address : krawee@sut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างผงถ่านจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอริน และความดันในการอัดที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่ง ศึกษา 2 ปัจจัยคือ อัตราส่วนผสมผงถ่านเหง้ามันสำปะหลังและกลีเซอริน 100:0, 80:20, 75:25 และ 70:30 และความดันการอัด 120, 150 และ 180 kg/cm² วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ความชื้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกดอัด และค่าพลังงานความร้อน ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วน 70:30 ที่ระดับความดันการอัด 180 kg/cm² ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 6,164 cal/g ขณะที่อัตราส่วน 100:0 ที่ระดับความดันการอัด 180 kg/cm² มีความแข็งแรงต่อแรงกดสูงสุดถึง 9.96 kg/cm² (ที่ระดับความชื้น 95%) การเพิ่มกลีเซอรินช่วยเพิ่มค่าพลังงานความร้อนและความหนาแน่น แต่ทำให้ความแข็งแรงของแท่งถ่านลดลง ส่วนระดับความดันการอัด 150 kg/cm² ให้ถ่านที่มีลักษณะดีที่สุด ลักษณะทางกายภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน CPS 238/2547 และ DIN EN ISO 17225-3 ทั้งนี้ ถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้มีค่าความชื้นต่ำอยู่ในช่วงมาตรฐาน ISO 17225-1:2021 และ CPS 238/2547 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับความดันในการอัดที่เหมาะสม มีความสำคัญต่อการผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวลคุณภาพสูงที่ตรงตามมาตรฐานสากล

คำสำคัญ: เหง้ามันสำปะหลัง กลีเซอริน ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงกด ค่าความร้อน

Abstract

This research aimed to investigate the effects of the mixing ratio between cassava rhizome charcoal powder and glycerin, and the compression pressure, on the physical and thermal properties of charcoal briquettes. Two factors were studied: the mixing ratios of cassava rhizome charcoal powder to glycerin (100:0, 80:20, 75:25, and 70:30) and compression pressures of 120, 150, and 180 kg/cm². The analyzed properties included physical characteristics, moisture content, density, compressive strength, and heating value. The results indicated that the 70:30 ratio at a compression pressure of 180 kg/cm² provided the highest heating value of 6,164 cal/g. In contrast, the 100:0 ratio at 180 kg/cm² exhibited the highest compressive strength of 9.96 kg/cm² (at a 95% confidence level). Increasing the glycerin content enhanced the heating value and density but reduced the mechanical strength of the briquettes. A compression pressure of 150 kg/cm² produced briquettes with the most desirable overall physical characteristics. The physical properties complied with the requirements of CPS 238/2547 and DIN EN ISO 17225-3 standards. Moreover, the produced briquettes had low moisture content within the limits specified by ISO 17225-1:2021 and CPS 238/2547. The findings demonstrate that an appropriate mixing ratio combined with a suitable compression pressure is crucial for producing high-quality biomass charcoal briquettes that meet international standards.

Keywords: Cassava rhizome, Glycerin, Bulk density, Compressive strength, Heating value

บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาการขยายตัวของสังคมและจำนวนประชากร รวมถึงการเข้าสู่สังคมผู้สูงวัยส่งผลให้การบริโภคพลังงานเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันได้ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นตามอัตราการขยายตัวของประชากร ซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตและสุขภาพของประชาชน ความต้องการพลังงานหลักประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าที่พึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 80 % ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ก่อให้เกิดการปล่อยมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อมในระดับค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบอื่นๆ (Bunyananid et al., 2016)

การเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานทดแทนที่ยั่งยืนเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งมีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ถ่านอัดแท่ง (Briquette fuel) จัดเป็นหนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้พลังงานสูง เผาไหม้ได้นาน และปล่อยควันน้อย เหมาะสำหรับการใช้งานทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (Sotannide et al., 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชเศรษฐกิจประเภทมันสำปะหลังภายหลังกระบวนการเพาะปลูก เก็บเกี่ยว และแปรรูป มักก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งในส่วนที่เกิดจากการกระบวนการบดหัวมัน มันคือ เปลือก (Peels) และส่วนที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูก เช่น ลำต้น (Stalk) และเหง้า (Rhizome) โดยเหง้าเป็นส่วนหนึ่งของลำต้นแข็งที่ติดกับหัวมันสด ซึ่งทั้งสามส่วนนี้ไม่สามารถใช้ประโยชน์หรือแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ได้ (Khempilak & Kongto, 2022) เกษตรกรจึงมักทิ้งลำต้นและเหง้าไว้ในพื้นที่ปลูกและเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ แต่เหง้ามันสำปะหลังมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบถ่านเนื่องจากมีเนื้อที่แข็งและค่าความร้อนที่สูง ซึ่งเหง้ามันสำปะหลัง

แห้งมีค่าความร้อนระหว่าง 18.5–23.7 MJ/kg (Jongluempiti & Tangchaichit, 2012) ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจาก ผักหวานเทศ 22.59 MJ/kg ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับถ่านอัดแท่งจากวัสดุชนิดอื่น ๆ ในเงื่อนไขเดียวกันและ เงื่อนไขที่ใกล้เคียงกัน เช่น ผงถ่านไม้ 28.88 MJ/kg กะลามะพร้าว 25.5 MJ/kg ชังข้าวโพด 21.8 MJ/kg แกลบ 17.4 MJ/kg และใบเสเดาแห้ง 12.68 MJ/kg (Unthisong & Maneechot, 2019) ในกระบวนการไพโรไลซิสคือการแปลงชีวมวลเป็นถ่าน โดยการให้ความร้อนในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเผาไหม้ (Bernardes et al., 2023) และสามารถประยุกต์เป็นถ่านอัดแท่งได้ อีกหนึ่งวัสดุเหลือใช้ที่น่าสนใจคือ กลิเซอริน ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก กระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Srimoon et al., 2014) แม้ว่ากลิเซอรินจะมีค่าความร้อนที่สูง เนื่องจากกลิเซอรินมีคุณสมบัติ เป็นน้ำมันเพราะเป็นสารอินทรีย์ที่ให้พลังงานเชิงความร้อนสูง มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และอยู่ในสภาพ ของเหลวที่สามารถเผาไหม้ได้ แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ การนำกลิเซอรินมาผสมกับวัสดุชีวมวลเพื่อเพิ่มค่าความ ร้อนและปรับปรุงสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง จึงเป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐกิจ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ยังขาดการวิจัยเกี่ยวกับถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกับกลิเซอริน ซึ่งการผสมกลิเซอรินนี้สามารถช่วยเพิ่มค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งให้เพิ่มสูงขึ้นได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาคุณสมบัติ ทางกายภาพและความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งถูกนำมาผสมกับ กลิเซอรินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและความดันในการกดอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่งที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยในการ กำหนดอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งที่มีค่า ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และความแข็งแรง ต่อแรงกดที่ดี เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก ช่วยในการพัฒนาและเสริมสร้างเทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่ง จากชีวมวลเพื่อประโยชน์ทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. ถ่านเห้งมันสำปะหลัง

เตรียมถ่านเห้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยให้ความร้อนกับเห้งมันสำปะหลังปริมาณ 20 kg ในสภาวะ ที่ไม่มีออกซิเจน ด้วยอุณหภูมิประมาณ 300 °C ถึง 700 °C เป็นเวลา 2 hr. (Bernardes et al., 2023) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ เห้งมันสำปะหลังที่ได้ในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นเศษเหลือทางการเกษตร โดยมีกระบวนการผลิตถ่านเห้งมันสำปะหลัง ดัง Figure 1



(A) Selection of cassava rhizomes (B) Pyrolysis process (C) Cassava rhizome charcoal

Figure 1 Cassava rhizome charcoal production process.

2. การสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

ใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วจากการทอดมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วน 0.5% โดยมวลต่อน้ำมันปาล์มและละลายในเมทานอลที่มีปริมาณ 25% โดยมวลของน้ำมันปาล์ม หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายนี้ลง

ในน้ำมันที่ถูกอุ่นไว้ล่วงหน้า ปิดภาชนะและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60°C พร้อมทั้งกวนส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 min. เมื่อครบเวลาแล้วจึงปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 3 hr. เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน จากนั้นจึงแยกชั้นกลีเซอรินที่อยู่ด้านล่างออกไป (Srimoon et al., 2014) ไบโอดีเซลและกลีเซอรินที่ได้แสดง Figure 2

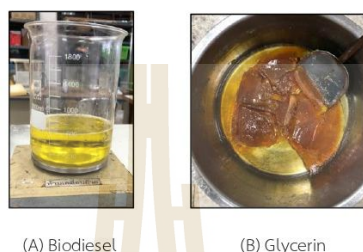


Figure 2 Products from the transesterification reaction.

3. เครื่องอัดแท่งถ่าน

เครื่องอัดแท่งถ่านในงานวิจัยนี้มีการทำงานแบบเป็นงวด (Batch type) โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกขนาด 20 ton เป็นต้นกำลังในการอัด ดัดตั้งเกจวัดความดันน้ำมันเพื่อใช้ในการควบคุมความดันระหว่างกระบวนการกดอัด นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 6 ton สำหรับยกฐานแม่พิมพ์อัดถ่านขึ้น ขนาดของแม่พิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 mm. สามารถอัดแท่งถ่านได้ขนาด 8 แท่ง ดังแสดงใน Figure 3

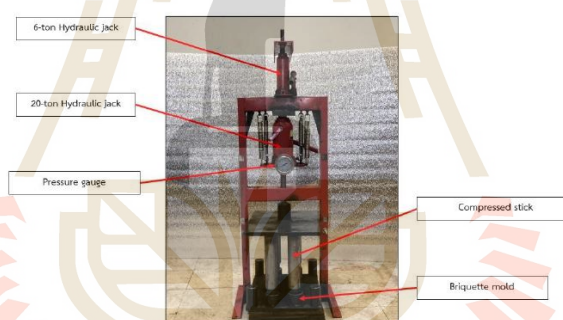


Figure 3 Batch-type briquetting machine.

4. กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง

ในกระบวนการผลิตถ่านเหล่านี้สำหรับอัดแท่งมีวิธีดังต่อไปนี้

4.1 บดถ่านห้ำมันสำหรับให้มีอนุภาคเล็กลงจากนั้นร่อนถ่านผ่านตะแกรงเบอร์ 30 mesh เพื่อใช้สำหรับอัดขึ้นรูปแท่งถ่าน ดัง Figure 4



Figure 4 Charcoal powder derived from cassava rhizomes.

4.2 ละลายแป้งมันสำปะหลังในน้ำอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อนควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 80°C ถึง 100°C ผสมผงถ่านหมักมันสำปะหลังรวมกลีเซอริน:น้ำ:แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วนมวล 1:1:0.15 (Usaborisut & Mahayosanon, 2005) โดยที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังและน้ำคงที่ จนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแป้งมันสำปะหลังถูกใช้เป็นตัวยึดประสานที่ไม่มีสารอันตรายปนเปื้อน (Pukdee-asa & Pimpan, 2022) อัตราส่วนผสมถ่านหมักมันสำปะหลังและกลีเซอรินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Mixing ratios of cassava rhizome charcoal and glycerin

Number	Cassava rhizome charcoal: Glycerin (Mass ratio)
1	100:0
2	80:20
3	75:25
4	70:30

Note: The maximum glycerin mixing ratio that can form briquettes is 30%.

4.3 ซังมวลอัดขึ้นรูปก้อนละ 50 g ในทุกอัตราส่วนผสม ให้ความดันในการกดอัด 3 ระดับ ดังนี้ 120 kg/cm^2 150 kg/cm^2 และ 180 kg/cm^2 ตามผลการทดสอบเบื้องต้นที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้

4.4 นำถ่านอัดแห้งที่ได้ไปอบลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 hr.

5. การวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิง

5.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

5.1.1 ความชื้น (Moisture content) วิเคราะห์ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3173-11 (American Society for Testing and Materials, 2017) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิระหว่าง $104-110^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr. เพื่อให้ให้น้ำในตัวอย่างระเหยออกจนหมด ค่าความชื้น (Moisture content) ของตัวอย่างสามารถคำนวณได้ตาม Eq.1

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

Where M is the moisture content percentage (%)
 W_1 is the mass of the sample before drying (g)
 W_2 is the mass of the sample after drying (g)

5.1.2 ความหนาแน่น (Density) โดยการชั่งมวลเพื่อหามวลของตัวอย่าง (M) และวัดขนาดคำนวณหาปริมาตรของตัวอย่าง (V) จด บันทึก และนำไปคำนวณตาม Eq.2 ตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 (American Society for Testing and Materials, 2020)

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Where ρ is the density of the briquette (g/cm³)
 M is the mass of the briquette (g)
 V is the volume of the briquette (cm³)

5.1.3 ความแข็งแรงต่อนแรงกด (Compressive strength) ประเมินความสามารถของถ่านอัดแท่งในการต้านทานแรงอัดโดยไม่แตกหรือเสียรูปถาวร โดยทำการกดถ่านอัดแท่งด้วยแรงในแนวตั้งฉากต่อพื้นที่หน้าตัดอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเกิดการแตกหักหรือเสียรูป โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine; UTM) TTR/THAI Model MUL-125 ขนาด 100 kN ดัง Figure 5 ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 17831-2:2015 (International Organization for Standardization, 2015)



Figure 5 Universal Testing Machine (UTM) TTR/THAI Model MUL-125

5.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ทดสอบหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Lower Heating Value; LHV) ซึ่งเป็นค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในหน่วยแคลอรีต่อกรัมของเชื้อเพลิง (cal/g) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน Automatic Calorimeter (Bomb cal) Model IKA/C5000 PKG ดังแสดงใน Figure 6 ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D5865 (American Society for Testing and Materials, 2019)



Figure 6 Automatic calorimeter (Bomb cal) Model IKA/C5000 PKG

6. มาตรฐานเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

6.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ถ่านอัดแท่งซึ่งกำหนดมาตรฐานด้านคุณภาพ ความปลอดภัย และคุณสมบัติที่เหมาะสมของถ่านอัดแท่งที่ผลิตในระดับชุมชน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอและสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภค โดยสาระสำคัญของมาตรฐานนี้กล่าวถึง ลักษณะเฉพาะของถ่านอัดแท่งที่ดี (Thai Industrial Standards Institute, 2019) แสดงใน Table 2

Table 2 Community Product Standard; CPS 238/2547: Characteristics of charcoal briquettes

Characteristics	CPS 238/2547
General characteristics	The briquettes were uniformly shaped, similar in size, and consistently black, with slight breakage possible.
Heating value	$\geq 5,000$ cal/g
Moisture content	≤ 8 %

6.2 มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่งสากลและการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อ้างอิงค่ามาตรฐานจากหน่วยงานหรือองค์กรที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลดังนี้ ขนาดและรูปทรง อ้างอิง DIN EN ISO 17225-3 (Deutsches Institut fuer Normung, 2023) ความหนาแน่นอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์เรื่อง ศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องผลิตถ่านอัดแท่งสำหรับการผลิตในระดับครัวเรือน (Mahayosanon, 2005) ความชื้น และค่าความร้อน อ้างอิง ISO 17225-1:2021 (International Organization for Standardization, 2021) ในส่วนความต้านทานแรงกดอัด อ้างอิงงานวิจัย Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste (Sen et al., 2016) เพื่อให้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพและสามารถเปรียบเทียบได้ในระดับนานาชาติ แสดงดัง Table 3

Table 3 International standard characteristics of briquetted fuel

Characteristics	Standard	Reference standard
Dimension	The diameter, width, and length must be specified. Shapes solid cylinder, hollow cylinder (Cylindrical with a central hole), solid rectangle, or solid hexagon	DIN EN ISO 17225-3
Moisture	$\leq 15\%$	ISO 17225-1:2021

Bulk density	$\leq 0.8 \text{ g/cm}^3$	(Mahayosanon, 2005)
Lower Heating Value; LHV	$\geq 3,800 \text{ cal/g}$	ISO 17225-1:2021
Compressive strength	8-15 kg/cm^2	(Sen et al., 2016)

7. การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance)

เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระสองตัว คือ อัตราส่วนผสมของถ่านหุงต้มสำหรับสับและกลีเซอรีน อีกหนึ่งตัวแปรเป็นความดันการกดอัดถ่านอัดแท่ง ที่มีผลต่อค่าของตัวแปรตาม โดยทำการวิเคราะห์กรณีที่มีการทำซ้ำ (With replication) ทำ 3 ซ้ำ ได้แก่ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดความยาวของถ่านอัดแท่งทรงกระบอกตัน ความชื้น ความหนาแน่น และความแข็งแรงต่อนแรงกด และวิเคราะห์กรณีที่ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) ได้แก่ ค่าความร้อน ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของปฏิสัมพันธ์ได้ แต่ยังสามารถวิเคราะห์ผลหลัก (Main effects) (Montgomery, 2017) ของแต่ละตัวแปรได้ทั้งหมดนี้วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

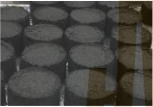
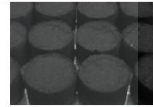
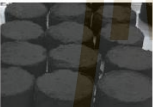
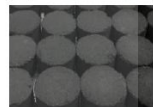
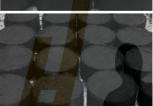
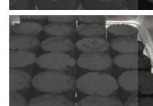
1. ลักษณะและขนาดของถ่านอัดแท่งจากถ่านหุงต้มสำหรับสับผสมกลีเซอรีน

ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านหุงต้มสำหรับสับผสมกลีเซอรีนเปรียบเทียบกับมาตรฐานถ่านอัดแท่ง แสดงใน Table 4 และ Table 5 ตามลำดับ จากการผลิตถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอกตัน พบว่า อัตราส่วนผสมของถ่านหุงต้มสำหรับสับต่อกลีเซอรีน และความดันในการกดอัดที่ใช้ มีผลต่อรูปทรงและความสมบูรณ์ของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจน โดยอัตราส่วน 100:0 (ไม่มีกลีเซอรีน) ให้ถ่านที่แน่น แข็งแรง และมีรูปทรงคงตัวดี แม้ใช้ความดันกดอัดต่ำ เนื่องจากตัวประสานในการวิจัยนี้คือแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นกาวที่ยึดติดระหว่างส่วนผสมได้ดี แต่การเพิ่มขึ้นของกลีเซอรีนส่งผลให้สารยึดเกาะมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากกลีเซอรีนมีคุณสมบัติเป็นน้ำมัน ทำให้ไม่สามารถเกิดเป็นกาวที่เหนียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนให้เห็นว่าการใส่กลีเซอรีนมากเกินไปอาจทำให้ถ่านสูญเสียความแข็งแรง ในขณะที่อัตราส่วน 80:20, 75:25 และ 70:30 ถ่านมีลักษณะผิวเรียบ เนื่องจากกลีเซอรีนทำให้ผิวเรียบและเงา แต่จากการทดลอง พบว่า อัตราส่วนผสม 80:20 นั้นเหมาะสำหรับผลิตถ่านอัดแท่งมากที่สุด ในส่วนของความดันในการกดอัดขึ้นรูป สังเกตได้ว่าในทุกรัตราส่วนผสม ความดันในการกดอัดสูงที่สุดที่ 180 kg/cm^2 นั้นเป็นแรงกดที่มากเกินไป ทำให้ส่วนผสมของถ่านดันขึ้นมาบริเวณด้านบน ส่วนความดันที่ 150 kg/cm^2 และ 120 kg/cm^2 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากการทดลอง พบว่า ความดัน 150 kg/cm^2 ให้ถ่านที่มีความแข็งแรงและลักษณะที่สวยงามที่สุด

ลักษณะของถ่านอัดแท่งทุกอัตราส่วนผสมและระดับความดันในการกดอัดที่ใช้ ยังสอดคล้องกับข้อกำหนดในหมายเหตุของตารางที่อ้างถึงมาตรฐาน CPS 238/2547 และ DIN EN ISO 17225-3 ซึ่งระบุว่า ถ่านอัดแท่งควรมีขนาดใกล้เคียงกัน รูปทรงสม่ำเสมอ สีดำสม่ำเสมอ และอาจมีโอกลาสแตกหักเล็กน้อยได้ โดยสามารถขึ้นรูปได้หลายลักษณะ เช่น ทรงกระบอกตัน ทรงกระบอกกลวง สี่เหลี่ยมตัน หรือหกเหลี่ยมตัน ซึ่งจากภาพสามารถประเมินได้ว่ารูปทรงและความสม่ำเสมอของถ่านจะดีขึ้นเมื่อควบคุมทั้งอัตราส่วนผสมและขนาดกดอัดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ระดับความดันการกดอัดที่ใช้ ไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูปทรงถ่านอัดแท่งถูกควบคุมไว้ด้วยแม่พิมพ์ขนาด 54 mm. แต่อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านหุงต้มสำหรับสับต่อกลีเซอรีนและระดับความดันกดอัดที่ใช้ส่งผลต่อความยาวของถ่านอัดแท่งอย่างเห็นได้ชัด อัตราส่วนของกลีเซอรีนที่เพิ่มมากขึ้นที่ความดันกดอัดเท่ากันจะเห็นได้ว่า ระยะความยาวของถ่านอัดแท่งลดน้อยลง เนื่องจากผงถ่านเป็นอนุภาคของแข็งหากมีมากในส่วนผสมจะทำให้การกดอัดลงได้ยากมากกว่ามาตรฐาน DIN EN ISO 17225-3 กำหนดให้ต้องระบุเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง และความยาวของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจน

ซึ่งข้อมูลใน Table 5 นี้แสดงให้เห็นว่าทุกสูตรอยู่ในช่วงขนาดที่ใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้เป็นถ่านอัดแท่งมาตรฐานได้

Table 4 Characteristics of briquettes made from cassava rhizome charcoal mixed with glycerin

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)		
	180	150	120
100:0			
80:20			
75:25			
70:30			

จากวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) พบว่า ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความดันการอัดและอัตราส่วนผสมของถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่ง พบว่า อัตราส่วนผสมของถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอริน มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value=0.010) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่ง ขณะที่ ความดันการอัดและ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ (p-value=0.524 และ 0.909 ตามลำดับ) แสดงว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งได้รับอิทธิพลจากอัตราส่วนของวัตถุดิบมากกว่าความดันการอัด และปัจจัยทั้งสองไม่มีผลร่วมกันต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างชัดเจน แต่ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความยาวของถ่านอัดแท่ง อัตราส่วนผสมเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุด (p-value=0.000) รองลงมาคือความดันการอัด (p-value=0.000) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของส่วนผสมมีผลต่อ โครงสร้างและความยาวของถ่านที่อัดขึ้นรูปได้ชัดเจน ขณะที่ความดันมีผลต่อการอัดแน่นของวัสดุภายในแม่พิมพ์ ซึ่งผลต่อ ความยาวของถ่านโดยตรง นอกจากนี้ยัง พบว่า มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันการอัดและอัตราส่วนผสม อย่างมี นัยสำคัญ (p-value=0.017) ซึ่งชี้ว่าผลของความดันการอัดต่อความยาวของถ่านอัดแท่งนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมที่ใช้ และในทางกลับกันผลของอัตราส่วนผสมต่อความยาวก็ขึ้นอยู่กับระดับของความดันการอัดเช่นกัน

Table 5 Dimensions of briquettes made from cassava rhizome charcoal mixed with glycerin

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Dimensions	
		Diameter (Mean $\pm$ SD) (mm)	Length (Mean $\pm$ SD) (mm)
100:0	180	53.65 $\pm$ 0.28 ^a	27.36 $\pm$ 0.22 ^z
	150	53.68 $\pm$ 0.14 ^a	28.95 $\pm$ 0.04 ^h
	120	54.03 $\pm$ 0.51 ^{ab}	29.94 $\pm$ 0.05 ⁱ
80:20	180	54.04 $\pm$ 0.20 ^{ab}	25.48 $\pm$ 0.36 ^e
	150	53.72 $\pm$ 0.49 ^a	26.56 $\pm$ 0.22 ^f
	120	53.88 $\pm$ 0.58 ^{ab}	27.59 $\pm$ 0.16 ^g
75:25	180	54.29 $\pm$ 0.63 ^{ab}	24.71 $\pm$ 0.27 ^d
	150	54.19 $\pm$ 0.38 ^{ab}	25.24 $\pm$ 0.04 ^e
	120	54.30 $\pm$ 0.32 ^{ab}	26.58 $\pm$ 0.27 ^f
70:30	180	54.27 $\pm$ 0.43 ^{ab}	21.85 $\pm$ 0.23 ^a
	150	54.42 $\pm$ 0.45 ^{ab}	23.22 $\pm$ 0.26 ^b
	120	54.55 $\pm$ 0.19 ^b	24.15 $\pm$ 0.31 ^c

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a–i) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกันและความยาวของถ่านอัดแท่งมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มอย่างชัดเจนมากขึ้น โดยกลุ่มที่ไม่ผสมกลีเซอริน 100:0 และความดันกดอัดที่ 120 และ 150 kg/cm² มีความยาวสูงสุดและอยู่ในกลุ่ม h–i ซึ่งต่างจากกลุ่มที่มีสัดส่วนกลีเซอรินสูง เช่น 70:30 ซึ่งค่าความยาวลดลงอย่างชัดเจนโดยเฉพาะที่แรงอัด 180 kg/cm² อยู่ในกลุ่ม a แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกลีเซอรินมีผลให้ความยาวของแท่งลดลง และค่าที่ต่างกันจาก a–i ยืนยันถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (ทดสอบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$) ผลดังกล่าวทั้งหมดชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับระดับทั้งสองปัจจัยร่วมกันอย่างเหมาะสม เพื่อควบคุมลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่งให้มีคุณภาพสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการใช้งาน

2. สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่ง ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น และความต้านทานแรงกดอัด จากตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ แสดงไว้ใน Table 6 พบว่า สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังที่ผสมกับกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.968% ถึง 2.579% ซึ่งอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดโดยมาตรฐาน ISO 17225-1:2021 ที่ไม่เกิน 15% และมาตรฐานของ CPS 238/2547 ที่ไม่เกิน 8% แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังผสมกลีเซอรินที่ผลิตมีความชื้นเหมาะสมต่อการเผาไหม้และการจัดเก็บ โดยพบว่า การเพิ่มกลีเซอรินมีแนวโน้มทำให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในอัตราส่วน 70:30 ที่มีค่าความชื้นสูงสุดที่ 2.579% ที่ความดันกดอัด 150 kg/cm² ส่วนค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ในช่วง 0.416–0.514 g/cm³ ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Mahayosanont (2005) ซึ่งระบุไว้ว่าค่าไม่ควรเกิน 0.8 g/cm³ ขณะที่ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive strength) พบว่า เฉพาะอัตราส่วน 100:0 ที่ระดับความดันกดอัด 180 และ 150 kg/cm² เท่านั้น มีค่าเท่ากับ 9.96 และ 8.59

kg/cm² ตามลำดับ ที่มีค่าอยู่ในช่วงงานวิจัยของ Sen et al. (2016) ทดสอบได้ว่า ค่าอยู่ในช่วง 8–15 kg/cm² แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำกลีเซอรินมาผสมเพิ่มค่าความหนาแน่น แต่กลับลดค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัดลงอย่างชัดเจน ดังนั้น อัตราส่วน 70:30 ที่ระดับความดันกดอัด 180 kg/cm² มีความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive strength) ถึง 7.90 kg/cm² ใกล้เคียงกับงานวิจัย จึงเหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ต้องการสมบัติทางกายภาพให้สอดคล้องกับมาตรฐานและงานวิจัย

Table 6 Physical properties in comparison with ISO 17225-1:2021 standard and related research studies

Mixing ratio of cassava rhizome charcoal to glycerin	Compression pressure (kg/cm ²)	Moisture (Mean±SD) (%)	Bulk density (Mean±SD) (g/cm ³)	Compressive strength (Mean±SD) (kg/cm ²)
100:0	180	0.968±0.218 ^a	0.432±0.003 ^{ab}	9.96±0.52 ^f
	150	1.001±0.217 ^a	0.428±0.004 ^a	8.59±0.89 ^{ef}
	120	1.164±0.101 ^{ab}	0.416±0.004 ^a	6.18±1.68 ^d
80:20	180	1.622±0.317 ^{abc}	0.469±0.007 ^{def}	4.11±0.12 ^{bc}
	150	1.748±0.338 ^{bcd}	0.464±0.011 ^{cde}	3.00±0.68 ^{ab}
	120	1.505±0.233 ^{abc}	0.448±0.010 ^{bc}	1.80±0.40 ^a
75:25	180	2.118±0.284 ^{cde}	0.485±0.015 ^{fg}	4.37±1.03 ^{bc}
	150	2.247±0.298 ^{cde}	0.477±0.005 ^{ef}	5.60±0.96 ^{cd}
	120	2.382±0.115 ^{de}	0.454±0.011 ^{cd}	5.51±1.13 ^{cd}
70:30	180	2.032±1.030 ^{cde}	0.514±0.008 ^h	7.90±0.80 ^e
	150	2.579±0.353 ^e	0.507±0.017 ^h	4.84±0.44 ^{cd}
	120	2.110±0.377 ^{cde}	0.497±0.014 ^{gh}	4.62±1.11 ^{bcd}

Note: Mean values in the same column followed by different superscript letters (a–h) are significantly different at $p \leq 0.05$ based on Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) แบบมีการทำซ้ำ (With replication) พบว่าอัตราส่วนการผสมของถ่านห้ำมันสำปะหลังผสมกลีเซอริน มีผลต่อค่าความชื้นของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% p -value มีค่าเท่ากับ 0.000 ขณะที่ความดันในการกดอัดและปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันในการกดอัดกับอัตราส่วนผสม ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่า p -value เท่ากับ 0.446 และ 0.761 ตามลำดับ แสดงว่าอัตราส่วนผสมของกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความชื้น ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนการผสมของถ่านห้ำมันสำปะหลังต่อกลีเซอริน มีผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่า p -value เท่ากับ 0.000 ทั้งสองปัจจัย ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมต่างมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นอย่างชัดเจน ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย มีค่า p -value เท่ากับ 0.866 ซึ่งสูงกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ กล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมแต่ละปัจจัยมีผลอย่างอิสระต่อความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง และในการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงให้เห็นว่าความดันในการกดอัดและอัตราส่วนการผสมของถ่านห้ำมันสำปะหลังต่อกลีเซอริน มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงกดอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่า p -value เท่ากับ 0.000 ทั้งสองปัจจัย แสดงให้เห็นว่าทั้งความดันการกดอัดและอัตราส่วนผสมมี

อิทธิพลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักอัดของถ่านอัดแท่งอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันการกดอัดและอัตราส่วนการผสม ก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยเช่นกัน มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 แสดงให้เห็นว่าผลความดันการกดอัดต่อค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักอัดของถ่านอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมที่ใช้ และในทางกลับกัน กล่าวคือ ปัจจัยทั้งสองไม่ได้ส่งผลอย่างอิสระต่อกันแต่มีผลร่วมกันต่อค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักอัด

การทดสอบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับ $p \leq 0.05$ พบว่า เมื่อสัดส่วนกลีเซอรินเพิ่มขึ้น ค่าความชื้น (Moisture) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม โดยเฉพาะกลุ่มที่มีสัดส่วน 70:30 ที่ความชื้นสูงสุด $2.579 \pm 0.353\%$ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม e ซึ่งต่างจากกลุ่ม 100:0 ที่มีค่าน้อยที่สุดและอยู่ในกลุ่ม a สะท้อนว่ากลีเซอรินมีผลเพิ่มความชื้นในตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความหนาแน่นรวม (Bulk density) มีค่ามากขึ้นเมื่อสัดส่วนกลีเซอรินสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 70:30 ค่าอยู่ในกลุ่ม g-h ซึ่งสูงกว่า 100:0 ที่อยู่ในกลุ่ม a-ab แสดงแนวโน้มชัดเจนว่ากลีเซอรินช่วยเพิ่มความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง สำหรับค่าความแข็งแรงต่อน้ำหนักอัด (Compressive strength) กลุ่มที่ไม่ผสมกลีเซอรินที่แรงอัด 180 kg/cm^2 มีค่ามากที่สุด $9.96 \pm 0.52 \text{ kg/cm}^2$ อยู่ในกลุ่ม f ซึ่งต่างจากกลุ่มอื่นที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าและกระจายอยู่ในกลุ่ม a-e โดยเฉพาะกลุ่ม 80:20 ที่ 120 kg/cm^2 มีค่าต่ำสุด $1.80 \pm 0.40 \text{ kg/cm}^2$ กลุ่ม a แสดงว่าเมื่อเพิ่มกลีเซอรินมากขึ้นหรือใช้แรงอัดต่ำ ค่าความแข็งแรงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3. สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) ของวัตถุดิบตั้งต้นและถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากการผสมระหว่างถ่านเหง้ามันสำปะหลังกับกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงไว้ใน Table 7 จากการทดสอบ พบว่า กลุ่มวัตถุดิบเริ่มต้นกลีเซอรินมีค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) สูงที่สุดอยู่ที่ $7,612 \text{ cal/g}$ รองลงมาคือถ่านเหง้ามันสำปะหลังที่ $5,947 \text{ cal/g}$ และแป้งมันสำปะหลังมีค่าต่ำที่สุดที่ $3,563 \text{ cal/g}$ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติของกลีเซอรินที่เป็นของเหลวอินทรีย์มีคุณสมบัติเป็นน้ำมันติดไฟง่ายและมีพลังงานสูงเมื่อเผาไหม้ ส่วนแป้งมันสำปะหลังแม้จะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน แต่ให้ค่าพลังงานต่ำ จึงควรใช้อย่างพอเหมาะเพื่อไม่ลดคุณภาพเชื้อเพลิงโดยรวมเมื่อพิจารณาค่าความร้อน ของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากอัตราส่วนการผสมต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ถ่านอัดแท่งทุกสูตรไม่ว่าจะใช้ความดันการกดอัดระดับใด มีค่าความร้อน สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ใน ISO 17225-1:2021 ไม่น้อยกว่า $3,800 \text{ cal/g}$ และ CPS 238/2547 ไม่น้อยกว่า $5,000 \text{ cal/g}$ อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุชีวมวลในงานวิจัยนี้มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยสูตรที่ให้ค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) สูงที่สุดคืออัตราส่วนถ่านเหง้ามันสำปะหลังต่อกลีเซอรินที่ 70:30 ภายใต้ความดันการกดอัด 180 kg/cm^2 ซึ่งให้ค่าพลังงานถึง $6,164 \text{ cal/g}$ ตามด้วยสูตร 75:25 ที่ให้ค่าพลังงานสูงในระดับใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรินซึ่งมีพลังงานความร้อนสูงลงในสูตรผสม จะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน พบว่า ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากกากกาแฟใช้แล้วผสมกลีเซอริน สำหรับอัตราส่วน 100:0 , 95:5 และ 90:10 เท่ากับ 21.14, 21.21 และ 21.55 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลพลห่อหุ้มกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ เช่น ลิกไนต์ 16.38 MJ/kg บิทูมินัส 19.43 MJ/kg ผักชีฝรั่ง 17.36 MJ/kg ไม้เนื้อแข็ง 18.66 MJ/kg ใบอ้อย 18.40 MJ/kg กากมันสำปะหลัง 18.10 MJ/kg กิ่งปาล์ม 17.50 MJ/kg ฟางข้าว 15.20 MJ/kg และถ่านหินมีค่าความร้อนสูงสุด 25.9 MJ/kg (Potip & Wongwuttanasatien, 2018)

Table 7 Heating values of raw materials and briquettes

Mixing ratio of	Compression	Lower Heating	Standard
cassava rhizome	pressure (kg/cm^2)	Value; LHV	ISO 17225-1:2021
charcoal to glycerin		(cal/g)	CPS 238/2547
			(cal/g)

Raw materials	Cassava rhizome	5,947		
	charcoal powder			
	glycerin	7,612		
	cassava starch	3,563		
100:0	180	5,570		
	150	5,714		
	120	5,690		
80:20	180	5,763		
	150	5,910	3,800	5,000
	120	5,886		
75:25	180	6,033		
	150	5,800		
	120	5,722		
70:30	180	6,164		
	150	6,050		
	120	6,062		

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ค่าความดันกดอัดจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งในด้านอื่น เช่น ความแน่นหรือความแข็งแรงต่อแรงกด แต่จากตารางนี้สามารถสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนระดับความดันกดอัด มีผลต่อค่าความร้อนค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะในสูตรที่มีการผสมกลีเซอริน กล่าวคือ อิทธิพลของความดันกดอัดต่อค่าความร้อน ไม่เด่นชัดเท่ากับอัตราส่วนของวัตถุดิบ ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) ไม่มีการทำซ้ำ (Without replication) ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมมีผลต่อค่าความร้อน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่า p-value เท่ากับ 0.022 ขณะที่ความดันกดอัด ไม่มีผลต่อค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) อย่างมีนัยสำคัญ มีค่า p-value เท่ากับ 0.873 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มกลีเซอรินในอัตราส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) ของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นแนวทางที่มีประโยชน์ต่อการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพสูงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสากล

บทสรุป

จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างผงถ่านเหง้ามันสำปะหลังกับกลีเซอริน และระดับความดันในการกดอัด มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราส่วน 100:0 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดอัด (Compressive strength) สูงสุดถึง 9.96 kg/cm² ที่ระดับความดันกดอัด 180 kg/cm² ส่วนอัตราส่วน 70:30 ที่ระดับความดันการกดอัด 180 kg/cm² ให้ค่าความร้อน (Lower Heating Value; LHV) สูงสุดถึง 6,164 cal/g ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ISO 17225-1:2021 และ CPS 238/2547 อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มกลีเซอรินมากเกินไปส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง แม้จะช่วยเพิ่มความเรียบเงาและค่าความร้อนของถ่าน ส่วนแรงอัดที่เหมาะสมคือ 150 kg/cm² ที่ให้ทั้งความแข็งแรงและรูปทรงดี โดยค่าความชื้นและความหนาแน่นของถ่านทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) พบว่า อัตราส่วนผสมมีผลต่อค่าความชื้น ความหนาแน่น ความ

แข็งแรงต่อแรงกดอัด และค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่แรงอัดมีผลชัดเจนต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงต่อแรงกดอัดเท่านั้น ทั้งนี้ยังพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลต่อความยาวและความแข็งแรงต่อแรงกดอัดของถ่านอัดแท่งอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงความสำคัญของการควบคุมทั้งสองปัจจัยร่วมกันเพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการใช้งาน ข้อเสนอแนะการเลือกใช้ส่วนผสมหรือความดันในการกดอัดเป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยถ้าต้องการค่าความร้อนที่มาก ควรเลือกอัตราส่วนที่มีการผสมกลีเซอรินที่มาก หรือต้องการความแข็งแรงของถ่านสูงเพื่อการจัดเก็บและขนส่งควรเลือกความดันการกดอัดที่มากและส่วนผสมกลีเซอรินที่น้อย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke (ASTM D3173-11)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard test method for gross calorific value of coal and coke (ASTM D5865)*. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils (ASTM D2974-14)*. ASTM International.
- Bernardes, F. F., Romanelli, T. L., Pereira, A. K. S., Cupertino, G. F. M., Fernandes, M. A., Brito, J. O., de Souza, E. C., Saloni, D., & Dias Júnior, A. F. (2023). Energy performance of different charcoal production systems. *Energies*, *16*(21), 7318. <https://doi.org/10.3390/en16217318>
- Bunyamanid, Y., Limphitakphong, N., Chavalparit, O., & Tantisattayakul, T. (2016). An analysis of energy and carbon intensities and exergy efficiency in natural gas combined-cycle power plants: A case study of Thailand. *MATEC Web of Conferences*, *68*, 14001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166814001>
- Deutsches Institut für Normung. (2023). *Certification scheme: Wood briquettes according to DIN EN ISO 17225-3*. Deutsches Institut für Normung (DIN).
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 17831-2:2015-Solid biofuels-Determination of mechanical durability of pellets and briquettes-Part 2: Briquettes*. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2021). *Solid biofuels-Fuel specifications and classes-Part 1: General requirements (ISO 17225-1:2021)*. International Organization for Standardization.
- Jongluempiti, J., & Tangchaichit, K. (2012). Comparison proximate analysis and heating value between cassava rhizome and perennial wood. *Advanced Materials Research*, *415-417*, 1693-1696. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.1693>

- Khempilak, J., & Kongto, P. (2022). Torrefaction of cassava rhizomes for high-quality solid biofuel production. *Journal of Applied Research and Development in Science and Technology (JARST)*, 21(1), 88-94. (In Thai)
- Mahayosanon, T. (2005). *A study on the design and construction of a briquette production machine for household-level production* [Unpublished master's thesis]. Kasetsart University. (In Thai)
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- Potip, S., & Wongwuttanasatian, T. (2018). Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combustion Science and Technology*, 190(11), 2030-2043.
- Pukdee-asa, M., & Pimpan, P. (2022). Fuel briquettes from waste of lemon grass and banana peel. *Nakhon Sawan Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 14(19), 107-121. (In Thai)
- Sen, R., Wiwatpanyaporn, S., & Annachatre, A. P. (2016). Influence of binders on physical properties of fuel briquettes produced from cassava rhizome waste. *International Journal of Environment and Waste Management*, 17(2), 158-174. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2016.076750>
- Sotannde, O. A., Oluyeye, A. O., & Abah, G. B. (2010). Physical and combustion properties of briquettes from sawdust of *Azadirachta indica*. *Journal of Forestry Research*, 21(1), 63-67. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0010-6>
- Srimoon, R., Darapong, P., & Kanavong, V. (2014). Extraction of Alexandrian laurel (*Calophyllum inophyllum* L.) seed oil for biodiesel production. *RMUTSB Academic Journal*, 2(2), 131-138. (In Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2019). *Community product standard: Charcoal briquettes (CPS 238/2004)*. Ministry of Industry. (In Thai)
- Unthisong, P., & Maneechot, R. (2019). Development and performance testing of a briquette machine using *Leucaena leucocephala* pods. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 7(2), 147-157. (In Thai)
- Usuborisut, P., & Mahayosanon, T. (2005). Study on cassava rhizome charcoal briquetting using a hydraulic press machine. *Kasetsart Journal of Engineering*, 19(56), 32-40. (In Thai)

ประวัติผู้เขียน

นายวรวุฒิ สมีนาง เกิดเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2544 ที่อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย เริ่มศึกษาในระดับอนุบาลศึกษาและประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านหนองดัมเต่า จังหวัดขอนแก่น เข้าศึกษาต่อระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โดยเริ่มเข้าศึกษาในปีการศึกษา 2563 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนการศึกษาเรียนดี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2567 เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง เกรดเฉลี่ยสะสม 3.82 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (วิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ) โดยเริ่มเข้าศึกษาในปีการศึกษา 2567 ระหว่างการศึกษาได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิต

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 178 หมู่ 7 บ้านหนองดัมเต่า ตำบลป่าปอ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น 40110

ช่องทางติดต่อ

โทร. 06 2579 2114

E-mail: worawutsame@gmail.com

รายวิชาที่สอนระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท

1. ENG25 1010 Engineering Graphics I
2. ENG25 3400 MECHANICAL ENGINEERING LABORATORY I (สอน 2 ภาคการศึกษา)
3. ENG25 3410 MECHANICAL ENGINEERING LABORATORY II (สอน 2 ภาคการศึกษา)
4. ENG25 2010 Fundamental Skills of Mechanical Engineering