



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควัน
จากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

Community product development of smokeless charcoal briquettes from
macadamia shell wastes
รหัสโครงการ TSRI2567/53

โดย

ปิยรัตน์ มุลศรี

อาทิตย์ หู้เต็ม และ กฤษติญา มุลศรี

สังกัดมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

หัวหน้าโครงการวิจัย

คณะวิจัย

กันยายน พ.ศ. 2568

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควัน
จากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

Community product development of smokeless charcoal briquettes from
macadamia shell wastes
รหัสโครงการ TSRI2567/53

โดย

ปิยรัตน์ มุลศรี

หัวหน้าโครงการวิจัย

อาทิตย์ หู้เต็ม และ กฤษติญา มุลศรี

คณะวิจัย

สังกัดมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

กันยายน พ.ศ. 2568

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ชื่องานวิจัย การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

ผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ มุลศรี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ หุ่นเต็ม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎิญา มุลศรี

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ปีที่เสร็จวิจัย 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง พร้อมแนวทางธุรกิจและการจัดจำหน่าย โดยตั้งเป้าสร้างนวัตกรรมถ่านอัดแท่งที่ให้ความร้อนสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และปลอดภัยต่อผู้ใช้ เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและสร้างรายได้แก่ชุมชน โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียด้วยเตาเผาจากถังน้ำมัน 200 ลิตร การขึ้นรูปถ่านอัดแท่งโดยใช้เครื่องอัดสกรูและผ่านหัวอัดทรงกระบอก 5 เหลี่ยม จากนั้นตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ สภาวะการเผา วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (proximate) และสมบัติด้านพลังงานความร้อนของถ่านและถ่านอัดแท่ง ผลการวิเคราะห์ถ่านจากกะลาแมคคาเดเมีย พบ ค่าความชื้น $5.96 \pm 0.76\%$ สารระเหย $9.57 \pm 0.36\%$ เถ้า $5.79 \pm 0.23\%$ และคาร์บอนคงตัว $78.68 \pm 0.39\%$ แสดงให้ทราบว่าถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนี้มีศักยภาพใช้เป็นวัตถุดิบถ่านอัดแท่งคุณภาพดีได้ สำหรับถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยออกแบบสูตรผสม 3 สูตร ได้แก่สูตร A: ถ่านผสมแป้งมันและน้ำ (อัตราส่วนร้อยละ 85:5:10) สูตร B: ถ่านผสมแป้งมัน สารช่วยติดไฟ NaNO_3 และน้ำ (85:5:2:8) สูตร C: ถ่านผสมแป้งมัน สารช่วยติดไฟ KNO_3 และน้ำ (85:5:2:8) ถ่านอัดแท่งที่ได้เป็นแท่งทรงห้าเหลี่ยมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 cm มีรูแกนกลางภายในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 cm เพื่อช่วยการไหลเวียนอากาศ มีความยาวประมาณ 8 cm ถ่านอัดแท่งที่ได้มีผิวภายนอกเรียบ เนื้อถ่านยึดเกาะกันแน่น ไม่แตกหักง่าย มีความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง $0.534\text{--}0.563 \text{ g/cm}^3$ สะท้อนถึงการขึ้นรูปที่แน่นและคงรูปดี ผลการทดสอบการเผาไหม้ชี้ว่า สารช่วยติดไฟที่ใช้สามารถเพิ่มความเร็วการลามไฟอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมระยะเวลาเผาไหม้นานเพียงพอสำหรับงานครัวเรือน/จำหน่ายปลีก มีค่ามลพิษระหว่างใช้งานอยู่ในระดับต่ำ ($\text{PM}_{2.5}$ เฉลี่ย $23.7\text{--}19.3 \mu\text{g/m}^3$; CO $5.3\text{--}3.8 \text{ ppm}$; CO_2 $667.5\text{--}622.1 \text{ ppm}$) และปริมาณ CO_2 อยู่ในช่วงปกติ ($\approx 622\text{--}668 \text{ ppm}$) สอดคล้องการเผาไหม้ที่สะอาดขึ้นเมื่อมีการเติมสารช่วยติดไฟลงไปในสูตรการเตรียม โดยภาพรวมถ่านอัดแท่งไร้ควันสูตร C ให้สมรรถนะการติดไฟและคุณภาพอากาศดีที่สุด

(ข)

รองลงมาคือสูตร B และ A ตามลำดับ ผล bomb calorimeter ให้ค่า HHV เฉลี่ย 6.891, 6.805 และ 6.974 kcal/g ตามลำดับ โดยสูตร C ให้ค่าความร้อนสูงสุด ขณะที่ทีมวิจัยยังคำนวณ HHV ทางทฤษฎีจากความสัมพันธ์เชิงสถิติตามแบบจำลองของ Nhuchhen & Salam เพื่อใช้เปรียบเทียบแนวโน้ม ในมิติการยอมรับของผู้ใช้ มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีและสำรวจความพึงพอใจผู้เข้าอบรม 30 คน (มาตราส่วน 5 ระดับ) ผลรวมทุกด้านอยู่ในระดับ “พึงพอใจมาก” (เฉลี่ย 4.15) โดยประเด็นที่ได้คะแนนสูง ได้แก่ คุณภาพและประสิทธิภาพของสูตร B และ C และความสะดวกในการเตรียมและจัดการวัตถุดิบ สะท้อนว่ากระบวนการผลิตและสูตรผสมมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในชุมชน ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงชี้ได้ว่าการใช้เศษกะลาแมคคาเดเมียเป็นวัตถุดิบเพื่อให้ผลิตถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ร่วมกับการออกแบบสูตรและกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งที่เหมาะสม สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันที่มีคุณภาพการเผาไหม้สูง ควัน/ก๊าซมลพิษต่ำ และมีศักยภาพต่อยอดขายเชิงเศรษฐกิจ สร้างผลิตภัณฑ์ชุมชน และรักษาสีงแวดล้อมในชุมชนพื้นที่ที่มีการปลูกแมคคาเดเมียได้

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่งไร้ควัน กะลาแมคคาเดเมีย ผลิตภัณฑ์ชุมชน

Type of research: Community product development of smokeless charcoal briquettes from macadamia shell waste

Type of research: Applied research (Chemistry)

Researcher: Associate Professor Dr. Piyarut Moonsri
 Assistance Professor Dr. Arthit Hutem
 Assistance Professor Dr. Kristiya Moonsri

University: Phetchabun Rajabhat University

Year: 2025

Abstract

This research was developed a community-product of smokeless charcoal briquette from macadamia shell waste with accompanying business and distribution guidelines, aiming to deliver a briquette innovation that provides high heat output, is environmentally friendly, and safe for users, thereby adding value to agricultural residues and generating income for the community. Macadamia shell waste was carbonized by pyrolysis in a 200-liter oil-drum kiln; the briquettes were then formed using a screw extruder fitted with a five-sided cylindrical die. Physical properties, combustion behavior, proximate composition, and energy (thermal) characteristics of both the char and the briquettes were subsequently measured. Proximate analysis of the macadamia shell char showed moisture $5.96 \pm 0.76\%$, volatile matter $9.57 \pm 0.36\%$, ash $5.79 \pm 0.23\%$, and fixed carbon $78.68 \pm 0.39\%$, indicating that the pyrolysis process produced a suitable feedstock for high-quality briquetting. For smokeless briquettes from macadamia shells, three formulations were designed: A; charcoal: tapioca starch: water (85:5:10 %wt), B; charcoal: tapioca starch: NaNO_3 ignition aid: water (85:5:2:8 %wt), and C; charcoal: tapioca starch: KNO_3 ignition aid: water (85:5:2:8 %wt). The resulting briquettes were five-sided rods of ~ 4.5 cm outer diameter with a 1.4 cm central hole to promote airflow and a length of ~ 8 cm; they exhibited a smooth exterior, strong internal cohesion with low friability, and bulk density of $0.534\text{--}0.563\text{ g cm}^{-3}$, reflecting tight compaction and good shape stability. Combustion tests indicated that the ignition aids significantly increased flame-spread rate while maintaining burning durations adequate for household/retail use. Pollutant levels during use were low (PM_{2.5} averages $23.7\text{--}19.3\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$; CO $5.3\text{--}3.8$ ppm; CO₂ $667.5\text{--}622.1$ ppm), with CO₂ lying within typical indoor ranges ($\approx 622\text{--}668$ ppm), consistent with cleaner combustion when ignition aids were

incorporated. Overall, formulation C delivered the best ignition performance and air-quality outcomes, followed by B and A, respectively. Bomb-calorimetry gave mean HHVs of 6.891, 6.805, and 6.974 kcal g⁻¹ for A, B, and C, respectively, with formulation C achieving the highest value; theoretical HHVs were also estimated using the statistical correlation of Nhuchhen and Salam for comparison of trends. For user acceptance, technology transfer and a satisfaction survey of 30 trainees (five-point Likert scale) yielded an overall rating of “very satisfied” (mean 4.15), with high scores for the quality/efficiency of formulations B and C and for ease of feedstock preparation/handling, indicating that the process and formulations are well-suited for practical community application. Therefore, the findings indicate that using macadamia shell waste as a raw material, together with appropriately designed formulations and briquetting processes, can produce a community smokeless briquette product with high combustion quality, low smoke/gaseous emissions, and strong potential for economic scaling, community product development, and environmental benefits in macadamia-growing areas.

Keywords: smokeless charcoal briquettes, macadamia nut shell, community product

(จ)

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควัน จากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง โดยได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัย พัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม จากงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (Fundamental Fund) มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2567 โดยผ่านความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กสว.) ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ได้อำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการแก้ไขปัญหาวาสตเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งทางการเกษตร ให้เป็นถ่านกะลาแมคคาเดเมียอัดแท่งที่มีคุณภาพดี ไร้ควัน สามารถพัฒนาไปสู่การสร้างผลิตภัณฑ์ชุมชนจากถ่านกะลาแมคคาเดเมียอัดแท่ง ที่จะช่วยสร้างรายได้ให้กับชุมชนอีกทางหนึ่ง ตลอดจนผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถนำข้อมูลและผลการวิจัยที่ได้นี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยรัตน์ มุลศรี

กันยายน 2568

(น)

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย	3
1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แมคคาเดเมีย	4
2.2 ถ่านอัดแท่ง	6
2.3 การตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง	9
2.4 แนวคิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 วัสดุและสารเคมี	17
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	17
3.3 การดำเนินงานวิจัย	18

(ข)

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	22
4.1 การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง	22
4.2 การศึกษาสูตรผสมถ่านอัดแท่ง	27
4.3 การศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง	33
4.4 การศึกษาโมเดลแผนธุรกิจ แนวทางการจัดจำหน่ายและต้นทุนการผลิต	43
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล	49
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	55
ประวัตินักวิจัย	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	23
4.2 ปริมาณสารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว (dry basis) และค่าความร้อนจากการ คำนวณของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่เตรียมได้	27
4.3 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน	28
4.4 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน+ KNO_3	30
4.5 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน+ NaNO_3	32
4.6 สมบัติทางกายภาพและสมบัติการติดไฟของถ่านอัดแท่ง	37
4.7 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้	38
4.8 ค่าความร้อน (HHV) ของถ่านอัดแท่งสูตรการเตรียมต่าง ๆ ที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ ด้วยเครื่องบอมคาโลรีมิเตอร์	39
4.9 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ โดยวิธี proximate analysis	40
4.10 ปริมาณความร้อน (HHV) ของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยการคำนวณทางทฤษฎี	40
4.11 ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ	43
4.12 แสดงรายการต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควัน	48

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะของผลแมคคาเดเมียในระยะเก็บเกี่ยว	4
2.2 ลักษณะของ(ก) กะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร และ (ข) ถ่านกะลา-แมคคาเดเมีย	6
4.1 เตาประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร สำหรับใช้เผาเศษกะลาแมคคาเดเมีย	22
4.2 การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งโดยใช้เตาประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร	23
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) ผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย (ข) ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย (ค) ภาพถ่าย SEM ของผงเศษกะลาแมคคาเดเมีย และ (ง) ภาพถ่าย SEM ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย ตามลำดับ	24
4.4 องค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค SEM-EDS ที่พบในถ่านที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	25
4.5 ลักษณะสเปกตรัมของถ่านแกรไฟต์ที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมียด้วยเทคนิค FTIR	26
4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐาน (ก-ง) สูตรการผสมที่ 1-4 ตามลำดับ	28
4.7 ลักษณะของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐานผสม KNO_3 (ก-ค) สูตรการผสมที่ 1-3 ตามลำดับ	30
4.8 ลักษณะของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐานผสม NaNO_3 (ก-ค) สูตรการผสมที่ 1-3 ตามลำดับ	31
4.9 ขั้นตอนการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เตาเผาถ่านควันน้อยขนาด 200 ลิตร	33
4.10 ถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส	34
4.11 แสดงขั้นตอนของการผสมถ่านตามสูตรการผสมที่กำหนด การนวดเศษถ่านและการอัดแท่งเพื่อขึ้นรูปถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	34
4.12 ผลึกถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้จากกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน และการทดลองจุดติดไฟเพื่อให้ความร้อน	35

(ญ)

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.13 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐาน สูตร A	36
4.14 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐานผสม NaNO_3 สูตร B	36
4.15 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐานผสม KNO_3 สูตร C	37
4.16 ภาพตัวอย่างการอบรมผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	42
4.17 โมเดลธุรกิจถ่านอัดแท่งไร้ควัน	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานและราคาพลังงานที่สูงขึ้น ตลอดจนสถานการณ์ของโลก เช่น สงครามระหว่างยูเครนกับรัสเซีย สถานะการลดลงของกำลังผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล สถานะเงินเฟ้อ และเศรษฐกิจถดถอยของสังคมโลก ล้วนส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานเชื้อเพลิงทั้งในระดับครัวเรือน ร้านอาหาร และผู้ผลิตสินค้า เนื่องจากราคาพลังงานมีราคาที่สูงขึ้นกระทบต่อต้นทุนของค่าครองชีพและต้นทุนของการผลิตสินค้าและบริการ การเลือกใช้พลังงานเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ จึงได้รับความสนใจจากผู้ใช้อย่างมาก เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานจากแสงแดด พลังงานลม พลังงานจากถ่านหิน มาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ มากขึ้น เป็นต้น โดยพลังงานชีวมวลสำหรับประเทศไทยแล้วนับว่ามีจุดแข็งหลายประการ เช่น ประเทศไทยมีชีวมวลอยู่ในปริมาณมากทั้งจากที่มีอยู่แล้วในป่าไม้ รวมถึงเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตรและขยะจากครัวเรือน ต้นทุนการผลิตต่ำ เคลื่อนย้ายได้สะดวก การใช้งานไม่ยุ่งยากซับซ้อน เป็นต้น โดยสามารถนำไปใช้ในกิจกรรมโดยชีวมวลเหล่านี้สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง คาร์บอนที่นำไปใช้ในรูปของ ถ่านเชื้อเพลิงสำหรับใช้ความร้อนในกิจกรรมในครัวเรือน ตามร้านอาหาร (หมุ่กระทะ การปิ้งย่าง) และธุรกิจในด้านการผลิตสินค้าอาหาร ได้ นอกจากนี้แล้วการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมก็เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลจัดได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้วัสดุในการทำแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือขยะจากครัวเรือน (ช่วยลดปัญหาวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและขยะชุมชน) การผลิตถ่านสามารถใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ (การอบชีวมวลให้เป็นถ่านสามารถทำในเตาเผาที่สามารถวนกลับควันไฟที่เกิดขึ้นมาเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาใหม่ได้) เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเมื่อเผาไหม้เกิดควันน้อยมาก (เนื่องจากสารระเหยได้ในวัสดุชีวมวลถูกกำจัดออกไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเหลือแต่คาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) ดังนั้นการเลือกใช้เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ประชาชนสามารถนำไปใช้เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในครัวเรือน ต้นทุนในการผลิตผลิตสินค้าและบริการและสามารถสร้างเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ ๆ ให้กับสังคมได้

ชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรจัดได้ว่าเป็นแหล่งของคาร์บอนในธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมากมาย และชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรบางชนิดก็มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการผลิตถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์นั้นเป็นแหล่งพื้นที่การเกษตรที่สำคัญและมีชีวมวลที่

เหลือทิ้งจากการเกษตร ได้แก่ กะลาแมคคาเดเมีย ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาและพัฒนารูปแบบการแปรรูปกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร ตลอดจนพัฒนาสูตรและวิธีการเตรียมเพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งไร้ควัน สร้างนวัตกรรมถ่านอัดแท่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นถ่านที่มีคุณภาพดี ให้ความร้อนสูง ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพของผู้ใช้งาน สร้างเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่มีเศษกะลาแมคคาเดเมียที่เหลือทิ้งจากการทำการเกษตรจำนวนมาก ก่อให้เกิดการจัดการขยะทางการเกษตรที่มีอยู่จำนวนมาก สร้างรายได้ให้กับคนในชุมชนโดยสามารถขายถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ของวิสาหกิจชุมชนผ่านทางช่องทางการตลาดต่าง ๆ ก่อให้เกิดการจัดการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมจากการเผาทิ้งเศษขยะทางการเกษตร และได้เทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ต่อการลดต้นทุนด้านพลังงานของภาคครัวเรือน ร้านค้า และอุตสาหกรรม ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบเตาเผาถ่านขนาดเล็กและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกะลาแมคคาเดเมีย
2. เพื่อศึกษาสูตรการผสม วิธีการเตรียม และคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกะลาแมคคาเดเมีย
3. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งจากกะลาแมคคาเดเมีย แผนธุรกิจและแนวทางการจัดจำหน่าย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้เตาเผาถ่านควันน้อย
2. ได้ข้อมูลสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่งจากถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมียที่สามารถผลิตได้โดยชุมชน ในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน
3. ได้ข้อมูลการคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
4. ได้แนวทางการบริหารจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของชุมชน(เศษกะลาแมคคาเดเมีย) เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม
5. กลุ่มเกษตรกรและผู้ประกอบการ หรือผู้สนใจทั่วไปสามารถนำไปใช้ประกอบอาชีพเพื่อเสริมรายได้ให้กับครอบครัวต่อไปได้
6. ได้บทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในประเทศหรือต่างประเทศอย่างน้อย 1 เรื่อง หรือสามารถนำไปจดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยเป็นเศษกะลาแมคคาเดเมียของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลไม้เมืองหนาว ตำบลหนองแม่นา อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์
2. ทำการศึกษาและออกแบบเตาเผาถ่านขนาดเล็กที่ผลิตจากถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ที่สามารถแปรรูปเศษกะลาแมคคาเดเมียผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ให้กลายเป็นถ่านที่มีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมในการนำไปใช้ทำถ่านอัดแท่งได้
3. ทำการศึกษาดูสูตรในการเตรียมถ่านอัดแท่งและวิธีการเตรียมถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพดี จุดติดไฟง่าย ให้ปริมาณความร้อนสูง ไร้วินในขณะที่ติดไฟ
4. ศึกษาสมบัติของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น สภาพความพรุน ความชื้น ความแข็ง และสมบัติทางเคมี เช่น ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ เป็นต้น และตรวจสอบสมบัติการจุดติดไฟ ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งที่ได้ ปริมาณควันไฟที่เกิดขึ้น และระยะเวลาในการติดไฟ เป็นต้น
5. ทำการศึกษาด้านทุนในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย จัดทำแผนธุรกิจ Business Model Canvas ของผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ได้ และช่องทางการจัดจำหน่าย
6. ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีและผลงานวิจัยแก่ตัวแทนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและหน่วยงานที่สนใจและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการหรือการประชุมวิชาการระดับชาติ เป็นต้น

1.5 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่ 27 มกราคม 2567 ถึง 30 กันยายน 2568

1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย

ห้องปฏิบัติการทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูง อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างนวัตกรรมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง เพื่อเพิ่มมูลค่าจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของการปลูกแมคคาเดเมียของกลุ่มเกษตรกรอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ พัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มศักยภาพของชุมชนในการผลิตและการตลาดของผลิตภัณฑ์สินค้าชุมชน โดยเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย สรุปได้ดังนี้

2.1 แมคคาเดเมีย

แมคคาเดเมีย (*Macadamia integrifolia*) เป็นพืชตระกูลนัท มีชื่อเสียว่าเป็นถั่วที่มีรสชาติอร่อย เป็นพืชที่นิยมนำเมล็ดมาบริโภคกันทั่วโลก มีต้นกำเนิดอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2386 ซึ่งปลูกได้ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำอยู่ในช่วง 9–32 องศาเซลเซียส และต้องเป็นพื้นที่ที่อุดมสมบูรณ์ ร่วนซุย และดูดซึมน้ำได้ดี มีความสูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 400 เมตรขึ้นไป

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของแมคคาเดเมีย เป็นพืชยืนต้นเขียวชุ่มตลอดปี ลำต้นสูงตั้งตรง เมื่อโตเต็มที่สูงประมาณ 20 เมตร ทรงพุ่มมีลักษณะคล้ายปิรามิด แผ่ออกกว้างประมาณ 13 เมตร ใบมีลักษณะเหมือนดอกห้วกลับ ใบแก่สีเขียวเข้ม ขอบใบมีหนามเล็กน้อย ดอกเป็นช่อยาว ติดผลเป็นช่อยาวประมาณ 7-12 นิ้ว ผลแมคคาเดเมียระยะการเก็บเกี่ยวดังแสดงในภาพที่ 2.1 มีเปลือกแข็งหนา สีเขียว มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 นิ้ว (2.5 ซม.) เนื้อในมีเปลือกแข็งหุ้ม เรียกว่า กะลา ภายในกะลามีเมล็ดเป็นเนื้อเน้นสีขาว รับประทานได้ ลักษณะเปลือกแมคคาเดเมีย มี 2 ลักษณะ คือ Rough and Smooth shell



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของผลแมคคาเดเมียในระยะเก็บเกี่ยว

ถั่วแมคคาเดเมียมีรสชาติอร่อย และยังสามารถนำไปแปรรูปหรือนำไปเป็นส่วนผสมต่าง ๆ ในอาหารต่าง ๆ มากมาย ซึ่งมีราคาซื้อขายอยู่ในราคาที่สูงมากเกินกว่า 1,000 บาท ต่อกิโลกรัม เมล็ดแมคคาเดเมีย นอกจากมีความมันอร่อยแล้วยังมีคุณค่าทางโภชนาการอย่างมากมาย เช่น ช่วยป้องกันโรคหัวใจ เป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญในกับร่างกาย มีสารต้านอนุมูลอิสระช่วยป้องกันมะเร็ง ชะลอความแก่ ช่วยลดน้ำหนัก มีไฟเบอร์สูง ช่วยบำรุงกระดูก เสริมสร้างประสาทและสมอง ช่วยการดูดซึมธาตุเหล็ก และเป็นแหล่งที่มีวิตามินบีสูง เป็นต้น ในประเทศไทยมีการนำเข้ามาปลูกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2496 โดยได้มีการทดลองปลูกและพัฒนาเมล็ดพันธุ์เพื่อให้เหมาะสมกับการปลูกในประเทศไทย และได้รับการส่งเสริมในการปลูกในพื้นที่สูงจากงานโครงการหลวงและศูนย์โครงการพัฒนาเกษตรพื้นที่สูงจนสามารถปลูกแมคคาเดเมียได้อย่างดีและสามารถปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจได้ ซึ่งในปัจจุบันมีพื้นที่ปลูกในประเทศไทยประมาณ 7,000 – 8,000 ไร่ และมีพื้นที่การปลูกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากแมคคาเดเมียยังเป็นพืชที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจ มีความต้องการของตลาดสูงเมื่อเทียบกับปริมาณผลผลิตที่ยังมีน้อยอยู่ ซึ่งมีปริมาณผลผลิตแมคคาเดเมียของทั้งโลกประมาณ 64,000 ตัน ในขณะที่มีความต้องการของผู้บริโภคประมาณ 71,200 ตัน โดยมีการปลูกมากในพื้นที่แถบภาคเหนือและภาคอีสาน เช่น เชียงใหม่ เชียงราย ตาก แม่ฮ่องสอน เพชรบูรณ์ และเลย โดยมีสายพันธุ์แมคคาเดเมียที่มีความเหมาะสมสำหรับปลูกในประเทศไทย มีอยู่ 3 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์เชียงใหม่ 400 พันธุ์เชียงใหม่ 700 และพันธุ์เชียงใหม่ 1000 ซึ่งมีผลผลิตแมคคาเดเมียของทั้งประเทศประมาณ 23,625 กิโลกรัม (สำหรับพื้นที่การปลูกประมาณ 6,000 ไร่) ผลผลิตเมล็ดทั้งกะลาที่ความชื้น 20-30% ราคาประมาณ 60-70 บาท/กิโลกรัม เมื่อกะเทาะเปลือกแล้วเมล็ดเต็มจะมีราคาอยู่ในช่วง 1,000-1,500 บาท เมล็ดแตกมีราคาประมาณ 500-800 บาทต่อกิโลกรัม การปลูกแมคคาเดเมียในจังหวัดเพชรบูรณ์ ได้มีการส่งเสริมให้เกษตรกรในพื้นที่สูงของจังหวัดโดยเฉพาะในเขตพื้นที่อำเภอเขาค้อ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีระดับความสูงและมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปลูกแมคคาเดเมีย ทำการปลูกเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์สินค้าเกษตรที่มีราคาของเกษตรกรในพื้นที่สูง โดยพื้นที่อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ก็เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่กำลังจะมีผลผลิตของแมคคาเดเมียออกมากในตลาดจำนวนมาก ขั้นตอนของการผลิตเมล็ดแมคคาเดเมียเพื่อจำหน่ายจะต้องมีการสีเปลือกหุ้มกะลาของผลแมคคาเดเมียออกไปก่อน จากนั้นจึงทำการตากหรืออบแห้งแล้วจึงทำการกะเทาะกะลาผลแมคคาเดเมียเพื่อเอาเมล็ดแมคคาเดเมียออกไปจำหน่าย ดังนั้นในการกระบวนการผลิตเมล็ดแมคคาเดเมีย จึงมีเปลือกกะลาแมคคาเดเมียออกมาเป็นผลพลอยได้จำนวนมาก ในปัจจุบันได้มีการส่งเสริมให้นำไปเผาให้เป็นถ่านเพื่อจำหน่ายเป็นเชื้อเพลิงหรือสารดูดซับกลิ่น แทนการเผาทิ้งหรือการนำไปทิ้งในสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่าถ่านจากกะลาแมคคาเดเมียเป็นถ่านที่มีคุณสมบัติพิเศษกว่าถ่านทั่วไป ซึ่งมีความแข็งแรงกว่าถ่านจากกะลามะพร้าว และมีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งถ่านจากกะลาแมคคาเดเมียมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่สร้างรายได้เสริมให้กับกลุ่มเกษตรกรได้อีก เช่น ผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพ ผลิตภัณฑ์สารกรองน้ำและสารดูดซับ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ของฝากของที่ระลึก ได้ เป็นต้น ลักษณะของเศษกะลาแมคคาเดเมียและถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.2 ลักษณะของ (ก) กะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร และ (ข) ถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจากถ่านกะลาแมคคาเดเมียของกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกจึงเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และช่วยเสริมสร้างรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกรเพื่อให้มีรายได้มากขึ้น

2.2 ถ่านอัดแท่ง

2.2.1 ความหมายของถ่านอัดแท่ง

ถ่านอัดแท่ง (Charcoal briquettes) เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตโดยการอัดผงถ่านหรือเศษถ่านให้เป็นก้อนถ่านที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อใช้งานด้านความร้อนหรือปรุงอาหาร โดยนิยามถ่านอัดแท่งตามความหมายของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547 : 5) ให้ค่านิยามว่า ถ่านอัดแท่ง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชังข้าวโพด มาเผาจนเป็นถ่าน อาจนำมาบดเป็นผงหรือเม็ดแล้วอัดเป็นแท่งตามภาพทรงที่ต้องการหรือนำวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น แกลบ จี่เลื้อย มาอัดเป็นแท่งตามภาพทรงที่ต้องการแล้วจึงนำมาเผาเป็นถ่าน ถ่านอัดแท่งไร้ควัน (Smokeless Charcoal Briquettes) คือเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากชีวมวลซึ่งถูกไพโรไลซิส/คาร์บอนิซ์ เพื่อลดความชื้นและสารระเหย (volatile matter) จากนั้นจึงทำให้หนาแน่น (densification) และขึ้นรูปเป็นแท่งด้วยตัวประสาน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดควันไฟและกลิ่นต่ำมาก ระหว่างจุดติดและเผาไหม้ ให้ความร้อนสูงและให้ความร้อนสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับถ่านไม้ทั่วไป โดยถ่านอัดแท่งไร้ควันที่มีคุณภาพดีได้รับความนิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปรุงอาหาร (Uttamaprakrom et al., 2012, Hameed et al., 2017) เนื่องจากเผาไหม้ได้ดี มีความหนาแน่นของก้อนถ่านสูง ไม่แตกง่ายและไม่มีการแตกประทุเหมือนถ่านไม้ทั่วไป เป็นต้น นอกจากนี้แล้วการใช้ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงยังช่วยรักษาสภาพแวดล้อม โดยการเปลี่ยนจากการใช้ไม้ฟืนหรือถ่านคุณภาพต่ำทั่วไป ไปเป็นการใช้ถ่านอัดแท่งไร้ควัน สามารถลดการปล่อย CO₂ และฝุ่น PM ได้อย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งยังช่วยลดผลกระทบทางสุขภาพจากการหุงต้มในครัวเรือนไทย (Wikipedia, 2025)

2.2.2 วัสดุชีวมวลสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่ง

ชีวมวล (biomass) หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ไม้ยืนต้น พืชที่มีส่วนประกอบเป็นแป้งและน้ำตาล วัชพืชบนบกและน้ำ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร มูลสัตว์ ตลอดจนขยะอินทรีย์ที่มีอยู่ทั่วไป ในปัจจุบันชีวมวลได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น การใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดสารสำคัญ ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตวัสดุคอมโพสิต และด้านการผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (biofuel) เป็นต้น

วัสดุชีวมวลที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่งมีหลายประเภท ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว เปลือกไม้ เศษไม้ซอย กะลา และเปลือกเมล็ดพืช นอกจากนี้ ยังมีวัสดุเหลือทิ้งจากผลไม้หรือผลผลิตทางการเกษตรอย่างกะลาแมคคาเดเมีย ที่ได้รับความสนใจในช่วงหลังเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสม เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีความเข้มข้นพลังงานสูง (Moonsri, 2021; Hadiyanto et al., 2021)

2.2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุชีวมวล

วัสดุชีวมวลบางชนิด เช่น เปลือกแมคคาเดเมีย มีค่าความร้อนสูงกว่า 17–21 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้เชื้อเพลิง (Moonsri, 2021; Optimized fuel properties, 2023) และมีความหนาแน่นต่ำ ($\approx 0.46 \text{ g/cm}^3$) ซึ่งการอัดเป็นแท่งช่วยเพิ่มความหนาแน่นรวมและประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Moonsri, 2021) วัสดุบางประเภทยังมีปริมาณความชื้นและเถ้าในปริมาณต่ำ ทำให้เหมาะแก่การนำไปอัดแท่งโดยไม่ต้องตากแห้งมาก่อน (Hadiyanto et al., 2021; Obi et al., 2022)

2.2.2.2 การเลือกใช้วัสดุผสม

ในงานวิจัยของ Hadiyanto et al. (2021) พบว่าการผสมวัสดุหลายชนิด เช่น เปลือกผลไม้ เศษฟาง และไม้ซอย ช่วยสร้างผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งที่มีค่าความร้อน (calorific value) และคุณภาพด้านกล (mechanical integrity) สูง โดยแบ่งกลุ่ม binder ซึ่งช่วยเสริมความเหนียวให้กับก้อนถ่านเมื่ออัดรวมกัน ทำให้เนื้อถ่านไม่แตกง่ายขณะเผาไหม้ แต่ binder ส่วนใหญ่เพิ่มปริมาณเถ้าเล็กน้อย (Moisture–ash tradeoffs)

2.2.2.3 บทบาทของ Binder

Binder เช่น แป้งมันสำปะหลัง มอลโตส หรือ โมลาส (molasses) มีบทบาทสำคัญในการยึดเกาะอนุภาคชีวมวลและสนับสนุนการอัดเป็นแท่งเหนียว แข็งแรง ไม่แตกง่าย การวิจัยโดย Obi et al. (2022) และ Hadiyanto et al. (2021) ชี้ว่า binder ประมาณ 5–15% ของน้ำหนักรวม ถือเป็นอัตราส่วนเหมาะสมที่จะเสริมความแข็งแรงเชิงกล (shatter index สูง) และยังรักษาค่าความร้อนไว้ได้ดี ไม่ลดหล่นมากเกินไป

2.2.2.4 ผลกระทบจากคุณสมบัติวัสดุที่เลือก

จากงานวิจัยของ Moonsri (2021) ระบุว่า เปลือกแมคคาเดเมียผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400–500 °C มีค่าความร้อนสูง (HHV $\approx 17.68 \text{ MJ/kg}$) และมีปริมาณเถ้าประมาณ 6.3%

ซึ่งถือว่าต่ำกว่าวัสดุชีวมวลประเภทอื่น (Moonstri, 2021) การเลือกวัสดุที่มีปริมาณเถ้าและความชื้นต่ำล่วงหน้า สามารถลดขั้นตอนการเตรียมก่อนอัด เช่น การอบแห้ง ทำให้ประหยัดพลังงานและเวลาผลิตโดยรวม

ดังนั้นวัสดุชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูง ค่าความร้อนสูง และปริมาณเถ้าต่ำ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชื้อเพลิงของถ่านอัดแท่ง ในขณะที่การผสมกับ binder อย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มความอัดแน่น และลดการแตกหัก การเลือกวัสดุเหล่านั้นยังส่งผลดีต่อฝีมือแรงงานในชุมชน เนื่องจากไม่ต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพก่อนผลิตมาก ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ชุมชนเชิงพลังงานหมุนเวียน และลดการปล่อยควัน (CIFOR, 2021; Hadiyanto et al., 2021) [Thai Journal Online](#)

2.2.3 กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง

การผลิตถ่านอัดแท่ง (biomass briquette production) เป็นกระบวนการแปรรูปวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณค่าทางพลังงานสูง กระบวนการนี้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การเตรียมวัสดุ, (2) การไพโรไลซิส (pyrolysis), (3) การบดและผสม, (4) การอัดแท่ง และ (5) การอบแห้งและตรวจสอบคุณภาพ

ขั้นตอนแรกคือ การเตรียมวัสดุ (material preparation) โดยการคัดเลือกและเตรียมวัสดุชีวมวลวัสดุที่นิยมนำมาใช้ เช่น เปลือกไม้ เศษไม้ กะลามะพร้าว ฟางข้าว และกะลาแมคคาเดเมีย เนื่องจากมีพลังงานความร้อน (Higher Heating Value: HHV) สูงและปริมาณความชื้นต่ำ โดยการเตรียมวัสดุชีวมวลนั้นทำได้โดย การตัดแยกสิ่งปนเปื้อนเพื่อนำสิ่งแปลกปลอม เช่น หิน ดิน หรือโลหะออกจากชีวมวล เพื่อป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ในขั้นตอนถัดไป จากนั้นจึงทำการลดขนาด โดยใช้เครื่องบดหยาบ (chipping machine) เพื่อลดขนาดชีวมวลให้เล็กลงจนอยู่ในช่วง 2–5 เซนติเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับการเผาไหม้และการอัดแท่ง และทำการลดความชื้น (Pre-drying) โดยการตากหรือการอบด้วยความร้อนให้วัสดุชีวมวลมีความชื้นไม่เกิน 10–15% เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้

ขั้นตอนที่สองคือ การไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสถานะที่มีออกซิเจนจำกัดเพื่อแปรรูปวัสดุให้เป็นถ่าน โดยมักใช้เตาเผาแบบ fixed-bed หรือ drum kiln ในระดับชุมชน โดยมีลักษณะสำคัญของขั้นตอนนี้คือ

- อุณหภูมิ: โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 400–600 °C
- ระยะเวลา: ประมาณ 2–6 ชั่วโมง ขึ้นกับประเภทของวัสดุ
- ผลผลิต: ได้ถ่านชีวมวล (biochar) พร้อมของเสียเช่น tar และ gas ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานเสริมได้

ผลลัพธ์จากการไพโรไลซิสจะเป็นถ่านที่มีคาร์บอนสูง (~70–85%) พร้อมสำหรับการบดละเอียดในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่สามหรือ การบดและผสม (grinding and mixing) ถ่านชีวมวลจากขั้นตอนก่อนจะถูกบดละเอียดด้วย hammer mill หรือ roller crusher เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ (~1–2 มม.) การผสม (mixing) ซึ่งจะมีการเติมสารยึดเกาะ (binder) โดยมักใช้แป้งมันสำปะหลัง มอลโตส หรือโมลาส ในอัตราส่วน 5–15% ของน้ำหนักรวม เพื่อเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงของก้อนถ่านอัด นอกจากนี้อาจมีการเติมสารช่วยการเผาไหม้ (additive) เช่น โพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) เพื่อช่วยให้ถ่านติดไฟง่ายขึ้น โดยกระบวนการผสมมักทำในเครื่องผสมแบบ ribbon blender หรือ paddle mixer เพื่อให้ส่วนประกอบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่สี่หรือ การอัดแท่ง (Briquetting) การอัดแท่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้ถ่านชีวมวลและสารยึดเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนที่มีภาพร่างแน่นและสม่ำเสมอ ทำให้ก้อนถ่านมีความหนาแน่นสูง ซึ่งส่งผลต่อการให้ปริมาณความร้อนเมื่อเผาไหม้ และระยะเวลาของการเผาไหม้ โดยมีเทคนิคการอัดดังนี้

- เครื่องอัดแบบ piston press: ให้ความดันสูง (100–300 MPa) เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความหนาแน่นสูง
- เครื่องอัดแบบ screw extruder: ใช้ความดันต่ำกว่า แต่ให้ภาพทรงแท่งยาวและมีรูตรงกลางเพื่อการเผาไหม้ที่ดีขึ้น
- ภาพทรงที่นิยม: ทรงกระบอก (diameter 5–8 ซม., ความยาว 10–30 ซม.) หรือทรงหกเหลี่ยม แบบมีรูระบายอากาศ

ขั้นตอนที่ 5 คือ ขั้นตอนการอบแห้งและการตรวจสอบคุณภาพ (drying and quality testing) ถ่านอัดแท่งที่ได้ จะถูกอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้เหลือต่ำกว่า 5–8% โดยใช้อุณหภูมิ 80–100 °C ในห้องอบ (drying chamber) หรืออากาศร้อนจากระบบ solar dryer จากนั้นจึงทำการตรวจสอบคุณภาพ เช่น การหาค่าความร้อน (Calorific value) ตามมาตรฐาน ASTM D5865-19 หาค่าความหนาแน่น (Density) ปริมาณเถ้า (Ash content) ระยะเวลาเผาไหม้ (Burning time) และการปล่อยควันและกลิ่น เป็นต้น ซึ่งหากผ่านมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์จะถูกบรรจุถุง (10–20 กก.) พร้อมจำหน่าย

ดังนั้นกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งเป็นการแปรสภาพเศษชีวมวลเหลือทิ้งให้เป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่มีมูลค่าเพิ่มสูง แต่ละขั้นตอนตั้งแต่การเตรียมวัสดุจนถึงการอบแห้งมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยเฉพาะการเลือก binder ที่เหมาะสมและการควบคุมความชื้นอย่างเข้มงวด ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงเชิงกลและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง (Obi et al., 2022; Hadiyanto et al., 2021)

2.3 การตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง

ถ่านอัดแท่ง หรือ “ถ่านอัด” ที่ผลิตในระดับชุมชนเป็นผลิตภัณฑ์ OTOP ที่ช่วยสร้างรายได้ให้กับชุมชนและลดปัญหาชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรรายชุมชน โดยถ่านอัดแท่งมีคุณภาพเทียบเท่าถ่านไม้ทั่วไป ราคาสูงกว่าถ่านธรรมชาติเล็กน้อย แต่มีความคุ้มค่าและตอบโจทย์ด้านความสะอาด (ไม่มีกลิ่นควัน)

ตลอดจนประหยัด โดยการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพการผลิตถ่านอัดแท่งควรต้องมีการตรวจสอบสมบัติของถ่านอัดแท่งที่สำคัญได้แก่ ค่าความร้อน (Calorific Value) ความหนาแน่น (Density) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ระยะเวลาการเผาไหม้ (Burning Time) ความแข็งแรง (Mechanical Durability) วิธีการตามมาตรฐาน ASTM D5865-19 และการประเมินคุณภาพเชิงกลและการใช้งาน เป็นต้น การผลิตถ่านอัดแท่งเชิงพาณิชย์การกำหนดมาตรฐานคุณภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือด้านพลังงาน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไทย เลขที่ มผช. 238/2547 (มาตรฐานถ่านอัดแท่ง) ได้มีการกำหนดคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

2.3.1 เกณฑ์สำคัญของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

มาตรฐาน มผช. 238/2547 ระบุเกณฑ์ที่ชัดเจนคือ:

- **ความชื้น (Moisture Content)** ต้องไม่เกิน 8% เพื่อประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงและป้องกันการเน่าเสีย
- **ค่าความร้อน (Calorific Value)** ต้องไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม (≈ 20.9 MJ/kg) ซึ่งชี้วัดถึงพลังงานเชื้อเพลิงที่เหมาะสม
- **ปริมาณเถ้าหลังกระบวนการเผา (Ash Content)** ต่ำกว่า 10% ตามเกณฑ์ มผช. 657/2547
- **ภาพลักษณ์ทั่วไป** ผู้ผลิตต้องตรวจดูว่าถ่านอัดทุกแท่งมีขนาด ภาพร่าง สี และพื้นผิวสม่ำเสมอ โดยไม่เปลี่ยนสีหรือมีกลิ่นผิดปกติ
- **ภาชนะบรรจุและฉลาก** ต้องสะอาด แข็งแรง บรรจุถ่านตามน้ำหนักสุทธิ มีฉลากระบุรายละเอียดครบ เช่น ชื่อผลิตภัณฑ์ วัสดุที่ใช้ วันเดือนปีผลิต ชื่อผู้ผลิต และคำแนะนำในการใช้หรือเก็บรักษา

2.3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ

การทดสอบคุณภาพถ่านอัดชุมชนแบ่งได้เป็นสองด้านคือ:

2.3.2.1 การทดสอบลักษณะทั่วไปและฉลาก

ใช้การสุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 3 กิโลกรัมจากล็อตผลิตเดียวกัน เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของขนาด ภาพร่าง สี พื้นผิวฉลาก และข้อมูลฉลาก ว่าตรงตามมาตรฐาน

2.3.2.2 การทดสอบทางกายภาพและเชิงประสิทธิภาพ

- **ความชื้น** วัดตาม ASTM D 3173 (Drying at 105 °C)
- **ค่าความร้อน** ทดสอบตาม ASTM D 5865 (Bomb Calorimeter) เพื่อหาค่า HHV หรือ LHV & ISO ที่เกี่ยวข้อง
- **ความหนาแน่น** ตรวจโดยชั่งน้ำหนักและแบ่งด้วยปริมาตรแท่งจริง
- **ปริมาณเถ้า** คร่าวๆวัดจากการเผาในเตาและชั่งน้ำหนักเถ้า

ดังนั้นจากการตรวจสอบสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้ หากผ่านเกณฑ์ มผช. ถ่านอัดแท่งชุดนั้นจะถือว่ามีความคุณภาพตามมาตรฐาน รองรับการจำหน่ายในตลาดชุมชนและระดับภูมิภาค ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพถ่านอัดแท่งในระดับชุมชนของไทยต้องอาศัยการวัดตัวชี้วัดเชิงปริมาณ (ความชื้น ค่าความร้อน เถ้า ความหนาแน่น) และคุณภาพเชิงคุณลักษณะ (ภาพร่าง สี ภาพลักษณ์ บรรจุภัณฑ์) ตามมาตรฐาน มผช. 238/2547 ซึ่งช่วยสร้างมาตรฐานสากลให้ผลิตภัณฑ์ชุมชน เพิ่มความน่าเชื่อถือให้ผลิตภัณฑ์ชุมชนเข้าสู่ตลาดเชิงพาณิชย์ ส่งเสริมการควบคุมกระบวนการผลิตตั้งแต่การเลือกวัสดุ การผสมการอัด และการอบแห้ง ลดข้อร้องเรียนจากผู้บริโภค เช่น กลิ่นควัน ความชื้นในถ่าน ที่อาจกระทบต่อสุขภาพ และสนับสนุนการขายตลาด เช่น การส่งออก OTOP หรือจำหน่ายแก่ร้านอาหารและตลาดท้องถิ่น พร้อมขยับจากตลาดท้องถิ่นสู่การเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกที่ปลอดภัยและยั่งยืน

2.4 แนวคิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน

ผลิตภัณฑ์ชุมชน (Community Product) ถือเป็นผลลัพธ์จากการใช้ทรัพยากรท้องถิ่น ผสมกับภูมิปัญญาท้องถิ่นและนวัตกรรมเพื่อสร้างสรรค์สินค้าและบริการที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจึงมีความสำคัญทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม เนื่องจากสามารถเพิ่มมูลค่า (value-added) ให้กับทรัพยากรในท้องถิ่น สร้างรายได้ และส่งเสริมอัตลักษณ์ของชุมชนในตลาดโลก (Kotler & Keller, 2016; ศิริวรรณ เสรวิรัตน์, 2563) ในบริบทของประเทศไทย การส่งเสริมผลิตภัณฑ์ชุมชนได้รับความสำคัญภายใต้โครงการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ซึ่งเน้นการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานเพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดสากลได้ โดยแนวคิดเชิงทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน ได้แก่

2.4.1 แนวคิดการตลาดและการสร้างมูลค่าเพิ่ม

ตามแนวคิดของ Porter (1985) “Value Chain” การสร้างมูลค่าเพิ่มในผลิตภัณฑ์ชุมชนเกิดจากการบูรณาการกิจกรรมหลัก เช่น การออกแบบ การผลิต การตลาด การกระจายสินค้า และการบริการหลังการขาย ร่วมกับกิจกรรมสนับสนุน เช่น การพัฒนาทักษะแรงงาน การจัดการคุณภาพ และนวัตกรรมการบรรจุภัณฑ์ (Porter, 1985) นอกจากนี้แล้ว Kotler & Keller (2016) ได้ให้แนวคิดเพิ่มเติมว่าการพัฒนาผลิตภัณฑ์ควรอิงกับความต้องการของผู้บริโภค (customer-oriented development) โดยเฉพาะในตลาด niche ที่ผู้บริโภคต้องการสินค้าที่มีความเฉพาะตัวและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.4.2 แนวคิดเศรษฐกิจสร้างสรรค์และเศรษฐกิจหมุนเวียน

เศรษฐกิจสร้างสรรค์ (Creative Economy) เน้นการใช้ความคิดสร้างสรรค์และนวัตกรรมในการเพิ่มมูลค่าให้ผลิตภัณฑ์ เช่น การพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากวัสดุรีไซเคิล การออกแบบลวดลายที่สะท้อนเอกลักษณ์ท้องถิ่น (UNCTAD, 2010) ในขณะที่ **เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)** สนับสนุนให้การผลิตและการบริโภคเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ลดขยะ และเพิ่มการนำ

กลับมาใช้ใหม่ (Ellen MacArthur Foundation, 2013) ซึ่งเหมาะกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนที่อิงกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น การผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

2.4.3 แนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน

เป็นแนวคิดที่เกิดขึ้นจากความพยายามของประชาคมโลกในการสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาเศรษฐกิจ การพัฒนาสังคม และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยปรากฏอย่างเป็นทางการครั้งแรกใน รายงานของคณะกรรมการโลกว่าด้วยสิ่งแวดล้อมและการพัฒนา (World Commission on Environment and Development – WCED) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “Brundtland Report” (1987) ซึ่งนิยามว่า “การพัฒนาอย่างยั่งยืน คือ การพัฒนาที่ตอบสนองความต้องการของคนรุ่นปัจจุบัน โดยไม่ลดทอนความสามารถในการตอบสนองความต้องการของคนรุ่นอนาคต” (WCED, 1987) ตามกรอบ Sustainable Development Goals (SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนควรตอบโจทย์ 3 มิติ ได้แก่:

- **มิติด้านเศรษฐกิจ:** สร้างรายได้และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของชุมชน โดยต้องมีการสร้างเศรษฐกิจที่เติบโตอย่างต่อเนื่องและทั่วถึง เน้นการผลิตและการบริโภคที่มีประสิทธิภาพ (resource efficiency) และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) เพื่อใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจะทำให้เกิดการเพิ่มมูลค่าเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร สร้างรายได้เสริมให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและเพิ่มการจ้างงานในท้องถิ่น มีการเข้าสู่ตลาดสินค้าพลังงานทดแทนของชุมชน
- **มิติด้านสังคม:** ส่งเสริมการมีส่วนร่วมและการถ่ายทอดภูมิปัญญาท้องถิ่น โดยต้องสร้างความเข้มแข็งของชุมชนด้วยการถ่ายทอดความรู้การผลิตและการบริหารจัดการ ส่งเสริมการรวมกลุ่มเป็นเครือข่ายเพื่อแลกเปลี่ยนเทคนิคการผลิตและการตลาด ตลอดจนเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงตลาดให้กับผู้ผลิตรายย่อย
- **มิติด้านสิ่งแวดล้อม:** ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างระมัดระวังและมีประสิทธิภาพ ลดการปล่อยมลพิษ การตัดไม้ทำลายป่า และการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ และการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน ดังนั้นการผลิตถ่านอัดแท่งโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงช่วยลดการเผาในที่โล่งที่ก่อให้เกิดควันและฝุ่น PM2.5 ใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพลังงานสะอาด (smokeless charcoal) ที่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

ดังนั้นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาแมคคาเดเมีย กลายเป็นทรัพยากรทางเศรษฐกิจ เมื่อแปรรูปโดยอัดเป็นเชื้อเพลิง ช่วยสร้างรายได้และลดการะมลพิษ (Peamsuwan & Deeto, 2021) ทำให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม การใช้เศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ช่วยลดขยะและมลพิษจากการเผาชีวมวลแบบดั้งเดิม (Ngene et al., 2024) สอดคล้องทิศทางพลังงานสะอาด

ของ Borgen Project ชุมชนสามารถจัดตั้งกลุ่มผลิต ถ่ายทอดเทคนิค สร้างแบรนด์ผ่านชุมชน ใช้ช่องทางตลาดออนไลน์หรือร้านค้าโครงการชุมชน ช่วยสร้างอาชีพในระดับท้องถิ่น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยในการออกแบบงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยและคณะได้ทำการศึกษาจากรายงานผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำรา และบทความวิจัยที่ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่แล้ว โดยตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นดังนี้

บุญรัตน์ โจลานันท์ อาทิตย์ พุทธรักษาติ และจันสุดา คำด้อย (2554) ได้ศึกษาพลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ โดยได้มุ่งพัฒนาเชื้อเพลิงอัดแท่งและภาพแบบการจัดการไมยราบยักษ์ด้านพลังงานทดแทนของชุมชน ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชันให้ปริมาณถ่านไมยราบยักษ์ประมาณร้อยละ 20 โดยมวล และการแปรสภาพเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 15-36 ค่ากำมะถัน ถ้า ความชื้น สารระเหยได้ และคาร์บอนคงตัวของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ที่ทดสอบอยู่ในช่วงร้อยละ $0.17-0.20 \pm 0.01$, $6.8-20.1 \pm 0.61-1.01$, $7.0-8.6 \pm 0.52-0.84$, $27.3-32.8 \pm 0.71-1.21$, และ $44.5-53.5 \pm 0.82-1.27$ ตามลำดับ เชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ผสมแป้งมันที่ร้อยละ 6 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมของการศึกษานี้โดยให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด ($5,432 \pm 101.5$ แคลอรี/กรัม) และประสิทธิภาพการใช้งานเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (มผช.238/2547) การศึกษาพบว่าอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์เท่ากับ 5.5 และ 1.2 ปี นอกจากกระบวนการจัดการไมยราบยักษ์ด้านพลังงานทดแทนที่ได้นำเสนอ ชุมชนยังให้ความสำคัญตระหนักต่อมาตรการควบคุมมลพิษและมาตรการคืนกำไรสู่ชุมชนในภาพแบบกองทุนด้วย

เสริมศักดิ์ เกิดวัน และคณะ (2561) ได้ศึกษาและพัฒนาการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาकु พบว่าการอัดขึ้นภาพเป็นถ่านอัดแท่งมีขั้นตอนหลักในการผลิต 3 ขั้นตอน คือ การเผาถ่าน การบด ผงถ่าน และการอัดขึ้นภาพเป็นถ่านอัดแท่ง โดยนำเปลือกต้นสาकुที่เหลือจากการผลิตแป้งในชุมชนมาเผาให้เป็นถ่านด้วยเตา 200 ลิตร บดให้ละเอียดเป็นผงถ่าน นำตัวอย่างผงถ่านเข้าทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM เพื่อหาคุณสมบัติความเหมาะสมเบื้องต้น ได้ผลดังนี้ ค่าความชื้น 6.03 % ถ้า 9.11 ปริมาณคาร์บอนคงตัว 66.61 % สารระเหยได้ 24.28 % จากนั้นนำผงถ่านไปหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดขึ้นภาพด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ ระหว่างผงถ่านเปลือกต้นสาकु ตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) และน้ำ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมขององค์ประกอบที่ได้กำหนดไว้ได้แก่ ผงถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ คือ 1 : 1 : 0.50 (โดยน้ำหนัก) ถ่านอัดแท่งที่ได้มีลักษณะทางกายภาพตามภาพทรงที่ต้องการ หน้าตัดภาพหกเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร อัดขึ้น ภาพได้ง่าย เกาะตัวกันแน่น ไม่มีรอยแตกร้าว จากนั้นนำไปลดความชื้นด้วยการตากแดดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง (2 วัน) ทดสอบระยะจุดติดไฟ ระยะการมอดดับ และปริมาณถ่าน จากนั้นนำ

ตัวอย่างถ่านอัด แท่งเข้าทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ASTM ได้ผลดังนี้ ค่าความชื้น 23.87 % เถ้า 13.68 ปริมาณคาร์บอนคงตัว 51.68 % ค่าความร้อน 5,649 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สารระเหยได้ 34.64 % ผลจากการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาเกเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติ ทางเชื้อเพลิงกับวัสดุอื่นๆ ที่นิยมนำมาแปรสภาพเป็นถ่านอัดแท่ง สรุปได้ว่า เปลือกต้นสาเกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุในการผลิตถ่านอัดแท่ง สามารถทำการผลิตเพื่อใช้ในครัวเรือนและพัฒนาสู่การ ผลิตเพื่อสร้างรายได้แก่ชุมชนได้

อาคม ปะหลามานิต และคณะ (2563) ได้ศึกษาชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโดนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยใช้ตัวประสาน 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมัน กากมัน และแป้งมันดิบ ในสัดส่วนตัวประสานร้อยละ 4, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ถ่านอัดแท่งที่ผลิตมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหกเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm และบริเวณตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ลดความชื้นถ่านอัดแท่งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 38.11- 39.10 ฐานเปียก จนเหลือความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ผลการศึกษาพบว่ากรอบแห้งถ่านกะลา ตาลโดนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถอบถ่านอัดแท่งให้มีความชื้นต่ำ กว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ได้ภายใน 2 วัน ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลเล็กน้อยต่อองค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) 25.48-27.43 MJ/kg ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และความ ร่วน การผสมตัวประสานแต่ละชนิดด้วยสัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่เหมาะ สำหรับการผลิตถ่านกะลาตาลโดนด อัดแท่ง เนื่องจากทำให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีความร่วนสูง การผลิตถ่านกะลาตาลโดนดอัดแท่งโดยใช้ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ที่สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ ถ่านกะลาตาลโดนดอัดแท่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ ชุมชนถ่านอัดแท่ง การใช้สัดส่วนตัวประสาน เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดควั่นมากขึ้นในระหว่างการลุกไหม้ของ ถ่านอัดแท่ง การผลิตถ่านกะลา ตาลโดนดอัดแท่งโดยใช้กากมันที่สัดส่วนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสานทำให้ ต้นทุนการผลิต และระยะเวลาคืนทุนต่ำสุด

ปิยรัตน์ มุลศรี (2562) ได้ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจากถ่านกะลาแมคคาเดเมียของกลุ่ม เกษตรกรพื้นที่สูง อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยศึกษาการเผากะลาแมคคาเดเมียด้วยเตาประดิษฐ์ ขนาดเตาเผา 54 ลิตร ที่อุณหภูมิ ในช่วง 400-500 0C ซึ่งจะใช้เวลาตลอดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันน้อยกว่า 3 ชั่วโมง ได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลาแมคคาเดเมียคุณภาพดี คิดเป็นร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 40.7 มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 374.7 mg/g จากการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการเผากระตุ้น ที่อุณหภูมิ 600 0C นาน 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยใช้สารกระตุ้นเป็นกรดฟอสฟอริกจะมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด รองลงมาได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายซิงค์ คลอไรด์ ตามลำดับ โดยมีค่าไอโอดีนนับเบรอร์อยู่ในช่วง 608-644 mg/g มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 910.37 m²/g มี

พื้นที่ผิวต่อกรัมสารตัวอย่าง 6640.14 m²/g มีปริมาตรรูพรุน 2.31248 cc/g และมีรัศมีเฉลี่ยของรูพรุน 50.30 อังสตรอม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ (adsorption) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับ Cu²⁺ และกรดอะซิติกได้ดี จากผลการวิเคราะห์ถ่านกะลาแมคคาเดเมียคุณภาพดีพบว่ามีความชื้น 5.21 % มีปริมาณเถ้า 6.15 % และมีความหนาแน่นปรากฏประมาณ 0.46 g/cm³ ซึ่งมีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมียพบว่าสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมียเป็นถ่านเชื้อเพลิงได้ สารกรองน้ำ สารดูดซับกลิ่นและรังสี สบู่ก้อน สบู่เหลว และแชมพู โดยมีคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนทุกผลิตภัณฑ์

Boagale (2009) ได้ศึกษาการเตรียมถ่านโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยอธิบายว่า ถ่านไม้จัดเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้สำหรับการประกอบอาหารในสาธารณรัฐเอธิโอเปียเนื่องจาก มีราคาถูกและหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านไม้มีผลกระทบต่อสุขภาพและสร้างมลพิษจากควันที่เกิดขึ้นได้ โดยในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วัสดุชีวมวลเป็นทางเลือกในการผลิตถ่าน จากการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (ใบไม้แห้ง, แกลบกาแฟ, ชานอ้อย, หญ้า และอื่น ๆ) โดยการเปลี่ยนให้อยู่ในสภาพถ่านแท่งเพื่อให้ใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและมีการเผาไหม้ที่สะอาด ทำโดยการใช้เครื่องอัดรีดอย่างง่ายในการทำให้เป็นถ่านแท่ง และใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (คาร์บอนไนเซชัน) ในการเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนี้ให้เป็นถ่าน และใช้เตาสำหรับประกอบอาหารที่มีประสิทธิภาพในการเผาถ่านอัดแท่งที่ได้สำหรับใช้งาน จากผลการศึกษาพบว่าเครื่องอัดรีดด้วยมือมีความสามารถในการกดอัดได้ 30 kg/hr และคาร์บอนไนเซชันสามารถเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 15 kg ให้กลายเป็นถ่านได้หนัก 5 kg โดยใช้ระยะเวลาในการเผาถ่าน 25 นาที โดยการใช้เตาในการประกอบอาหารที่มีประสิทธิภาพจะทำให้สามารถประกอบอาหารได้ 3 มื้อจากการใช้ถ่านอัดแท่งนี้หนัก 100 g ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับถ่านไม้แล้วถ่านอัดแท่งที่ผลิตขึ้นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนี้มีความประหยัด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดีต่อสุขภาพ (ไม่มีควัน) และช่วยลดปัญหาการตัดไม้ด้วย

Lu และคณะ (2018) ได้รายงานว่าวัสดุคาร์บอนจากชีวมวลถูกเตรียมได้จากกะลาแมคคาเดเมีย (macadamia nut shells, MNS) โดยใช้วิธีการแช่ด้วยสารละลายและการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง สำหรับการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด (high-performance supercapacitors) ลักษณะพื้นฐานวิทยาและโครงสร้างระดับไมครอนได้ถูกตรวจสอบโดยใช้ XRD, Raman spectrometer, SEM และ TEM โดยผลจากการศึกษาพบว่า activated carbon (MNSCA) ที่เตรียมได้มีโครงสร้างรูพรุนที่สมบูรณ์โดยมีทั้ง micropores และ mesopores ซึ่ง MNSCA นี้ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1057 m² g⁻¹ โดยวัสดุคาร์บอนที่มีความพรุนนี้มีค่า impressive specific capacitance 325.7 F g⁻¹ และไม่มี capacitance loss หลังจากการทดสอบที่ปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 A g⁻¹ จำนวน 10,000 รอบ แสดงให้เห็นถึงความเสถียร

ที่ดีและมีความจุไฟฟ้าจำเพาะสูง ดังนั้นวัสดุคาร์บอนชีวมวลที่ได้จาก MNS จึงอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อไปได้

อาคม ปะหลามานิต และคณะ (2563) ได้ศึกษาชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยใช้ตัวประสาน 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมัน กากมัน และแป้งมันดิบ ในสัดส่วนตัวประสานร้อยละ 4, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ถ่านอัดแท่งที่ผลิตมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหกเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm และบริเวณตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ลดความชื้นถ่านอัดแท่งด้วยระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 38.11- 39.10 ฐานเปียก จนเหลือความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ผลการศึกษาพบว่าการอบแห้งถ่านกะลา ตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถอบถ่านอัดแท่งให้มีความชื้นต่ำ กว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ได้ภายใน 2 วัน ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลเล็กน้อยต่อองค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) 25.48-27.43 MJ/kg ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และความ ร่วน การผสมตัวประสานแต่ละชนิดด้วยสัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่เหมาะ สำหรับการผลิตถ่านกะลาตาลโตนด อัดแท่ง เนื่องจากทำให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีความร่วนสูง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ที่สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ ชุมชนถ่านอัดแท่ง การใช้สัดส่วนตัวประสาน เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดควันมากขึ้นในระหว่างการลุกไหม้ของ ถ่านอัดแท่ง การผลิตถ่านกะลา ตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้กากมันที่สัดส่วนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสานทำให้ ต้นทุนการผลิต และระยะเวลาคืนทุนต่ำสุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็นสามขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการออกแบบเตาเผาถ่านและการไพโรไลซิสกะลาแมคคาเดเมียให้กลายเป็นถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ขั้นตอนการศึกษาสูตรของการผสมระหว่างถ่านจากกะลาแมคคาเดเมียกับตัวประสานและสารเติมแต่ง และการเตรียมถ่านอัดแท่ง และขั้นตอนที่การศึกษาต้นทุนการผลิต การทำแผนธุรกิจ เพื่อหาแนวทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากกะลาแมคคาเดเมียและการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และสังคม โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดการดำเนินการดังนี้

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. เศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร
2. แป้งมันสำปะหลัง
3. สารโพแทสเซียมไนเตรต
4. สารโซเดียมไนเตรต
5. น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เตาเผาถ่านภูมิปัญญาประดิษฐ์
2. เครื่องบดถ่าน
3. เครื่องอัดแท่งถ่านด้วยมือ
4. เครื่องอัดแท่งถ่านด้วยมอเตอร์
5. เตาเผาอุณหภูมิสูง
6. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟาเรด
7. เครื่องบอมกาลอริมิเตอร์
8. เครื่อง FTIR
9. เครื่อง SEM
10. อุปกรณ์เครื่องแก้ว ได้แก่ ปิเปต บิวเรต บีกเกอร์ ขวดปริมาตร เป็นต้น
11. อุปกรณ์พลาสติก ได้แก่ ถังน้ำพลาสติก ถาดพลาสติก ถังพลาสติกใส เป็นต้น

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การออกแบบเตาเผาถ่านและการไฟโรไลซิสกะลาแมคคาเดเมีย

ออกแบบเตาเผาถ่านจากถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร เพื่อทำกระบวนการไฟโรไลซิส (การกลั่นชีวมวลแข็ง) เพื่อเปลี่ยนชีวมวลเศษกะลาแมคคาเดเมียให้กลายเป็นถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ที่มีปริมาณควันไฟที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาน้อยที่สุด โดยศึกษาระยะเวลาในการไฟโรไลซิสที่เหมาะสม ตรวจสอบอุณหภูมิขณะทำการเผาถ่าน ลักษณะและคุณภาพของถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้ เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำถ่านอัดแท่งไว้วันต่อไปได้

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของถ่านจากได้จากการเผา

ทำการวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ดำเนินการดังนี้

3.3.2.1. การหาปริมาณความชื้น (moisture)

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ภายในวัสดุ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์และให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (drying oven) ที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ลดลง ดังสมการ

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

เมื่อ A และ B = น้ำหนัก (g) ของสารตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ ตามลำดับ

3.3.2.2. การหาปริมาณสารระเหยในตัวอย่าง (volatile matter)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยของถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักของสารตัวอย่างที่หายไปหลังจากเผาโดยใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace, model CWF13/13, Carbolite England) ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที โดยหาค่าความชื้นออก มีวิธีการดังนี้ เผาด้วยกระบือพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลานาน 3 h ปลดทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งถ่านที่แห้งสนิทหรือใช้ถ่านตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้วหนัก 1.0 g (โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปในถ้วยกระบือและปิดฝา จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 7 นาที แล้วนำออกจากเตาเผาทันที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำจนกระทั่งถ่านตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณสารระเหยในถ่านตัวอย่าง จากสมการ

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

เมื่อ A และ B = น้ำหนัก (g) ของสารตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา ตามลำดับ

หมายเหตุ : หากใช้ถ้ำตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการหาค่าความชื้น ปริมาณสารระเหยจะหาได้จากร้อยละของน้ำหนักที่หายไป ลบด้วยร้อยละความชื้น

3.3.2.3. การหาปริมาณเถ้า (ash)

การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าของถ้ำตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3174 โดยเผาด้วยกระบือพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ จากนั้นชั่งถ้ำที่แห้งสนิทหรือใช้ถ้ำตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้ว หนัก 1.0 g (โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปในถ้ำด้วยกระบือและปิดฝา นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700-750 °C (เปิดฝาด้วยกระบือ) นาน 6 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำจนกระทั่งถ้ำตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณเถ้าในถ้ำตัวอย่าง จากสมการ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักถ้ำตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักถ้ำตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

3.3.2.4. การหาค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D3172 ซึ่งจะใช้ค่าที่หาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (ASTM D3173) ปริมาณเถ้า (ASTM D3174) และปริมาณสารระเหย (ASTM D3175) โดยใช้การคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

3.3.2.5 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM model JSM-6335F, JEOL Japan) และทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS ตลอดจนตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟลูออรีนทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR model Spectrum two, PerkinElmer USA)

3.3.2.6 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่านทำโดยใช้ 2 วิธี คือ การใช้เครื่องมือบอมคาร์ลอร์มิเตอร์ และการประมาณค่าจากสมการ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่

ก) การหาปริมาณความร้อนโดยวิธีบอมคาร์ลอร์มิเตอร์

การหาค่าความร้อน (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D5865 ทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter, รุ่น C6000 ยี่ห้อ IKA) ซึ่งตัวอย่าง 0.5- 1.0 กรัม (ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและการให้ค่าพลังงานความร้อน โดยค่าพลังงานความร้อน ไม่เกิน 40,000 J/g) จากนั้นนำตัวอย่างไปอัดเม็ด (สำหรับการวิเคราะห์ถ่านอัดแท่งทำโดยใช้เศษก้อนของถ่านอัดแท่งที่มีน้ำหนักไม่เกินที่กำหนด) แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง (โดยชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง) จากนั้นนำตัวอย่างที่อัดเม็ดแล้วใส่ลงในภาชนะเผาไหม้และผูกด้วยด้ายจุลชนวนระเบิดให้สัมผัสกับตัวอย่าง แล้วปิดฝาลูกบอมส์ จากนั้นที่โปรแกรมใส่ค่าน้ำหนักตัวอย่าง ภาชนะที่ใช้เผาไหม้ รูปแบบการวัดและวัสดุเพิ่มเติมที่ใช้ในการช่วยจุดระเบิดโดยไปที่โหมด Vessel/New measurement แล้วเลือกแบบการทดสอบ ตัดค่าพลังงานของด้ายจุดระเบิด (Firing cotton) ที่ใช้ในการจุดระเบิดโดยด้ายจุดระเบิด (Firing cotton) มีพลังงาน 50 J/g จากนั้นนำภาชนะเผาไหม้ใส่เข้าไปในตัวเครื่องโดยต้องสแกนลูกบอมส์กับตัวเครื่อง เมื่อสแกนได้แล้วนำลูกบอมส์ไปแบบไว้ที่ตัวเครื่อง กด Start เพื่อเริ่มการเผาไหม้ แสดงการเผาไหม้โดยดูจากค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เครื่องบอมส์แคลอรีมิเตอร์จะทำการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนโดยค่าพลังงาน เมื่อการเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ นำภาชนะเผาไหม้ออกมาทำความสะอาดเพื่อเตรียมวัดตัวอย่างถัดไปหรือปิดเครื่อง เมื่อเลิกใช้งานทุกครั้งควรปิดวาล์วหัวถังออกซิเจนเสมอ

ข) การหาปริมาณความร้อนโดยวิธีการประมาณจากค่า proximate analysis

จากแนวคิดใหม่ของ Nhuchhen and Salam (2012) ได้สร้างสมการเพื่อประมาณค่าความร้อนสูง (High heating value, HHV) จากความสัมพันธ์กับค่าร้อยละของคาร์บอนคงตัว ร้อยละของสารระเหยได้ และร้อยละของเถ้า โดยความสัมพันธ์ของ linear correlation และ non-linear correlation ไว้ดังนี้

- สมการตามความสัมพันธ์แบบ linear correlation

$$HHV = 19.2880 - 0.2135x (VM/FC) + 0.0234 x (FC/ASH) - 1.9584 x (ASH/VM)$$

- สมการตามความสัมพันธ์แบบ non-linear correlation

$$\begin{aligned} HHV = & 20.7999 - 0.3214 x (VM/FC) + 0.0051 x (VM/FC)^2 - 11.2277 x (ASH/VM) \\ & + 4.4953 x (ASH/VM)^2 - 0.7223 x (ASH/VM)^3 + 0.0383 x (ASH/VM)^4 \\ & + 0.0076 x (FC/ASH) \end{aligned}$$

เมื่อ VM = ปริมาณร้อยละของสารระเหย

FC = ปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัว

ASH = ปริมาณร้อยละของเถ้า

3.3.3 ศึกษาสูตรของการผสมระหว่างถ่านจากกะลาแมคคาเดเมียกับตัวประสานและสารเติมแต่ง และการเตรียมถ่านอัดแท่ง

ในการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย คือ

- 1) การศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่งในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องอัดแท่งถ่านแบบมือหมุน จากนั้นศึกษาสมบัติของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้แต่ละสูตรการเตรียมเพื่อหาสูตรการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน
- 2) การศึกษาการเตรียมถ่านอัดแท่งในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน โดยทำการศึกษาการเตรียมถ่านอัดแท่งจากสูตรที่เหมาะสมในขั้นตอนแรก ร่วมกับกลุ่มตัวแทนเกษตรกรเพื่อหาแนวทางในการเตรียมถ่านอัดแท่งที่สามารถทำได้จริงในระดับชุมชน จากนั้นทำการศึกษาสมบัติของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งไร้ควันจากกะลาแมคคาเดเมีย

ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ) ตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 ดังสมการที่ 1 เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (g/cm^3) m คือ น้ำหนัก (g) และ V คือ ปริมาตร (cm^3) ของถ่านอัดแท่งตามลำดับ

$$\rho = \frac{m}{V}$$

การตรวจสอบอัตราการเผาไหม้ (การลามไฟ) ระยะเวลาการติดไฟ และลักษณะของการเผาไหม้ ได้แก่ การแตกประทุ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และปริมาณ pm 2.5 โดยการวัดในระบบกึ่งปิด โดยมีสภาพอากาศถ่ายเทและไม่มีลมพัดดังภาพที่ 2 และตรวจวัดค่า CO, CO₂ และ pm 2.5 ด้วยเครื่องวัดคุณภาพอากาศ (Air quality detector, model VT-9IN1, RoHS, China)

3.3.5 ศึกษาต้นทุนการผลิต การทำแผนธุรกิจ เพื่อหาแนวทางการ จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัด แท่งไร้ควันจากกะลาแมคคาเดเมีย

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาต้นทุนการผลิตถ่านอัดแท่ง การทำแผนธุรกิจ Business Model Canvas ของผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ได้ และช่องทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ตลอดจนการจัดอบรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่เกี่ยวข้อง

3.3.6 การศึกษาความพึงพอใจต่อการกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ทำการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งาน จากผู้ที่สนใจเข้าร่วมการอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง การใช้งานและคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่ได้

บทที่ 4

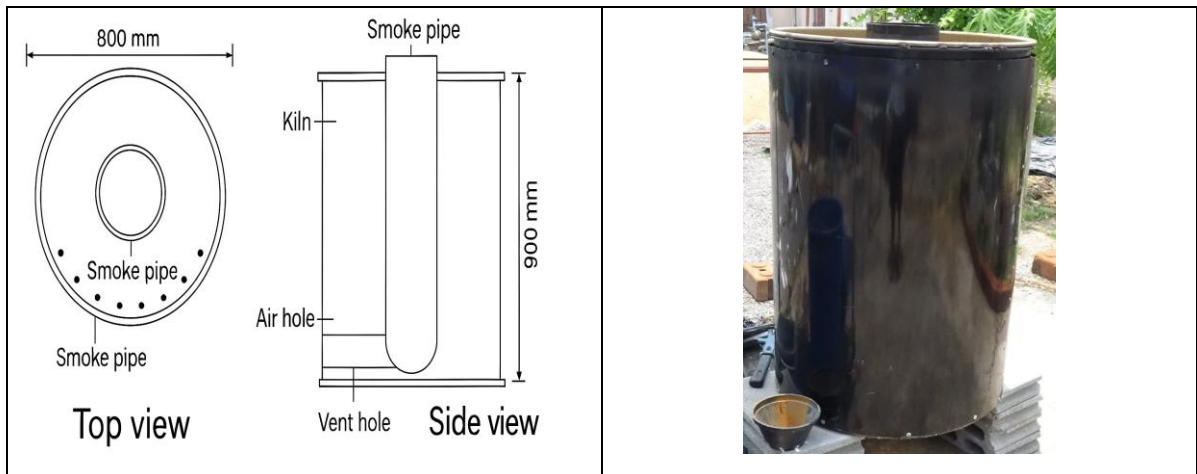
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ขั้นตอนของการวิจัยในครั้งนี้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ๆ คือ ขั้นตอนที่ 1) การออกแบบเตาเผาถ่านและการไฟโรไลซิสกะลาแมคคาเดเมียให้กลายเป็นถ่านกะลาแมคคาเดเมีย และ ขั้นตอนที่ 2) ศึกษาสูตรของการผสมระหว่างถ่านจากกะลาแมคคาเดเมียกับตัวประสานและสารเติมแต่ง และการเตรียมถ่านอัดแท่ง และขั้นตอนที่ 3) การศึกษาต้นทุนการผลิต การทำแผนธุรกิจ เพื่อหาแนวทางการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากกะลาแมคคาเดเมีย และการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และสังคม โดยแต่ละขั้นตอนมีการดำเนินการดังนี้ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาในแต่ละขั้นตอน เป็นดังนี้คือ

4.1 การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

4.1.1 ผลการศึกษาการออกแบบเตาเผาถ่าน

จากการศึกษาการออกแบบเตาเผาถ่านเพื่อใช้ในการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง โดยใช้เตาเผาประดิษฐ์ ขนาด 200 ลิตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เตาประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร สำหรับใช้เผาเศษกะลาแมคคาเดเมีย

4.1.2 ผลการศึกษาการเตรียมถ่าน

จากการศึกษาการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง โดยใช้เตาเผาประดิษฐ์ ขนาด 200 ลิตร แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



เศษกะลาแมคคาเดเมีย



การบรรจุวัสดุลงเตาเผา



การเผาถ่านด้วยเตาประดิษฐ์



ถ่านที่ได้จากการเผา

รูปที่ 4.2 การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งโดยใช้เตาประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร

การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งซึ่งบรรจุเศษกะลาปริมาณ 20 kg ลงในเตาประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร จากนั้นทำการให้ความร้อนโดยใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงพบว่าการเผาใช้ระยะเวลาประมาณ 5 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดของการเผาวัตถุภายในเตาประมาณ 700 °C อุณหภูมิข้างเตาประมาณ 600 °C โดยการเผาเกิดควันขึ้นระหว่างการเผาเล็กน้อย จากนั้นเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นข้ามคืนแล้ว เมื่อเปิดเตาจะได้ถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ซึ่งเมื่อนำไปชั่งพบว่าได้ถ่านน้ำหนักรวมประมาณ 10 kg คิดเป็นผลผลิตร้อยละ 50

4.1.3 ผลการศึกษา proximate analysis

จากการวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ (proximate properties) ซึ่งได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture) ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter, VM) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) ของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

ชนิดของถ่าน	ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบ (% wt)			
	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
ถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	5.96 ± 0.76	9.57 ± 0.36	5.79 ± 0.23	78.68 ± 0.39

จากผลการศึกษาพบว่า ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมียมีค่าปริมาณความชื้นร้อยละ 5.96 ± 0.76 มีค่าปริมาณสารระเหยได้อยู่ร้อยละ 9.57 ± 0.36 มีค่าปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.79 ± 0.23 และมีค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 78.68 ± 0.39

4.1.4 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

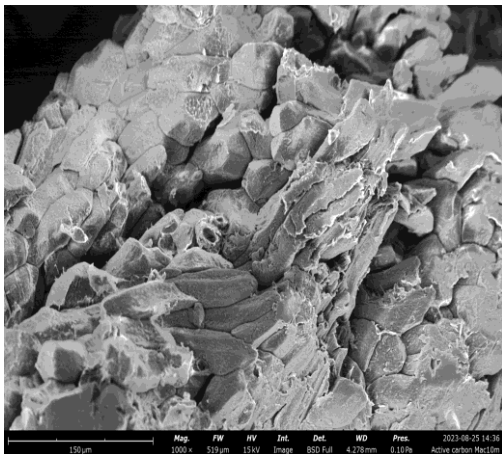
ลักษณะทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยการเผาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะที่เหมาะสม โดยลักษณะทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้และลักษณะของพื้นผิวที่ตรวจสอบโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลก่อนเผาแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



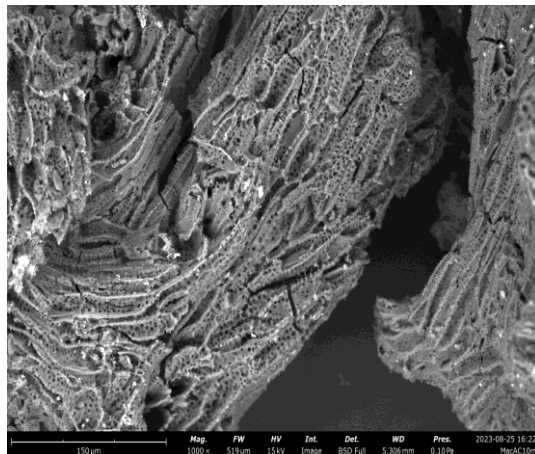
(ก)



(ข)



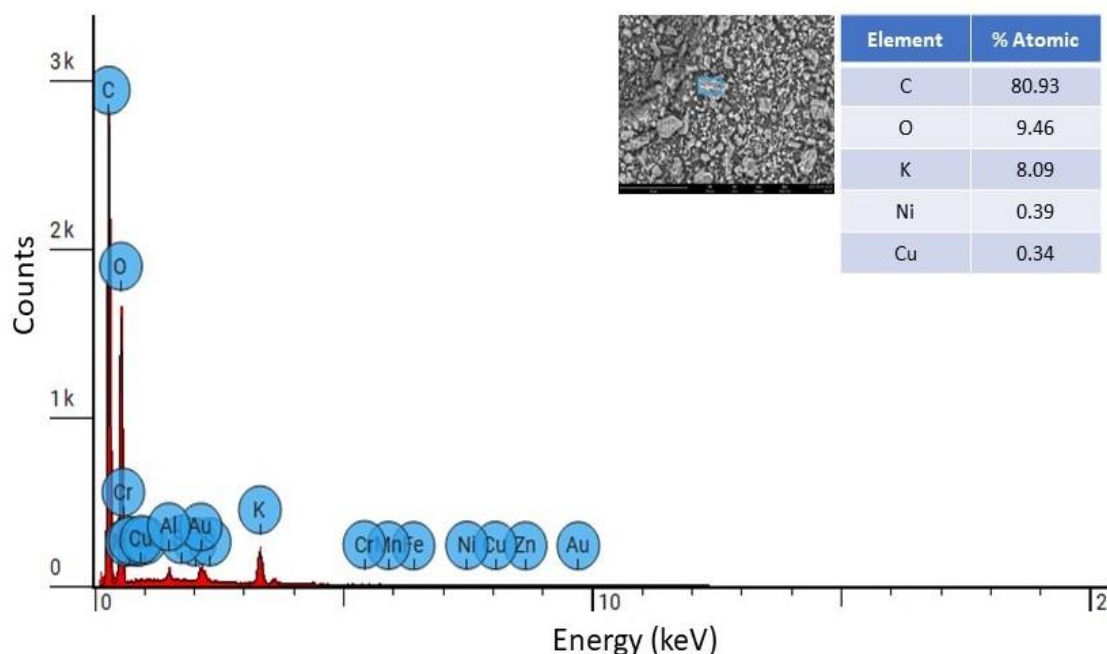
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) พังเศษกะลาแมคคาเดเมีย (ข) ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย (ค) ภาพถ่าย SEM ของพังเศษกะลาแมคคาเดเมีย และ (ง) ภาพถ่าย SEM ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย ตามลำดับ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีหลัก ๆ ที่อยู่ในถ่านที่เตรียมได้จากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยใช้เทคนิค SEM-EDS ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4

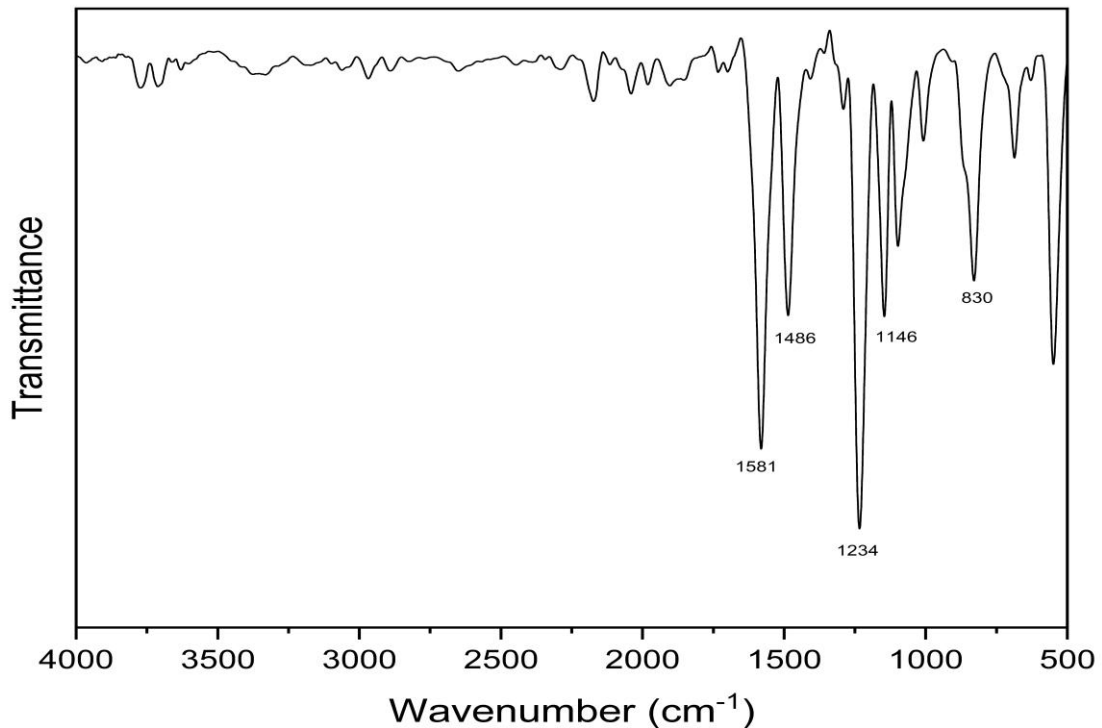


รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีจากเทคนิค SEM-EDS ที่พบในถ่านที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณขององค์ประกอบของอะตอมธาตุคาร์บอน (C) และ ธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สามารถใช้บอกถึงการกลายสภาพจากสารชีวมวลไปเป็นถ่านแกรไฟต์ได้เมื่อทำการเผาเศษกะลาแมคคาเดเมียที่สภาวะที่เหมาะสม หลังกระบวนการไพโรไลซิสพบว่าถ่านที่เตรียมได้จากเศษกะลาแมคคาเดเมียมีร้อยละของอะตอมคาร์บอนและออกซิเจน เท่ากับ 80.93 และ 9.46 ตามลำดับ แสดงให้ทราบว่าการเผาวัสดุชีวมวลที่สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ มีการกลายสภาพจากวัสดุชีวมวลเศษกะลาแมคคาเดเมียไปเป็นสารประกอบแกรไฟต์ ซึ่งเป็นถ่านที่มีคุณภาพสำหรับการนำไปใช้เตรียมเป็นถ่านอัดแท่งได้ต่อไป

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ FTIR

จากการนำตัวอย่างถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียไปศึกษาหามุมฟังก์ชันของถ่านที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิค FTIR ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะสเปกตรัมของถ่านแกรไฟต์ที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ด้วยเทคนิค FTIR

จากสเปกตรัมของถ่านแกรไฟต์ที่เตรียมได้จากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR พบว่ามีการแสดงพีคที่ wavenumber ที่ 1617 cm^{-1} และ 1508 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงฟังก์ชันของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนในวงแอโรมาติก ($\text{C}=\text{C}$ aromatic) และพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนตามลำดับ ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้จะเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักในแกรไฟต์ แสดงว่าวิธีการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะดังกล่าว สามารถเปลี่ยนรูปของชีวมวลเศษกะลาแมคคาเดเมียไปเป็นถ่านแกรไฟต์ได้ดี และถ่านที่ได้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เตรียมถ่านอัดแท่งได้ต่อไป

4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

จากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่านที่เตรียมจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ผลการศึกษาที่ได้พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ $7.253 \pm 0.032\text{ kcal/g}$ และจากการการใช้เทคนิควิธีการคำนวณหาพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการคำนวณหาพลังงานความร้อนของ Nhuchhem et al. (2012) โดยอาศัยปริมาณองค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี proximate analysis (dried basis) ซึ่งจากวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ ปริมาณ

สารระเหยได้ (VM) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) ที่ใช้ในการคำนวณและผลการคำนวณค่าความร้อนของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว (dry basis) และค่าความร้อนจากการคำนวณของถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่เตรียมได้

ชนิดของถ่าน	ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบ (% wt dry basis)			ค่าความร้อนคำนวณทางทฤษฎีโดย สมการ (kcal/g)	
	ปริมาณสาร ระเหยได้	ปริมาณ เถ้า	ปริมาณ คาร์บอนคงตัว	Linear correlation	Non-Linear correlation
ถ่านจากเศษ กะลาแมคคา เดเมีย	9.00	5.44	85.56	4.4277	3.7403

4.2 การศึกษาสูตรผสมถ่านอัดแท่ง

4.2.1 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมพื้นฐาน

จากการศึกษาการเตรียมถ่านอัดแท่งจากถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง เมื่อทำการลดขนาดโดยการบดให้เป็นผงละเอียดแล้ว ได้ทำการเตรียมให้เป็นถ่านอัดแท่งโดยการใช้ส่วนผสมที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ใช้แป้งมันสำปะหลังทำหน้าที่เป็นสารประสาน (binder) เพื่อให้ผงถ่านจับตัวกันแน่น และใช้น้ำเพื่อให้ส่วนผสมมีความชื้นที่เพียงพอในการอัดให้เป็นแท่งถ่าน โดยอัตราส่วนการผสมที่ทำการศึกษา เป็นดังนี้

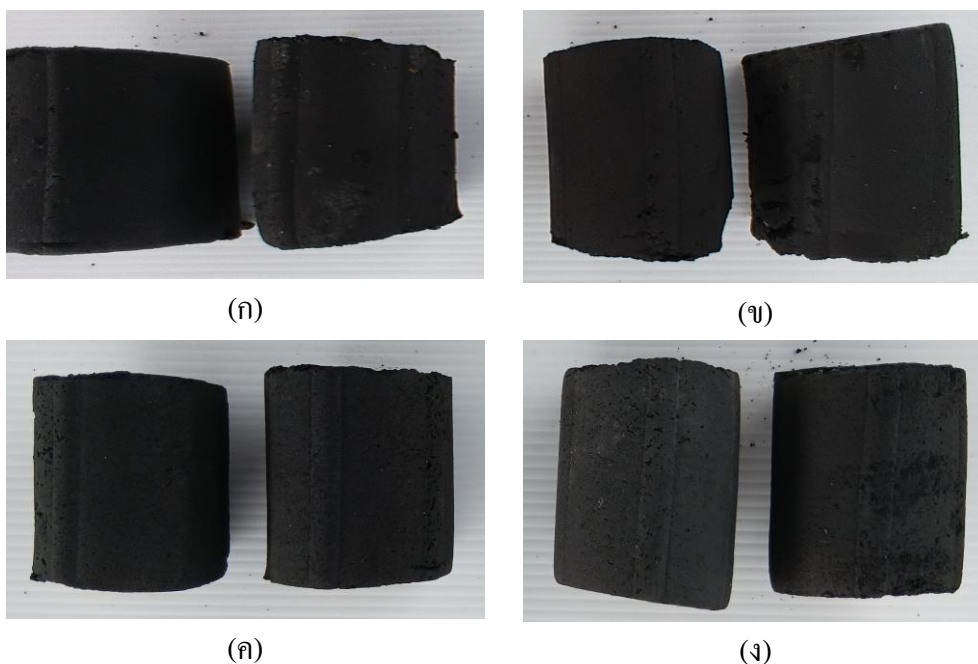
สูตรที่ 1 : ถ่าน 90% แป้งมันสำปะหลัง 5% น้ำ 5%

สูตรที่ 2 : ถ่าน 85% แป้งมันสำปะหลัง 10% น้ำ 5%

สูตรที่ 3 : ถ่าน 80% แป้งมันสำปะหลัง 15% น้ำ 5%

สูตรที่ 4 : ถ่าน 75% แป้งมันสำปะหลัง 20% น้ำ 5%

ถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้จากการใช้เครื่องอัดแท่งถ่านแบบมือหมุน ซึ่งใช้อัตราส่วนการผสมของส่วนประกอบตามสูตรต่าง ๆ ข้างต้น ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และผลการศึกษการเตรียมและสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐาน (ก-ง) สูตรการผสมที่ 1-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน

สมบัติที่ตรวจวัด	สูตรการผสมถ่านอัดแท่ง			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
การขึ้นรูป	ดีพอควร ถ่านจับตัวกันดี แต่เปราะเล็กน้อย	ดี ถ่านจับตัวกัน แน่นขึ้น	ดีมาก ถ่านจับตัวกัน แน่นไม่เปราะ	ดีที่สุด ถ่านจับตัวกันแน่น แข็งแรง
Density	สูง	ค่อนข้างสูง	ปานกลาง	ต่ำ
การติดไฟ	ติดไฟง่าย	ติดไฟง่ายปาน กลาง	ติดไฟยาก	ติดไฟยาก
ระยะเวลาการติดไฟ	นาน	ปานกลาง	สั้น	สั้น
ความร้อนติดไฟ	สูงสุด (~6,800- 7,000)	ค่อนข้างสูง (~6,200-6,500)	ปานกลาง (~5,500-5,800)	ต่ำ (~4,800-5,200)
การเกิดควันในรูป CO ₂	ต่ำ – การเผาไหม้ สมบูรณ์	ปานกลางต่ำ	ปานกลางสูง – การเผาไหม้ไม่ สมบูรณ์เต็มที่	สูง – ควันเยอะ เนื่องจากแป้งเผา ไหม้ไม่สมบูรณ์

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งโดยใช้สูตรผสมสูตรที่ 4 มีความสามารถในการขึ้นรูปดีที่สุด รองลงมาคือสูตรที่ 3 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 1 ตามลำดับ เนื่องจากสูตรที่ 4 มีการผสมแป้งมัน

สำปะหลังสูงสุดจึงทำให้ถ่านจับตัวกันแน่นและแข็งแรง เมื่อพิจารณาถึงความหนาแน่น การติดไฟง่าย เวลาการติดไฟนาน และให้ความร้อนสูงพบว่าสูตรการผสมสูตรที่ 1 ดีที่สุด รองลงมาคือสูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงการเกิดควันไฟในรูป CO_2 พบว่าสูตรที่ 1 มีควันไฟเกิดขึ้นน้อยกว่า สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังลงไปปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีควันเกิดมากขึ้น เนื่องจากแป้งเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสรุปได้ว่า

- สูตรที่ 1 เหมาะสำหรับการผลิตถ่านไร้ควันที่ต้องการค่าความร้อนสูง ใช้งานนาน และติดไฟง่าย เหมาะสำหรับงานครัวเรือนและเชิงพาณิชย์
- สูตรที่ 2 เป็นทางเลือกที่ดี หากต้องการความแข็งแรงของแท่งถ่านมากขึ้น แต่ยังคงคุณภาพการเผาไหม้ได้ดี
- สูตรที่ 3 และ 4 แม้จะได้รับความแข็งแรงของแท่งถ่านสูง แต่ประสิทธิภาพด้านการเผาไหม้และค่าความร้อนลดลง มีควันมากขึ้น ไม่เหมาะสำหรับเป้าหมาย "ไร้ควัน"

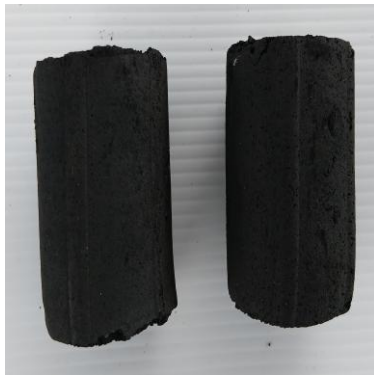
ดังนั้นหากพิจารณาถึงการสมดุลที่ดีระหว่าง "โครงสร้างแข็งแรง" และ "ประสิทธิภาพการเผาไหม้" สูตรที่ 1 และ สูตรที่ 2 ถือว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควันคุณภาพสูง

4.2.2 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมพื้นฐาน+ KNO_3

จากสูตรพื้นฐานสำหรับใช้เตรียมถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ได้ทำการพัฒนาความสามารถในการเผาไหม้เพื่อลดปริมาณควันไฟที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มสารที่ช่วยเผาไหม้ คือ สารโพแทสเซียมไนเตรด (Potassium nitrate, KNO_3) ลงไปในสูตรการผสมของถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ โดยสาร KNO_3 ซึ่งเป็นสารช่วยเผาไหม้ จะมีผลโดยตรงต่อ การติดไฟ ค่าความร้อน การเกิดควัน และอัตราการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยสูตรการผสมที่ศึกษาเป็นดังนี้

สูตรที่ 1 :	ถ่าน 85%	แป้งมันสำปะหลัง 8%	KNO_3 2%	น้ำ 5%
สูตรที่ 2 :	ถ่าน 85%	แป้งมันสำปะหลัง 7%	KNO_3 3%	น้ำ 5%
สูตรที่ 3 :	ถ่าน 80%	แป้งมันสำปะหลัง 6%	KNO_3 4%	น้ำ 5%

ถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้จากการใช้เครื่องอัดแท่งถ่านแบบมือหมุน ซึ่งใช้อัตราส่วนการผสมของส่วนประกอบตามสูตรต่าง ๆ ข้างต้น ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และผลการศึกษาการเตรียมและสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 ลักษณะของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐานผสม KNO_3 (ก-ค) สูตรการผสมที่ 1-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน+ KNO_3

สมบัติที่ตรวจวัด	สูตรการผสมถ่านอัดแท่ง		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
การขึ้นรูป	ดี แป้งมากช่วยยึดเกาะ ได้ดี	ค่อนข้างดี ถ่านจับตัวกันแน่น	ปานกลาง ถ่านจับตัวกัน มี ความเปราะ
Density	สูง โครงสร้างแน่น	สูง สมดุลดี	ปานกลาง มีโพรงมากขึ้น
การติดไฟ	ติดไฟง่าย	ติดไฟง่ายมาก	ติดไฟง่ายที่สุด
ระยะเวลาการติดไฟ	นาน เผาไหม้เสถียร	นานปานกลาง เผาไหม้เร็วขึ้น	สั้น เผาไหม้เร็วที่สุด
ความร้อนติดไฟ	สูง (~6,800 kcal/kg)	ค่อนข้างสูง (~6,600 kcal/kg)	ปานกลาง (~6,200 kcal/kg)
การเกิดควันในรูป CO_2	ต่ำ การเผาไหม้สมบูรณ์	ต่ำ เผาไหม้ค่อนข้าง สมบูรณ์	ปานกลาง มีการเกิดควันบ้าง เล็กน้อย

จากตารางที่ 4.4 พบว่าคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งโดยใช้สูตรผสมแต่ละสูตรมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยหากพิจารณาถึงการขึ้นรูป ความหนาแน่นและความแข็งแรงของถ่านอัดแท่งพบว่า สูตรที่ 1 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ตามลำดับ หากพิจารณาถึงความเร็วในการติดไฟพบว่าสูตรที่ 3 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 1 ตามลำดับ สำหรับความคงตัวของการเผาไหม้ ค่าความ

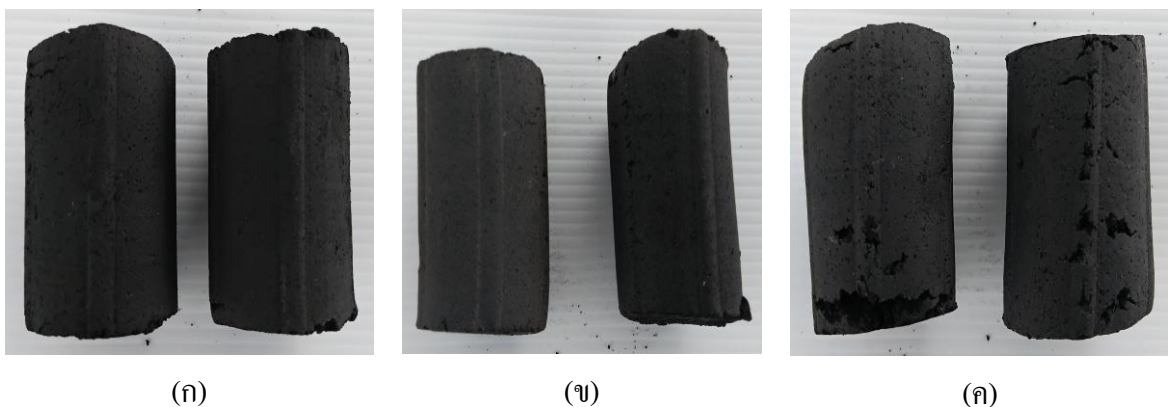
ร้อน และการเกิดควันน้อย (เผาไหม้สมบูรณ์) พบว่าสูตรที่ 1 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ตามลำดับ ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสรุปได้ว่าสูตรที่ 1 เป็นสูตรที่ สมดุลที่สุด เหมาะสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ต้องการความร้อนสูง เผาไหม้นาน ควันน้อย และโครงสร้างแน่น สำหรับสูตรที่ 2 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการติดไฟได้ไวขึ้นเล็กน้อย เช่น เตาย่าง หรือใช้งานนอกสถานที่ และสูตรที่ 3 ให้การติดไฟเร็วที่สุด แต่เผาไหม้หมดเร็ว โครงสร้างอ่อนกว่า เหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง เช่น จุดไฟด่วน หรือทำเป็น “ถ่านเริ่มต้นไฟ” (starter charcoal) ดังนั้นหากพิจารณาถึงเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ ถ่านไร้ควัน สำหรับใช้ในครัวเรือนหรือเชิงพาณิชย์ทั่วไป สูตรที่ 1 จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ความร้อนสูง จุดติดง่าย ไม่เปรอะ และปล่อยควันน้อยมากจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

4.2.3 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมพื้นฐาน+ NaNO_3

จากสูตรพื้นฐานสำหรับใช้เตรียมถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ได้ทำการพัฒนาความสามารถในการเผาไหม้เพื่อลดปริมาณควันไฟที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มสารที่ช่วยเผาไหม้ คือ สารโซเดียมไนเตรด (Sodium nitrate, NaNO_3) ลงไปในสูตรการผสมของถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ โดยสาร NaNO_3 ซึ่งเป็นสารช่วยเผาไหม้ จะมีผลโดยตรงต่อ การติดไฟ ค่าความร้อน การเกิดควัน และอัตราการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยสูตรการผสมที่ศึกษา เป็นดังนี้

สูตรที่ 1 :	ถ่าน 85%	แป้งมันสำปะหลัง 8%	NaNO_3 2%	น้ำ 5%
สูตรที่ 2 :	ถ่าน 85%	แป้งมันสำปะหลัง 7%	NaNO_3 3%	น้ำ 5%
สูตรที่ 3 :	ถ่าน 80%	แป้งมันสำปะหลัง 6%	NaNO_3 4%	น้ำ 5%

ถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้จากการใช้เครื่องอัดแท่งถ่านแบบมือหมุน ซึ่งใช้อัตราส่วนการผสมของส่วนประกอบตามสูตรต่าง ๆ ข้างต้น ลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และผลการศึกษาการเตรียมและสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.8 ลักษณะของถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐานผสม NaNO_3 (ก-ค) สูตรการผสมที่ 1-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่ง สูตรพื้นฐาน+ NaNO_3

สมบัติที่ตรวจวัด	สูตรการผสมถ่านอัดแท่ง		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
การขึ้นรูป	ดี แป้งสูงพอสมควรช่วย ยึดเกาะได้ดี	ค่อนข้างดี ถ่านจับตัวกันแน่น	ปานกลาง ถ่านจับตัวกัน มี ความเปราะ
Density	สูง โครงสร้างแน่น	ค่อนข้างสูง	ปานกลาง มีโพรงมากขึ้น
การติดไฟ	ติดไฟง่าย NaNO_3 ช่วยเร่ง ออกซิเดชัน	ติดไฟง่ายมาก จุดติดไฟเร็ว	ติดไฟง่ายที่สุด เผาไหม้เริ่มต้นทันที
ระยะเวลาการติดไฟ	นาน เผาไหม้เสถียร	นานปานกลาง เผาไหม้เร็วขึ้น	สั้น เผาไหม้เร็วที่สุด
ความร้อนติดไฟ	สูง (~6,800 kcal/kg)	ค่อนข้างสูง (~6,500 kcal/kg)	ปานกลาง (~6,000 kcal/kg)
การเกิดควันในรูป CO_2	ต่ำ การเผาไหม้สมบูรณ์	ต่ำ เผาไหม้ค่อนข้าง สมบูรณ์	ปานกลาง เผาไหม้ไวแต่มีการ เกิดควันบ้างเล็กน้อย

จากตารางที่ 4.5 พบว่าคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งโดยใช้สูตรผสมแต่ละสูตรมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยหากพิจารณาถึงการขึ้นรูป ความหนาแน่นและความแข็งแรงของถ่านอัดแท่งพบว่า สูตรที่ 1 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ตามลำดับ หากพิจารณาถึงความเร็วในการติดไฟพบว่าสูตรที่ 3 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 1 ตามลำดับ สำหรับความคงตัวของถ่านเผาไหม้ ค่าความร้อน และการเกิดควันน้อย (เผาไหม้สมบูรณ์) พบว่าสูตรที่ 1 ดีกว่าสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ตามลำดับ ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสรุปได้ว่าสูตรที่ 1 เป็นสูตรที่ สมดุลที่สุด เผาไหม้ได้ดี มีโครงสร้างแน่น และให้ค่าความร้อนสูง เหมาะสำหรับใช้งานทั่วไป เช่น ทำอาหาร ใช้ในครัวเรือน สำหรับสูตรที่ 2 มีการเผาไหม้เร็วขึ้น เหมาะสำหรับใช้งานที่ต้องการจุดไฟไว เช่น เตาหุงข้าว เตาปิ้งย่าง มีโครงสร้างที่ดีแต่เริ่มมีความเปราะมากกว่าสูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 จุดไฟเร็วที่สุด แต่ไหม้หมดเร็วและโครงสร้างถ่านอ่อน เหมาะสำหรับการใช้เป็นถ่านติดไฟไว (starter briquette) และอาจต้องใช้ร่วมกับถ่านหลักที่เผาไหม้นานกว่า ดังนั้นหากพิจารณาถึงเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ การผลิตถ่านไว้ควันทิ้งไว้เพื่อใช้งานทั่วไป ที่เผาไหม้นาน ควันน้อย จุดไฟง่าย และมีค่าความร้อนสูง สูตรที่ 1 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด

4.3 การศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง

จากการศึกษาสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่งที่ได้จากหัวข้อที่ผ่านมาจำนวน 3 สูตร ที่มีความเหมาะสมในการใช้ผลิตถ่านอัดแท่งไว้คั่วเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมระดับครัวเรือนได้แก่

สูตร A (สูตรพื้นฐาน) : ถ่าน 90% แป้งมันสำปะหลัง 8% น้ำ 5%

สูตรที่ B : ถ่าน 85% แป้งมันสำปะหลัง 8% NaNO_3 2% น้ำ 5%

สูตรที่ C : ถ่าน 85% แป้งมันสำปะหลัง 8% KNO_3 2% น้ำ 5%

ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนร่วมกับตัวแทนของกลุ่มเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการวิจัย ผลการศึกษาที่ได้ เป็นดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน

การเตรียมถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน ทำโดยการจัดการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับการทำถ่านอัดแท่งโดยใช้เศษกะลาแมคคาเดเมียซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่น ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นตอนการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียให้เป็นถ่าน ขั้นตอนการบดถ่าน และขั้นตอนการอัดแท่งถ่าน โดยจากการศึกษาร่วมกับตัวแทนกลุ่มเกษตรกรที่สนใจในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย เพื่อหาขั้นตอนและกระบวนการผลิตที่สอดคล้องกับศักยภาพและความต้องการของกลุ่มเกษตรกรโดยใช้กระบวนการ R&D ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เตาเผาถ่านถั่วถั่วขนาดเล็ก 200 ลิตร

ในขั้นตอนของการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง ทำโดยใช้เตาเผาถ่านประดิษฐ์ขนาด 200 ลิตร ซึ่งได้ออกแบบระบบการไหลเวียนของควันที่เกิดขึ้นย้อนกลับไปรวมเผาในห้องเผาไหม้ ทำให้ในระหว่างของการเผาถ่านมีควันไฟเกิดขึ้นน้อยมาก โดยการเผาเศษกะลาแมคคาเดเมียหนัก 60 กิโลกรัม ใช้เผาตั้งแต่การจุดเตาจนแล้วเสร็จใช้เวลานานประมาณ 4 ชั่วโมง มีอุณหภูมิสูงสุดของเตาที่วัดได้อยู่ประมาณ $900-1200^{\circ}\text{C}$ เมื่อเตาเย็นลงแล้วถ่านที่เผาได้มีน้ำหนักประมาณ 20 กิโลกรัม คิดเป็นผลผลิตถ่านร้อยละ 33 ของวัตถุดิบที่ใช้ และถ่านที่ได้มีคุณภาพที่ดี



รูปที่ 4.10 ถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ขั้นตอนการบดถ่าน ทำโดยการใช้เครื่องบดถ่าน หรือเครื่องบดเมล็ดกาแฟ เพื่อลดขนาดของ ถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย ซึ่งผงถ่านละเอียดที่ได้มีขนาดประมาณ 50-200 mesh ซึ่งสามารถคัดขนาดได้ โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 200 mesh โดยผงถ่านที่มีความละเอียดจะมีผลต่อการดูดซับน้ำ การขึ้นรูป ความสวยงาม และความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง โดยการใช้ผงที่ละเอียดทำให้ถ่านอัดแท่งมีผิวที่ สวยงาม มีความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งสูง แต่มีข้อเสียคือการทำให้ถ่านอัดแท่งติดไฟยากขึ้น



รูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนของการผสมถ่านตามสูตรการผสมที่กำหนด การนวดเศษถ่านและการอัดแท่ง เพื่อขึ้นรูปถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

ขั้นตอนการผสมสูตรเตรียมถ่านอัดแท่ง โดยขั้นตอนนี้มีความสำคัญอย่างมากในการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งและคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่ได้ ซึ่งสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่งที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 สูตร ได้แก่

-สูตร A (สูตรพื้นฐาน) ผสมถ่าน: แป้งมันสำปะหลัง: น้ำ ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 80: 5: 15

-สูตร B ผสมถ่าน: แป้งมันสำปะหลัง: NaNO_3 : น้ำ ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 80: 5: 1: 14

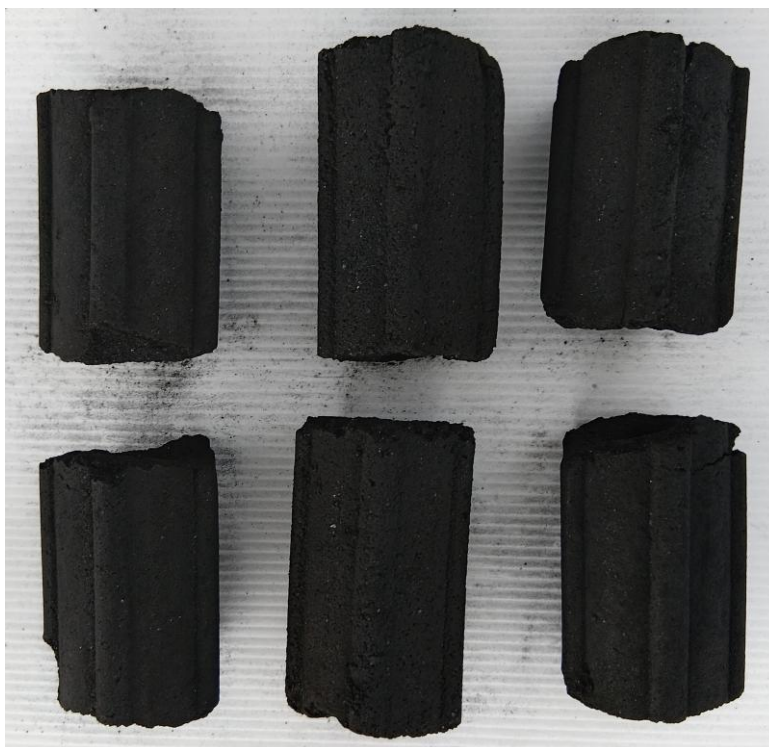
-สูตร C ผสมถ่าน: แป้งมันสำปะหลัง: KNO_3 : น้ำ ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 80: 5: 1: 14

โดยการผสมส่วนประกอบที่ใช้ในแต่ละสูตรต้องผสมให้เข้ากันและทำการนวดถ่านให้คลุกเคล้ากันจนสามารถปั้นเป็นก้อนได้

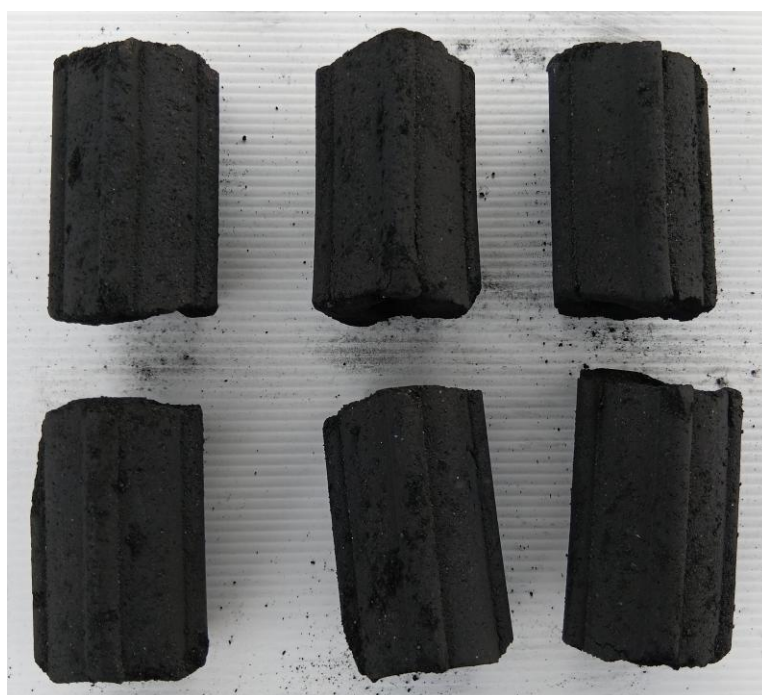
ขั้นตอนการอัดแท่งถ่าน ทำโดยใช้เครื่องอัดแท่งถ่านซึ่งมีมีดตัดแท่งถ่านอัตโนมัติตามความยาวที่กำหนด โดยการอัดถ่านเริ่มแรกต้องนำถ่านที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัดแท่งถ่านเพื่ออัดถ่านให้เข้ากันอีกครั้งและลดปริมาณความชื้นให้ลดลง ซึ่งอาจทำการนวดถ่าน 2-3 รอบ จนถ่านที่ได้มีการจับตัวกันมากขึ้น ออกมาจากเครื่องจับตัวเป็นก้อนได้มากขึ้น แต่สามารถบิบบแตกได้ง่าย จากนั้นนำมีดตัดอัตโนมัติตัดถ่าน แล้วทำการอัดถ่านเป็นก้อนพร้อมตัดให้มีขนาดเท่ากันโดยใช้เครื่องตัดแท่งถ่านอัตโนมัติ แล้วนำถ่านอัดแท่งที่ได้ไปตากให้แห้งภายในโดมที่ใช้ตากแห้ง (เพื่อไม่ให้ถ่านอัดแท่งโดนแดดโดยตรง ซึ่งจะทำให้แตกหักได้ง่าย) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน จะได้ถ่านอัดแท่งที่พร้อมนำไปจำหน่าย



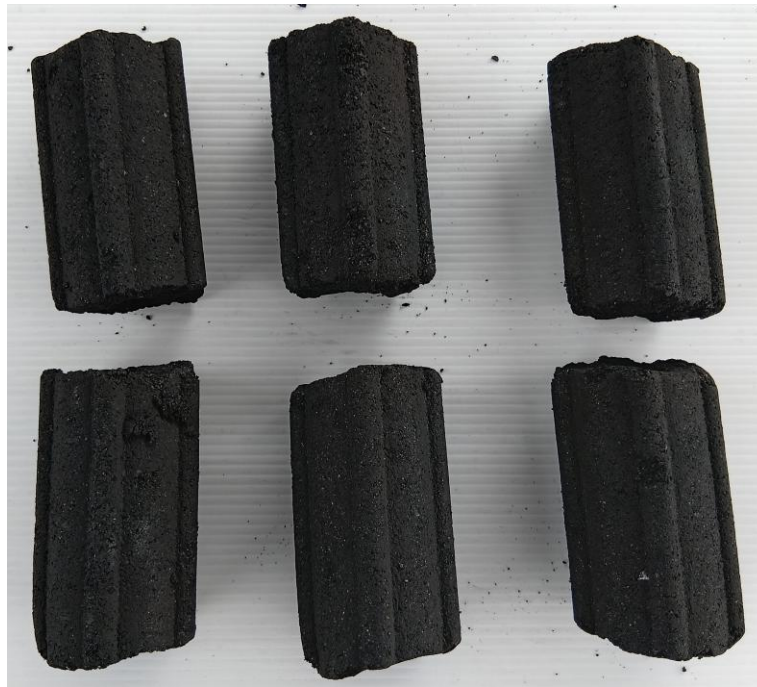
รูปที่ 4.12 ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ได้จากกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน และการทดลองจุดติดไฟเพื่อให้ความร้อน



รูปที่ 4.13 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐาน สูตร A



รูปที่ 4.14 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐานผสม NaNO_3 สูตร B



รูปที่ 4.15 ลักษณะของถ่านอัดแท่งระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนสูตรพื้นฐานผสม KNO_3 สูตร C

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียที่เตรียมขึ้นจากสูตรการผสมผงถ่าน น้ำ ตัวประสาน และสารช่วยติดไฟ จำนวน 3 สูตร และลักษณะของการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งทั้ง 3 สูตร ได้แก่ การแตกประทุขณะติดไฟ อัตราเร็วของการลามไฟ ระยะเวลาในการติดไฟ การเกิดควันไฟ (ค่า $\text{pm}_{2.5}$) ปริมาณแก๊ส CO และแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพและสมบัติการติดไฟของถ่านอัดแท่ง

สมบัติที่ตรวจสอบ	ชนิดของถ่านอัดแท่ง		
	ถ่านอัดแท่งสูตร A	ถ่านอัดแท่งสูตร B	ถ่านอัดแท่งสูตร C
ลักษณะภายนอก	ผิวเรียบ มีรอยแตกร้าวเล็กน้อย	ผิวเรียบ มีรอยแตกร้าวเล็กน้อย	ผิวเรียบ มีรอยแตกร้าวเล็กน้อย
ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	0.534 ± 0.050	0.549 ± 0.045	0.563 ± 0.056
อัตราเร็วการลามไฟ (g/min)	0.440 ± 0.009	0.570 ± 0.010	0.588 ± 0.017
ระยะเวลาการเผาไหม้ (min)	126 ± 5.0	115 ± 3.0	110 ± 3.0
ค่าเฉลี่ยปริมาณ $\text{pm}_{2.5}$ ($\mu\text{g/m}^3$)	23.7 ± 2.2	19.7 ± 1.7	19.3 ± 2.0
ค่าเฉลี่ยปริมาณแก๊ส CO (ppm)	5.3 ± 3.0	4.1 ± 2.6	3.8 ± 2.7
ค่าเฉลี่ยปริมาณแก๊ส CO_2 (ppm)	667.5 ± 100.6	633.5 ± 119.8	622.1 ± 112.1

จากผลการศึกษาพบว่าถ่านอัดแท่งทุกสูตรที่เตรียมได้มีลักษณะภายนอกที่ผิวเรียบ มีรอยแตกร้าวบ้างเล็กน้อย มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.534\text{-}0.563 \text{ g/cm}^3$ ถ่านอัดแท่งสูตร C (ผสมสารช่วยติด KNO_3) มีอัตราการลามไฟสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ถ่านอัดแท่งสูตร B (ผสมสารช่วยติด NaNO_3) และถ่านอัดแท่ง

สูตร A (สูตรพื้นฐาน) ตามลำดับ โดยถ่านอัดแท่งทั้ง 3 สูตร มีระยะเวลาการติดไฟเกินกว่า 110 นาที โดยถ่านอัดแท่งที่มีค่าเฉลี่ยอนุภาค pm 2.5 เกิดขึ้นน้อยที่สุดได้แก่ ถ่านอัดแท่งสูตร C ถ่านอัดแท่งสูตร B และถ่านอัดแท่งสูตร A ตามลำดับ โดยถ่านอัดแท่งที่มีค่าเฉลี่ยปริมาณแก๊ส CO เกิดขึ้นน้อยที่สุดได้แก่ ถ่านอัดแท่งสูตร C ถ่านอัดแท่งสูตร B และถ่านอัดแท่งสูตร A ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารใช้สารช่วยติดเติมลงไปในการผสมถ่านอัดแท่ง สามารถช่วยให้เกิดการลามไฟบนผิวถ่านได้ดี ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น และมีปริมาณค่าแก๊ส CO₂ เกิดขึ้นช่วง 622.1-667.5 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยและปกติ

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติแบบประมาณของถ่านอัดแท่ง

จากการวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ (proximate properties) ซึ่งได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture) ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter, VM) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) ของถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านอัดแท่งที่เตรียมได้

ชนิดของถ่าน	ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบ (% wt)			
	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
ถ่านอัดแท่งชนิด A	7.32 ± 0.24	10.29 ± 0.41	6.85 ± 0.18	75.54 ± 0.08
ถ่านอัดแท่งชนิด B	7.52 ± 0.10	10.40 ± 0.42	6.44 ± 0.21	75.65 ± 0.54
ถ่านอัดแท่งชนิด C	7.23 ± 0.23	11.46 ± 0.50	6.64 ± 0.11	74.67 ± 0.62

จากผลการศึกษาพบว่าถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียทั้ง 3 สูตร มีองค์ประกอบหลักที่สอดคล้องกันและแสดงถึงถ่านอัดแท่งที่ได้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีสำหรับใช้งานระดับชุมชน โดยการที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวสูง (74.7-75.7%) แสดงว่าเป็นถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อการให้พลังงานต่อหน่วยมวลสูงและการเผาไหม้นาน มีค่าความชื้นอยู่ประมาณ 7-7.5% ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่ไม่เกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งกำหนดไว้ โดยปริมาณความชื้นที่มีอยู่เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการจุดติดไฟและการเผาไหม้ ปริมาณเถ้าที่พบอยู่ในช่วง 6.4-6.9% อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ส่งผลดีต่อการดูแลและการสะสมเถ้า (ทำให้การทำความสะดวกง่ายขึ้นกว่าวัสดุที่มีเถ้าสูง) สำหรับปริมาณสารระเหยได้ที่พบมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยสูตรถ่านอัดแท่งชนิด C (11.46%) จึงคาดว่าจะ “ติดไฟง่าย/จุดติดไว” กว่าสูตรอื่น แต่มีแนวโน้มให้ควันช่วงเริ่มจุดมากกว่าเล็กน้อย ขณะที่สูตรถ่านอัดแท่ง A และ B มี VM ต่ำกว่าเล็กน้อย จึงให้การเผาไหม้ที่นิ่งขึ้นหลังจากติดไฟแล้ว ดังนั้นถ่านอัดแท่งชนิด B มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดและมีปริมาณเถ้าต่ำสุด จึงควรให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุด (ติดไฟนานเหลือเถ้าน้อย) ขณะที่ถ่านอัดแท่งชนิด C จะมีสมบัติพิเศษกว่าสูตรอื่นคือจุดติดไฟง่ายกว่า แม้คาร์บอนคงตัวจะต่ำลงเล็กน้อย และถ่านอัดแท่งชนิด A มีคุณลักษณะอยู่ระหว่างสมบัติของถ่านอัดแท่งชนิด A และ C สำหรับการใช้งานทั่วไป

4.3.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่าน

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่ได้จากการเตรียมด้วยสูตรการผสมในการผลิตระดับอุตสาหกรรมครัวเรือน จากการหาค่าความร้อนของถ่านโดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) เปรียบเทียบกับการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของ Nhuchhem et al. (2012) ผลที่ได้เป็นดังนี้

4.3.3.1 โดยวิธีบอมคาลอริมิเตอร์

ค่าความร้อน High Heating Value (HHV) ของถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ที่เตรียมโดยใช้สูตรการเตรียมต่าง ๆ ได้แก่ ถ่านอัดแท่งสูตร A หรือสูตรพื้นฐาน (อัตราส่วนร้อยละของ ถ่าน:แป้งมันสำปะหลัง:น้ำ เท่ากับ 85:5:10) ถ่านอัดแท่งสูตร B (อัตราส่วนร้อยละของ ถ่าน:แป้งมันสำปะหลัง:NaNO₃:น้ำ เท่ากับ 85:5:2:8) และถ่านอัดแท่งสูตร C (อัตราส่วนร้อยละของ ถ่าน:แป้งมันสำปะหลัง:KNO₃:น้ำ เท่ากับ 85:5:2:8) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ผลการศึกษาที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อน (HHV) ของถ่านอัดแท่งสูตรการเตรียมต่าง ๆ ที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์

ชนิดของถ่านอัดแท่ง	ค่าความร้อน (kcal/g) จาก Bomb calorimeter			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ถ่านอัดแท่งชนิด A	6.890	6.899	6.885	6.891± 0.007
ถ่านอัดแท่งชนิด B	6.777	6.830	6.808	6.805± 0.027
ถ่านอัดแท่งชนิด C	6.964	6.976	6.983	6.974± 0.007

จากผลการศึกษาพบว่าถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้ มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 6.80 – 6.97 kcal/g (ประมาณ 28-29 MJ/ kg) ซึ่งถือได้ว่ามีการให้ความร้อนอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับมาตรฐานค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งทั่วไปที่กำหนดให้ต้องมีค่าพลังงานความร้อนไม่น้อยกว่า 5.000 kcal/g (ตามมาตรฐาน มพข. 238/2547) ดังนั้นถ่านอัดแท่งที่เตรียมจากการใช้เศษถ่านจากการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง ผสมกับแป้งมันสำปะหลังและสารช่วยติดไฟ สูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้จึงผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำสำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งด้านค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งคุณภาพสูงที่เตรียมได้ในการจัดจำหน่ายของชุมชนได้ต่อไป

4.3.3.2 โดยวิธีประมาณจากค่า proximate analysis

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิควิธีการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการคำนวณหาพลังงานความร้อนของ Nhuchhem et al. (2012) โดยอาศัยปริมาณองค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี proximate analysis โดยผลการศึกษามีปริมาณองค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี proximate analysis และค่าความร้อนที่คำนวณได้ แสดงดังตารางที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ โดยวิธี proximate analysis

ชนิดของถ่าน	ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบ (% wt dry basis)		
	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
ถ่านอัดแท่งสูตร A	9.54	6.35	84.11
ถ่านอัดแท่งสูตร B	9.61	5.95	84.43
ถ่านอัดแท่งสูตร C	10.64	6.16	83.20

ตารางที่ 4.10 ปริมาณความร้อน (HHV) ของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณทางทฤษฎี

ชนิดของถ่านอัดแท่ง	ค่าความร้อนคำนวณทางทฤษฎีโดยสมการ			
	Linear correlation		Non-Linear correlation	
	MJ/kg	kcal/g	MJ/kg	kcal/g
ถ่านชนิด A	18.2698	4.3848	15.1758	3.6422
ถ่านชนิด B	18.3834	4.4120	15.4780	3.7147
ถ่านชนิด C	18.4414	4.4259	15.7277	3.7747

จากผลการคำนวณเชิงทฤษฎีพบว่าถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 4.38-4.42 kcal/g โดยวิธีการคำนวณโดยใช้สมการ Linear correlation และมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3.64-3.77 kcal/g โดยวิธีการคำนวณโดยใช้สมการ Non-Linear correlation ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงอย่างมาก (ค่าความร้อนที่วัดโดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ ดังในตารางที่ 4.8)

การที่ถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมียทั้งสามสูตรมีส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง (ประมาณ 83-84%) ตามผลการวิเคราะห์ proximate ซึ่งโดยธรรมชาติจะให้ค่าความร้อน HHV สูงกว่าชีวมวลดิบ (ที่มีความชื้นและสารระเหยมาก) จึงเป็นเหตุผลที่สนับสนุนผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่วัดได้จริงจากการใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ที่วัดได้ในช่วง ในช่วง 6.80 – 6.97 kcal/g (ประมาณ 28-29 MJ/ kg) โดยการค่า

ความร้อนซึ่งวิเคราะห์ได้จากเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้ความดันออกซิเจนสูงและเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นพลังงานที่วัดออกมาได้จึงเป็นค่าความร้อนรวม (Gross/HHV) ซึ่งเป็นพลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมารวม “ความร้อนแฝงของไอน้ำที่ควบแน่น” ด้วย จึงมักได้ค่าความร้อน HHV สูงกว่า จึงทำให้ค่าความร้อนที่ได้จริงมีค่าสูงกว่าการคำนวณ นอกจากนี้สมการที่อ้างอิง (Nbhuchhen et al.) พัฒนามาจากชุดข้อมูลชีวมวลหรือเชื้อเพลิงหลากหลายชนิดในช่วงคุณสมบัติที่กว้างกว่า เมื่อนำมาใช้กับถ่านอัดแท่ง มีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงจึงไม่เหมาะสม อีกทั้งตามสมการปริมาณเถ้าที่พบมีส่วนอย่างมากต่อการทำให้ค่าความร้อน HHV ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งองค์ประกอบหรือสารเติมแต่งในถ่านไม่ได้ถูกสะท้อนให้ครบในสมการ และความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์จึงทำให้มีการแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างเต็มที่ ขณะที่สมการประเมินค่าความร้อนโดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงสถิติกับค่า proximate ไม่ได้จำลองการเผาไหม้สมบูรณ์ในแบบการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ จึงทำให้ความร้อนที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าความร้อนจริงที่พบ แต่ทั้งนี้หากทราบค่าความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างการวิเคราะห์ทั้งสองแบบก็สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าความร้อนจริงที่ควรจะได้ของถ่านอัดแท่งที่มีองค์ประกอบ proximate ที่พบได้

4.3.2 ผลการศึกษาความพึงพอใจในกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่ง

จากการศึกษาความพึงพอใจในกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยการจัดอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งในโครงการอบรมการผลิตถ่านอัดแท่ง มีเกษตรกรเข้าร่วมการอบรมจำนวน 30 คน ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ภาพตัวอย่างการอบรมผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย

จากการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มเกษตรกรและผู้ประกอบการที่เข้าร่วมการอบรมการผลิตถ่านอัดแท่งจำนวน 30 คน ระหว่างวันที่ 1-3 มกราคม 2568 ณ ศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูงเพชรบูรณ์ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งลักษณะของแบบประเมินเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) จำนวน 10 ข้อ มีตัวเลือก 5 ตัวเลือก คือ พึงพอใจมากที่สุดให้ 5 คะแนน พึงพอใจมากให้ 4 คะแนน พึงพอใจปานกลางให้ 3 คะแนน พึงพอใจน้อยให้ 2 คะแนน และ พึงพอใจน้อยที่สุดให้ 1 คะแนน และการประมวลผลคะแนนของความพึงพอใจของผู้เข้ารับการอบรมในแต่ละด้านเพื่อแสดงระดับความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ได้ใช้เกณฑ์ในการประเมิน ดังนี้

ค่าเฉลี่ย	4.51 – 5.00	3.51 – 4.50	2.51 – 3.50	1.51 – 2.50	1.00 – 1.50
ระดับความพึงพอใจ	มากที่สุด	มาก	ปานกลาง	น้อย	น้อยที่สุด

ผลที่ได้จากการสอบถามและการประมวลผลของความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้และได้ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ที่สนใจเข้าร่วมการอบรม แสดงได้ดังตารางที่ 4.11 ดังนี้

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ

หัวข้อในการประเมิน ความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้งานในระดับต่าง ๆ					ค่าเฉลี่ยการ ประเมิน
	มากที่สุด (5)	มาก (4)	ปานกลาง (3)	น้อย (2)	น้อยที่สุด (1)	
1.ความสะดวกและง่ายในการจัดการวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่ง	(18) 60%	(8) 30%	(4) 10%			4.47 พอใจมาก
2.ความสะดวกและง่ายของวิธีการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย	(7) 23%	(15) 50%	(8) 27%			3.97 พอใจมาก
3.ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านสำหรับการผลิตถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย		(17) 57%	(7) 23%	(6) 20%		3.37 พอใจปานกลาง
4.ความสะดวกและง่ายของวิธีการบดถ่าน		(15) 50%	(8) 27%	(7) 23%		3.27 พอใจปานกลาง
5.สูตรการเตรียมและวิธีการเตรียมถ่านอัดแท่ง	(16) 53%	(8) 27%	(6) 20%			4.33 พอใจมาก
6.ความสะดวกและความยากง่ายของวิธีการเตรียมถ่านอัดแท่ง	(18) 60%	(8) 27%	(4) 13%			4.47 พอใจมาก
7.คุณภาพและประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสูตร A	(8) 27%	(15) 50%	(7) 23%			4.03 พอใจมาก
8.คุณภาพและประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสูตร B	(23) 77%	(4) 13%	(3) 10%			4.67 พอใจมากที่สุด
9.คุณภาพและประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสูตร C	(20) 67%	(6) 20%	(4) 13%			4.53 พอใจมากที่สุด
10.การนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ประโยชน์ได้จริง	(18) 60%	(7) 23%	(5) 17%			4.43 พอใจมาก
ค่าเฉลี่ยรวมในทุกด้าน						4.15 พอใจมาก

จากผลการสำรวจระดับความพึงพอใจต่อกระบวนการ/เทคโนโลยีที่ถ่ายทอด ผลลัพธ์ภาพรวมได้ค่าเฉลี่ย 4.15 จัดอยู่ในระดับ “พึงพอใจมาก” ยืนยันว่าการอบรมตอบสนองผู้เข้าร่วมได้ดีในภาพรวม

ทั้งด้านความเข้าใจ การประยุกต์ใช้ และคุณภาพผลผลิตด้านอัดแท่งที่ทดลองทำในกิจกรรมอบรมเชิงรายข้อ หัวข้อที่ได้รับค่าคะแนนสูงมาก ได้แก่ คุณภาพ-ประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสูตร B (เฉลี่ย 4.67; ผู้ประเมินให้ “มากที่สุด” 77%) และสูตร C (เฉลี่ย 4.53; “มากที่สุด” 67%) สะท้อนว่าการออกแบบสูตรมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง รองลงมาคือ “ความสะดวกและความง่ายของวิธีการเตรียมถ่านอัดแท่ง” (เฉลี่ย 4.47) และ “ความสะดวก-ง่ายในการจัดการวัตถุดิบ” (เฉลี่ย 4.47) บ่งชี้ว่าขั้นตอนการทำงานที่ใช้ประกอบการอบรมมีความชัดเจน ใช้งานได้จริง ขณะเดียวกัน “การนำเทคโนโลยีไปใช้ประโยชน์ได้จริง” ได้เฉลี่ย 4.43 ซึ่งสอดคล้องกับความตั้งใจกลับไปใช้ของกลุ่มเป้าหมายหลังจบการอบรม ด้านที่ยังเป็น “จุดปรับปรุง” คือ ประสิทธิภาพของเตาเผาถ่าน (เฉลี่ย 3.37) และ ความสะดวก/ความง่ายของวิธีการบดถ่าน (เฉลี่ย 3.27) ซึ่งอยู่ระดับ “พึงพอใจปานกลาง” สะท้อนความท้าทายในช่วงปฏิบัติการจริง โดยเฉพาะการควบคุมเงื่อนไขการเผา (การไหลเวียนอากาศ-การจัดวางเชื้อเพลิง-การควบคุมอุณหภูมิ) และข้อจำกัดด้านเครื่องบด/ความพร้อมของอุปกรณ์ที่มีในชุมชน ค่าคะแนนของ “วิธีเตรียมถ่านจากกะลาแมกคาเดเมีย” (เฉลี่ย 3.97) แม้อยู่ระดับ “พึงพอใจมาก” แต่ยังต่ำกว่าหลายประเด็น แสดงว่าขั้นตอนก่อนเข้าเตา เช่น การทำให้แห้ง การคัดขนาดวัตถุดิบ และความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ ยังมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของผู้เข้าร่วม “พึงพอใจมาก” และมองเห็นศักยภาพการประยุกต์ใช้จริง จุดที่ควรเร่งปรับปรุงคือสมรรถนะของเตาและขั้นตอนการบดซึ่งเป็นหัวใจของคุณภาพถ่านอัดแท่ง หากพัฒนาเครื่องมือ-ทักษะเชิงปฏิบัติการควบคู่กับระบบทวนสอบคุณภาพอย่างง่าย คาดว่าจะยกระดับประสิทธิภาพการผลิตของชุมชนได้อย่างมีนัยสำคัญและยั่งยืนต่อไป

4.4 การศึกษาโมเดลแผนธุรกิจ แนวทางการจัดจำหน่าย และต้นทุนการผลิต

ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการวิจัยโดยการมีส่วนร่วมของชุมชนนี้เป็นกระบวนการที่ท้าทายและมีความเสี่ยงสูง หากไม่มีแนวทางที่ชัดเจนในการกำหนดกลยุทธ์ทางธุรกิจ ผู้ประกอบการอาจเผชิญกับปัญหาด้านต้นทุนที่ไม่สมดุล ตลาดที่ไม่ตอบรับ หรือการดำเนินงานที่ขาดประสิทธิภาพ โมเดลธุรกิจบนผืนผ้าใบ (Business Model Canvas : BMC) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถออกแบบ วางแผน และปรับปรุงโมเดลธุรกิจของผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดที่ช่วยให้ผู้ประกอบการมองเห็นโครงสร้างของธุรกิจเชิงภาพรวมผ่าน 9 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย (Customer Segments) คุณค่าที่ส่งมอบให้ลูกค้า (Value Propositions) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Channels) ไปจนถึงโครงสร้างต้นทุน (Cost Structure) และแหล่งรายได้ (Revenue Streams) สำหรับผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควันเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์แนวคิดด้านพลังงานสะอาดและความยั่งยืน การใช้โมเดลธุรกิจบนผืนผ้าใบช่วยให้สามารถวิเคราะห์และกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ธุรกิจสามารถสร้างมูลค่าให้กับลูกค้า พร้อมทั้งบริหารต้นทุนและขยายตลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างโมเดลธุรกิจบนผืนผ้าใบสำหรับถ่านอัด

แห่งไร่คว้น จึงได้จัดกระบวนการระดมสมองร่วมกับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในการสร้างโมเดลธุรกิจบนพื้นที่ป่าสำหรับผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร่คว้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. คุณค่าที่นำเสนอ (Value Propositions) ธุรกิจนำเสนอถ่านอัดแท่งไร่คว้นที่มีจุดเด่นคือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีควัน ไม่มีกลิ่น และมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ สรุปคุณค่าที่นำเสนอ ดังนี้

- ถ่านไร่คว้น ลดปัญหามลภาวะและกลิ่นรบกวน
- ให้ความร้อนสูง สมำเสมอ และเผาไหม้ได้นาน ประหยัด
- เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลิตจากวัสดุชีวมวลแทนถ่านแมคคาเดเมีย
- ลดคราบเขม่าดำ และไม่ทำให้อาหารมีกลิ่นถ่านเผาไหม้
- สะอาด ปลอดภัย และเหมาะสำหรับพื้นที่ปิด หรือลานกลางแจ้ง

2. กลุ่มลูกค้า (Customer Segments) กลุ่มเป้าหมายหลักประกอบด้วยร้านอาหาร ครั้วเรือน ร้านปิ้งย่าง และผู้ประกอบการที่ใช้ถ่านในการประกอบอาหาร โดยเฉพาะกลุ่มที่ใส่ใจสิ่งแวดล้อมและต้องการลดมลพิษจากควันไฟ

- ร้านอาหารปิ้งย่าง/หมูกระทะ/บาร์บีคิว
- ครั้วเรือนที่ใช้ถ่านเป็นแหล่งพลังงาน
- ธุรกิจแคมป์ปิ้งและกิจกรรมกลางแจ้ง
- โรงแรมและรีสอร์ทที่ต้องการใช้เชื้อเพลิงสะอาด

3. ช่องทาง (Channels) การจัดจำหน่ายผ่านหลากหลายช่องทาง ทั้งการขายตรง ร้านค้าส่ง-ปลีก และแพลตฟอร์มออนไลน์ เพื่อให้เข้าถึงลูกค้าได้อย่างทั่วถึง ดังนี้

- ร้านค้าออนไลน์ (Shopee, Lazada, Tiktok, Facebook, line)
- ร้านจำหน่ายอุปกรณ์ทำอาหารปิ้งย่างและแคมป์ปิ้ง
- ตัวแทนจำหน่ายและร้านค้าในท้องถิ่น
- ร้านค้าปลีกและค้าส่งอุปกรณ์พลังงานทางเลือก

4. ความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationships) สร้างความสัมพันธ์ผ่านการให้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ การสาธิตการใช้งาน การรับประกันคุณภาพ และการบริการหลังการขาย มีการจัดโปรโมชั่นและส่วนลดเพื่อรักษฐานลูกค้า ดังนี้

- ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้ถ่านอัดแท่งไร่คว้นผ่านโซเชียลมีเดีย
- รับประกันคุณภาพสินค้าและให้บริการหลังการขาย
- สร้างชุมชนออนไลน์สำหรับลูกค้า เช่น กลุ่ม Facebook หรือ LINE OA
- จัดโปรโมชั่นและส่วนลดสำหรับลูกค้าประจำเพื่อให้กลับมาใช้ซ้ำ

5. กระแสรายได้ (Revenue Streams) รายได้หลักมาจากการจำหน่ายถ่านอัดแท่งไร่คว้น ทั้งแบบขายปลีกและขายส่ง

6. พันธมิตรหลัก (Key Partners) ร่วมมือกับผู้จัดหาวัตถุดิบ บริษัทขนส่ง ร้านค้าตัวแทนจำหน่าย และหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างห่วงโซ่อุปทานที่มีประสิทธิภาพ

- ซัพพลายเออร์วัตถุดิบชีวมวล
- ร้านค้าและตัวแทนจำหน่ายถ่านและอุปกรณ์พลังงาน
- ร้านอาหารและธุรกิจที่ใช้ถ่านเป็นแหล่งพลังงาน
- หน่วยงานปกครองส่วนท้องถิ่น
- มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
- แพลตฟอร์ม E-commerce และผู้ให้บริการโลจิสติกส์

7. กิจกรรมหลัก (Key Activities) มุ่งเน้นการผลิตถ่านอัดแท่งคุณภาพสูง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ การควบคุมคุณภาพ การจัดการด้านโลจิสติกส์ และการทำการตลาด

- การผลิตและพัฒนาคุณภาพถ่านอัดแท่งไร้ควัน
- การตลาดและการประชาสัมพันธ์เพื่อสร้างการรับรู้
- การบริหารจัดการซัพพลายเชนและโลจิสติกส์
- การสร้างเครือข่ายพันธมิตรและตัวแทนจำหน่าย
- การวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่าน

8. ทรัพยากรหลัก (Key Resources) ประกอบด้วย โรงงานผลิต เครื่องจักร วัตถุดิบ บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ และระบบการจัดการที่มีประสิทธิภาพ

- วัตถุดิบชีวมวล กะลาแมคคาเดเมีย
- เทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่งไร้ควัน
- สถานที่และเครื่องจักรในการผลิต
- ทีมวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพถ่าน
- รถขนส่ง

9. โครงสร้างต้นทุน (Cost Structure) ต้นทุนหลักมาจากค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ ค่าขนส่ง และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่าง ๆ

- ต้นทุนวัตถุดิบชีวมวล เช่น กะลาแมคคาเดเมีย
- ค่าใช้จ่ายด้านกระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์
- ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรและเทคโนโลยี
- ค่าขนส่งและการกระจายสินค้า
- ค่าใช้จ่ายด้านการตลาดและโฆษณา
- ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและทีมงาน

พันธมิตรหลัก	กิจกรรมหลัก	การเสนอคุณค่า	ความสัมพันธ์กับลูกค้า	กลุ่มลูกค้า
- วิทยาลัยเออร์ - วัดอุทัยชีวมวล - ร้านค้าและตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์และ - ร้านอาหารและ - ธุรกิจที่ใช้ถ่านเป็นแหล่งพลังงาน - หน่วยงานปกครองส่วนท้องถิ่น - มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ - แพลตฟอร์ม E-commerce และผู้ให้บริการโลจิสติกส์	- การผลิตและพัฒนาคุณภาพถ่านอัดแท่งไร้ควัน - การตลาดและการประชาสัมพันธ์เพื่อสร้างการรับรู้ - การบริหารจัดการ - วิทยาลัยเชนและโลจิสติกส์ - การสร้างเครือข่ายพันธมิตรและตัวแทนจำหน่าย - การวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่าน	- ถ่านไร้ควัน ลดปัญหามลภาวะและกลิ่นรบกวน - ให้ความร้อนสูง สม่ำเสมอ และเผาไหม้ได้นาน ประหยัด - เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม - ผลิตภัณฑ์ชีวมวลแทนถ่านแมคคาเดเมีย - ลดราคาเขมาค่า และไม่ทำให้อาหารมีกลิ่นถ่านเผาไหม้ - สะอาด ปลอดภัย และเหมาะสมสำหรับพื้นที่ปิด หรือลานกลางแจ้ง	- ให้คำแนะนำเกี่ยวกับ การใช้ถ่านอัดแท่งไร้ควันผ่านโซเชียลมีเดีย - รับประกันคุณภาพสินค้าและให้บริการหลังการขาย - สร้างชุมชนออนไลน์สำหรับลูกค้า เช่น กลุ่ม Facebook หรือ LINE OA - จัดโปรโมชั่นและส่วนลดสำหรับลูกค้าประจำเพื่อให้กลับมาใช้ซ้ำ	- ร้านอาหารปิ้งย่าง/หมูกระทะ/บาร์บีคิว - เครื่องใช้ถ่านเป็นแหล่งพลังงาน - ธุรกิจแคมป์ปิ้งและกิจกรรมกลางแจ้ง - โรงแรมและรีสอร์ทที่ต้องการใช้เชื้อเพลิงสะอาด
	ทรัพยากรหลัก - วัดอุทัยชีวมวล - กะลามะคาเดเมีย - เทคโนโลยีการผลิตถ่านอัดแท่งไร้ควัน - สถานที่และเครื่องจักรในการผลิต - ทีมวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพถ่าน - รถขนส่ง	ช่องทาง - ร้านค้าออนไลน์ (Shopee, Lazada, Tiktok, Facebook, line) - ร้านจำหน่ายอุปกรณ์ทำอาหารปิ้งย่างและแคมป์ปิ้ง - ตัวแทนจำหน่ายและร้านค้าในท้องถิ่น - ร้านค้าปลีกและค้าส่ง - อุปกรณ์พลังงานทางเลือก - งานแสดงสินค้าด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม		
โครงสร้างต้นทุน CS - ต้นทุนวัดอุทัยชีวมวล เช่น กะลามะคาเดเมีย - ค่าใช้จ่ายด้านกระบวนการผลิต - ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรและเทคโนโลยี - ค่าขนส่งและการกระจายสินค้า - ค่าใช้จ่ายด้านการตลาดและโฆษณา - ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและทีมงาน		กระแสรายได้ CS รายได้จากการขายถ่านอัดแท่งไร้ควัน (ขายปลีกและขายส่ง)		

รูปที่ 4.17 โมเดลธุรกิจถ่านอัดแท่งไร้ควัน

โมเดลธุรกิจนี้มีจุดแข็งคือการนำเสนอผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและตอบโจทย์ความต้องการของตลาด โดยมีการบริหารจัดการต้นทุนและการสร้างรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านเครือข่ายพันธมิตรที่แข็งแกร่งและช่องทางการจัดจำหน่ายที่หลากหลาย

จากการศึกษาต้นทุนหลักมาจากค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ ค่าขนส่ง และ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงรายการต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควัน

หมวดต้นทุน	ราคาต้นทุน/kg (บาท)	ร้อยละของ ต้นทุนรวม(%)	คำอธิบายโดยย่อ
1. วัตถุดิบชีวมวล (กะลา แมคคาเดเมีย ฯลฯ)	8	20	ค่าซื้อ/รวบรวม/คัดขนาด/ทำแห้ง เบื้องต้น
2. กระบวนการผลิตและ บรรจุภัณฑ์	12	30	ค่าเชื้อเพลิง-ไฟฟ้า ไพโรไลซิส/ บด/อัดแท่ง + สารยึดเกาะ + ถุง/ ฉลาก (1 kg = 2 ถุง)
3. การบำรุงรักษาเครื่องจักร และเทคโนโลยี	3	7.5	ค่าอะไหล่/ซ่อม/ค่าเสื่อมเฉลี่ยต่อ กิโลกรัม
4. ขนส่งและกระจายสินค้า	5	12.5	ค่าน้ำมัน/ค่ารถ/ค่าส่งเฉลี่ยต่อ กิโลกรัม
5. การตลาดและโฆษณา	2	5	สื่อออนไลน์ โปรโมชัน ฉลาก/ ดีไซน์เฉลี่ยต่อหน่วย
6. แรงงานและทีมงาน	10	25	ค่าจ้างผลิต-แพ็ก-สต็อก-ขาย เฉลี่ย ตามกำลังผลิต
รวมต้นทุน	40	100	ต่อผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง 1 kg

จากผลการศึกษาด้านทุนการผลิตถ่านอัดแท่งไร้ควันตามตารางที่ 4.12 เพื่อแผนการจัดจำหน่าย ผลิตภัณฑ์พบว่า ต้นทุนการผลิตถ่านอัดแท่งไร้ควันปริมาณ 1 กิโลกรัม มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 40 บาท เมื่อกำหนดให้บรรจุถ่านอัดแท่งปริมาณ 0.5 กิโลกรัมต่อถุง (9 ก้อน) จึงมีต้นทุนของผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควันเท่ากับ 20 บาท/ถุง (หนัก 0.5 กิโลกรัม) จากการระดมความคิดกลุ่มเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการพบว่ากำไรขั้นต่ำที่ต้องการคือประมาณร้อยละ 20 (มาร์จิ้น $\approx$ 20%) หรือต้องการกำไรขั้นต่ำ 5 บาท/ถุง (0.5 กิโลกรัม) ดังนั้นจึงกำหนดราคาขายผลิตภัณฑ์ไว้เท่ากับ 25 บาท/ถุง (หนัก 0.5 กิโลกรัม) โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตให้มีกำไรมากขึ้นจากการจัดหาเศษกะลาแมคคาเดเมียที่ราคาถูกลงหรือได้ฟรีจะช่วยลดต้นทุนราคาวัตถุดิบชีวมวล การเพิ่มกำลังผลิตจะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง (economies of scale) จากต้นทุนการบำรุงรักษา ต้นทุนการตลาดและต้นทุนแรงงาน การจัดทำข้อตกลงเพื่อใช้รถส่งแบบเหมา ต่อรอบจะช่วยลดต้นทุนค่าขนส่ง และการซื้อบรรจุภัณฑ์แบบยกถังเพื่อลดต้นทุนบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น จะช่วยทำให้กลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตสินค้ามีกำไรสูงขึ้นจากการจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อออกแบบเตาเผาถ่านขนาดเล็กและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกะลาแมคคาเดเมีย 2) เพื่อศึกษาสูตรการผสม วิธีการเตรียม และคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกะลาแมคคาเดเมีย และ 3) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งจากกะลาแมคคาเดเมีย แผนธุรกิจและแนวทางการจัดจำหน่าย โดยผลการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมได้มีการออกแบบและสร้างเตาเผาชีวมวลจากถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ซึ่งลดการปล่อยควันจากการเผาไหม้ได้โดยการออกแบบให้ควันไฟที่เกิดขึ้นจากห้องเผาชีวมวลให้ไหลเวียนกลับไปยังส่วนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอีกครั้ง จากนั้นทำการไพโรไลซิสเศษกะลาแมคคาเดเมียให้เป็นถ่าน ขั้นตอนต่อมาได้ศึกษาสูตรส่วนผสมถ่านกัมสารยัดเกาะและสารช่วยเผาไหม้และขึ้นรูปถ่านอัดแท่ง และในขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการประเมินต้นทุนและศึกษาโมเดลธุรกิจ พร้อมทั้งถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มเกษตรกร กลุ่มวิสาหกิจและผู้สนใจทั่วไป และได้มีการสำรวจความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการอบรมในด้านต่าง ๆ ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้ในแต่ละขั้นตอนสรุปดังนี้

5.1 การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง

การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมียให้ผลเป็นถ่านคาร์บอนสูง เหมาะต่อการพัฒนาเป็นถ่านอัดแท่งในระดับชุมชน ทั้งในแง่สมบัติพื้นฐานและศักยภาพด้านพลังงาน เมื่อพิจารณาเชิงโครงสร้างและองค์ประกอบพบว่า กระบวนการเผาแบบไพโรไลซิสเพื่อการกลายสภาพของชีวมวลไปสู่สภาวะคาร์บอนเชิงแอโรมาติก/กึ่งแกรไฟต์ โดยผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ระบุสัดส่วนอะตอมคาร์บอน (C) ประมาณ 81% และออกซิเจน (O) 9.5% ซึ่งแสดงถึงการคาร์บอนไนซ์ที่เพียงพอต่อการเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงและเผาไหม้ต่อเนื่องได้ดี นับสำคัญเชิงพลังงานของถ่านคาร์บอนสูงนี้สะท้อนชัดจากการทดสอบด้วยบอมคาโลรีมิเตอร์ของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากถ่านดังกล่าวซึ่งให้ค่า HHV เฉลี่ย 6.80–6.97 kcal/g ($\approx 28\text{--}29$ MJ/kg) ซึ่งเป็นระดับสูงกว่าข้อกำหนดขั้นต่ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มพช. 238/2547) อย่างชัดเจน และยืนยันศักยภาพของเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งในการต่อยอดเป็นเชื้อเพลิงชุมชนคุณภาพ

5.2 การศึกษาสูตรผสมถ่านอัดแท่งและสมบัติของถ่านอัดแท่งที่ได้แต่ละสูตร

การทดลองเปรียบเทียบสูตรส่วนผสม 3 สูตรสำหรับการเตรียมถ่านอัดแท่งจากถ่านเศษกะลาแมคคาเดเมีย โดยการเตรียมถ่านอัดแท่งสูตรพื้นฐาน A (ถ่าน:แป้งมัน:น้ำ = 85:5:10), สูตรการเตรียม

ถ่านอัดแท่งสูตร B (85:5:2:8 โดยเติม NaNO_3 2%) และสูตรการเตรียมถ่านอัดแท่งสูตร C (85:5:2:8 โดยเติม KNO_3 2%) แสดงให้เห็นความแตกต่างเชิงสมรรถนะที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ได้แก่ (1) ค่าความร้อนจากบอมคาโลรีมิเตอร์อยู่ในช่วงใกล้เคียงกันทั้งหมด โดยสูตร C สูงสุด (6.974 ± 0.007 kcal/g) ตามด้วยสูตร A (6.891 ± 0.007 kcal/g) และสูตร B (6.805 ± 0.027 kcal/g) สะท้อนว่า “ฐานคาร์บอนของถ่าน” เป็นตัวแปรหลัก ขณะที่สารช่วยเผาไหม้ปรับพฤติกรรมการเริ่มติดไฟและการเผาไหม้ช่วงต้นมากกว่าผลรวมพลังงาน (2) ผลวิเคราะห์แบบ proximate (บนฐานแห้ง) พบว่าทั้งสามสูตรมีความชื้นต่ำ (~7–7.5%) ช่วยให้อุดมคติและลดการสูญเสียความร้อนกับน้ำ สารระเหยได้ (VM) อยู่ในรอบ ~10.3–11.5% โดยสูตร C สูงกว่าเล็กน้อยซึ่งอธิบายได้ว่าทำให้เริ่มติดไฟรวดเร็ว ขณะที่ปริมาณเถ้าอยู่ราว ~6.4–6.9% และคาร์บอนคงตัว (FC) สูง ~74.7–75.7% ถือว่ากระบวนการไพโรไลซิสค่อนข้างสมบูรณ์และสนับสนุนการเผาไหม้นานต่อเนื่อง เมื่อนำสมบัติรวมมาพิจารณาในบริบทใช้งาน: สูตร B ซึ่งมี FC สูงสุดและเถ้าต่ำสุดเหมาะกับผู้ใช้ที่ต้องการ “เผานาน-เหลือกากน้อย” ขณะที่สูตร C ที่มี VM สูงกว่าช่วย “ติดไฟไว” เหมาะกับการจุดเริ่มหรืองานที่ต้องการกำลังไฟช่วงต้น ส่วนสูตร A ให้สมดุลระหว่างการติดไฟและการเผาต่อเนื่อง เหมาะเป็นรุ่นมาตรฐานของชุมชน ทั้งสามสูตรผ่านเกณฑ์ค่าความร้อนขั้นต่ำของมาตรฐาน มผช. จึงพร้อมต่อออกสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ระดับชุมชน

5.3 การศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งและสมบัติของถ่านอัดแท่งแต่ละสูตร

การยกระดับจากห้องปฏิบัติการสู่ “การเตรียมผลิตภัณฑ์ชุมชน” ถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียโดยมีลักษณะเป็นแท่งทรงห้าเหลี่ยมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 cm มีรูแกนกลางภายในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 cm เพื่อช่วยการไหลเวียนอากาศ มีความยาวประมาณ 8 cm ถ่านอัดแท่งที่ได้มีผิวภายนอกเรียบ เนื้อถ่านยึดเกาะกันแน่น ไม่แตกหักง่าย มีความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง $0.534\text{--}0.563$ g/cm³ สะท้อนถึงการขึ้นรูปที่แน่นและคงรูปดี ผลการทดสอบการเผาไหม้ชี้ว่าสารช่วยติดไฟที่ใช้สามารถเพิ่มความเร็วการลามไฟอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมระยะเวลาเผาไหม้ยาวเพียงพอสำหรับงานครัวเรือน/จำหน่ายปลีก มีค่ามลพิษระหว่างใช้งานอยู่ในระดับต่ำ (PM_{2.5} เฉลี่ย $23.7\text{--}19.3$ µg/m³; CO $5.3\text{--}3.8$ ppm; CO₂ $667.5\text{--}622.1$ ppm) และปริมาณ CO₂ อยู่ในช่วงปกติ ($\approx 622\text{--}668$ ppm) สอดคล้องการเผาไหม้ที่สะอาดขึ้นเมื่อมีการเติมสารช่วยติดไฟลงไปในสูตรการเตรียม โดยภาพรวมถ่านอัดแท่งไร้ควันสูตร C ให้สมรรถนะการติดไฟและคุณภาพอากาศดีที่สุด รองลงมาคือสูตร B และ A ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงชี้ได้ว่าการใช้เศษกะลาแมคคาเดเมียเป็นวัตถุดิบเพื่อให้ผลิตถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย ร่วมกับการออกแบบสูตรและกระบวนการเตรียมถ่านอัดแท่งที่เหมาะสม สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันที่มีคุณภาพการเผาไหม้สูง ควัน/ก๊าซมลพิษต่ำ และมีศักยภาพต่อยอดเชิงเศรษฐกิจ สร้างผลิตภัณฑ์ชุมชน และรักษาสีเขียวสิ่งแวดล้อมในชุมชนพื้นที่ที่มีการปลูกแมคคาเดเมียได้ ซึ่งได้สำรวจการยอมรับของชุมชนที่เข้าร่วมโครงการ ผ่านการสาธิตครบกระบวนการ (เผาถ่าน-บด-คัดขนาด-ผสม-อัดแท่ง-อบแห้ง) และการถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่เกษตรกรและผู้ประกอบการใน

พื้นที่ โดยใช้ชุดเครื่องมือและขั้นตอนที่ปรับให้เหมาะกับระดับครัวเรือน/วิสาหกิจชุมชน ผลการประเมินความพึงพอใจผู้เข้าร่วมอบรมจำนวน 30 คน ด้วยมาตราส่วน 5 ระดับ พบค่าเฉลี่ยภาพรวม 4.15 จัดอยู่ในระดับ “พึงพอใจมาก” สะท้อนว่ากระบวนการผลิตที่ถ่ายทอด สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง ทั้งด้านความเข้าใจ วิธีเตรียมก้อน และคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองทำในกิจกรรมอบรม การจัดโครงสร้างการสอน/คู่มือแบบขั้นตอน รวมถึงการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมกับบริบทการใช้งาน (เช่น สูตร C สำหรับเริ่มไฟไฟ และสูตร B/A สำหรับเผาต่อเนื่อง) ช่วยให้ชุมชนมองเห็นภาพ “สายผลิตภัณฑ์ (product line)” ที่ตอบโจทย์ผู้ใช้ปลายทางต่างกลุ่มได้อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ในเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ก่อนถ่านจากทั้งสามสูตรมีค่าความร้อนสูงและผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชน ขณะที่โปรไฟล์ proximate บ่งชี้ศักยภาพการเผาไหม้นานและการดูแลเตาที่ง่ายขึ้น (จากถ่านที่ต่ำปานกลาง) ทั้งนี้ ความแตกต่างเล็กน้อยของ VM/FC สามารถใช้เป็น “ตัวปรับแต่งบุคลิกของไฟ” ให้เหมาะกับงานครัวเรือน ร้านอาหารหรือกิจกรรมกลางแจ้งได้โดยไม่เสียความเป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐาน

5.4 การศึกษาโมเดลแผนธุรกิจ แนวทางการจัดจำหน่าย และต้นทุนการผลิต

การวิเคราะห์โมเดลธุรกิจขึ้นอยู่กับคุณค่าหลัก “เชื้อเพลิงชุมชน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไร้ควัน มีกลิ่นปนเปื้อนต่ำ ให้ความร้อนนาน” ผสานการบริหารต้นทุนและรายได้ซึ่งมีประสิทธิภาพ ผ่านเครือข่ายพันธมิตรและช่องทางจำหน่ายที่หลากหลาย (ออฟไลน์ในพื้นที่ร้านอาหาร/ตลาดชุมชน และออนไลน์) ซึ่งงานวิจัยระบุเป็นจุดแข็งในการเดินหน้าธุรกิจ ในมิติการตั้งราคากับต้นทุน หน่วยอ้างอิงคือ “บรรจุถุง 0.5 กิโลกรัม” โดยคำนวณต้นทุนรวมต่อกิโลกรัมประมาณ 40 บาท (คิดเป็น 20 บาทต่อถุง 0.5 กก.) แล้วกำหนดราคาขาย 25 บาท/ถุง เพื่อให้ได้กำไรขั้นต้นราว 20% ตามเป้าหมายที่ได้จากการระดมความเห็นกลุ่มเกษตรกรในโครงการ โครงสร้างต้นทุนแยกรายหมวดสะท้อนจุดปรับปรุงที่เป็นรูปธรรม ได้แก่ วัตถุดิบชีวมวล 8 บาท/กก. (20%), กระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์ 12 บาท/กก. (30%), บำรุงรักษา 3 บาท/กก. (7.5%), ขนส่ง 5 บาท/กก. (12.5%), การตลาด 2 บาท/กก. (5%) และแรงงาน 10 บาท/กก. (25%) รวมเป็น 40 บาท/กก. ตามตารางต้นทุน

ดังนั้นจากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าผลจากการดำเนินงานวิจัยนี้ยืนยันว่าสามารถเปลี่ยนเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งเป็น “ถ่านอัดแท่งไร้ควันคุณภาพสูง” ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชุมชนได้จริง โดยมีข้อมูลเชิงทดลองรองรับทั้งระดับวัสดุต้นทาง (โครงสร้าง-องค์ประกอบ), ระดับสมรรถนะเชื้อเพลิง (HHV สูง/VM-FC สมดุล), ระดับการถ่ายทอดสู่ชุมชน (ความพึงพอใจเฉลี่ย 4.15: พึงพอใจมาก) และระดับเศรษฐศาสตร์การผลิต (ต้นทุนรวม 40 บาท/กก. รองรับราคาขาย 25 บาท/ถุง 0.5 กก.) จึงมีความพร้อมต่อการนำไปผลิต-จำหน่ายจริง พร้อมแนวทางปรับแต่งผลิตภัณฑ์และต้นทุนที่ชัดเจนเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและความยั่งยืนของธุรกิจชุมชน

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควันจากเศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้ง มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ดังนี้

- (1) เน้นการรวมศูนย์จัดหา/คัด-ทำแท่งวัตถุดิบเพื่อรักษาดัชนีวัตถุดิบให้ใกล้เคียง 8 บาท/กก.
- (2) เพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตและอัตราการขึ้นรูปสำเร็จ ลดสูญเสียเพื่อลดต้นทุน

กระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์

- (3) บริหารเส้นทางขนส่งแบบเหมารอบและเพิ่มปริมาณต่อเที่ยวเพื่อลดต้นทุนต่อกิโลกรัม

(4) จัดการตลาดแบบ “เน้นจุดขายทางเทคนิคที่พิสูจน์แล้ว”—เช่น HHV สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มพช., ไร้ควัน, เผาได้นาน ร่วมกับภาพลักษณ์สินค้ายั่งยืน เพื่อเสริมพรีเมียมราคาขายและขยายฐานลูกค้า นอกจากนี้ การเดินทางตามระบบประกันคุณภาพภาคสนาม (ตรวจความชื้น/เถ้า/ความหนาแน่นเป็นเช็ค ลิสต์รายล็อต) และการนำเสนอ “สายผลิตภัณฑ์ย่อย” ตามจุดเด่นของแต่ละสูตร (C สำหรับเริ่มไฟไว, B สำหรับเผานาน, A เป็นรุ่นสมดุล) จะช่วยยกระดับความสม่ำเสมอ ความพึงพอใจ และความสามารถทำกำไรของวิสาหกิจชุมชนในระยะยาว

บรรณานุกรม

- Amaya, A., Medero, N., Tancredi, N., Silva, H., and Deiana, C. (2007). Activated Carbon from Biomass Materials. *Bioresource Technology*. 98: 1635-1641.
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke (D5865-19). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM D3173/D3173M-17: Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke. ASTM International.
- Bogale, W. (2009). Preparation of charcoal using agricultural wastes. *Ethiopian Journal of Education and Science*. 5(1) : p79-91.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy, Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition. EMF.
- Hadiyanto, H., Pratiwi, W. Z., Wahyono, Y., Nur Fadlilah, M., & Dianratri, I. (2021). Potential of biomass waste into briquette products in various types of binders as an alternative to renewable energy: A review. *AIP Conference Proceedings*, 2683, 020018.
- Hameed, T. B., Sridhar, M. K. C., Ana, G. R. E. E., & David, A. (2017). Low emission and smoke-free charcoal from oil palm (*Elaeis guineensis*) waste: A cheap energy source for rural communities in Nigeria. *Journal of Resources Development and Management*, 34, 23-28.
- International Organization for Standardization. (2021). ISO 17225-7:2021 Solid biofuels—Fuel specifications and classes—Part 7: Graded non-woody briquettes. ISO.
- Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). Marketing management (15th ed.). Pearson.
- Lu, X., Xiang, K., Zhou, W., Zhu, Y., & Chen, H. (2018). Biomass carbon materials derived from macadamia nut shells for high-performance supercapacitors. *Bulletin of Materials Science*, 41, 138.
- Moonsri, P. (2021). Properties of macadamia shell charcoal prepared by a small artificial furnace. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, 5(1), 28–39.
- Nhuchhen, D. R., Salam, P. A. (2012). Estimation of Higher Heating Value of Biomass from Proximate Analysis: A new approach. *Fuel*. 99: 55-63.
- Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022). A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Energies*, 15(7), 2426
- Peamsuwan, P., & Deeto, P. (2021). Development of smokeless charcoal briquettes from agricultural waste: Case of macadamia shells. *Thai Journal of Agricultural Science*, 54(2), 87–96.

- Porter, M. E. (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press.
- Suppalakpanya, K., Nikhom, R., & Nikhom, S. (2020). Preparation of biomass briquettes using durian peel char. *International Energy Journal*, 20(2), 621–628.
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). (2004). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547: ถ่านอัดแท่ง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- Tippayawong, K. Y., Santiteerakul, S., Ramingwong, S., & Tippayawong, N. (2019). Cost analysis of community scale smokeless charcoal briquette production from agricultural and forest residues. *Energy Procedia*, 160, 310-316.
- Tippayawong, K. Y., Panyakom, S., Suriyanarakorn, C., Wiratkasem, K., & Tippayawong, N. (2020). Supply chain analysis of smokeless charcoal from maize residues. *Energy Reports*, 6, 60-66.
- United Nations Conference on Trade and Development. (2010). *Creative economy report 2010*. UNCTAD/UNDP.
- Uttamaprakrom, W., & Vitidsant, T. (2012). Production of smokeless briquette charcoals from wet cake waste of ethanol industry. *Engineering journal*, 16(2), 5-18.
- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. (2558). ถ่านอัดแท่ง (Briquette Charcoal) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 63(197), 34–35.
- บัญญัติน์ โจลานันท์ และอาทิตย์ พุทธรักษาติ (2554). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ฉบับที่ 16 (1), หน้า 20-31.
- ปิยรัตน์ มูลศรี (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจากถ่านกะลามะคาเดเมียของกลุ่มเกษตรกรพื้นที่สูงอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- เสริมศักดิ์ เกิดวัน รุ่งโรจน์ จินด้าง และสุภาพร เกตุพันธ์ (2561). การผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกต้นสาเก. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นครศรีธรรมราช. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- อากม ประหลามานิต พิสิฐ ทรงเลิศ ภคินี ธงไชย วิชาญ แดงเป็ย และสุเมธ ไชยประพัทธ์ (2563). ชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโดนดอัดแท่ง โดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก. *Thai Science and Technology Journal*, ฉบับที่ 28 (6), หน้า 1107-1125.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาพตัวอย่างการเตรียมผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งไร้ควัน



เศษกะลาแมคคาเดเมียเหลือทิ้งทางการเกษตร



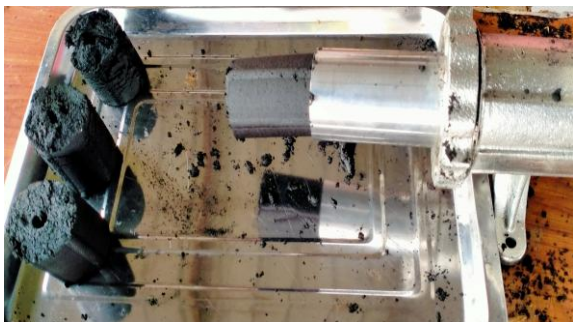
การเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย



ถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย



ผงถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย



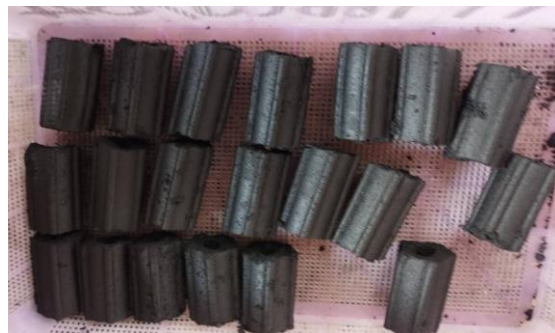
การเตรียมถ่านอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งแบบมือหมุน



ถ่านอัดแท่งจากเครื่องอัดแท่งแบบมือหมุน



การเตรียมถ่านอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งขนาด 3 HP



ถ่านอัดแท่งที่เตรียมด้วยเครื่องอัดแท่งขนาด 3 HP

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาสมบัติแบบประมาณ

การวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณ ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ดำเนินการดังนี้

สมบัติที่วิเคราะห์	น้ำหนัก (g)				
	น้ำหนักถ้วยและสารตัวอย่าง (ก่อน)	น้ำหนักถ้วยและสารตัวอย่าง (หลัง)	น้ำหนักสารตัวอย่าง (ก่อน); A	น้ำหนักสารตัวอย่าง (หลัง); B	น้ำหนักสารหายไป; (A-B)
Moisture	36.2724	36.1938	1.0311	0.9525	0.0786
Volatile matter	29.8639	29.7526	1.1144	1.0031	0.1113
Ash	33.5806	32.5332	1.1169	0.0695	-

จากสมการ
$$\text{Moisture (\%)} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

เมื่อ A และ B = น้ำหนัก (g) ของสารตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ ตามลำดับ

แทนค่า
$$\text{Moisture (\%)} = \frac{(1.0311 - 0.9525)}{1.0311} \times 100 = 7.62$$

จากสมการ
$$\text{Volatile matter (\%)} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

เมื่อ A และ B = น้ำหนัก (g) ของสารตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา ตามลำดับ

แทนค่า
$$\text{Volatile matter (\%)} = \frac{(1.1144 - 1.0031)}{1.1144} \times 100 = 9.99$$

จากสมการ
$$\text{Ash (\%)} = \frac{B}{A} \times 100$$

เมื่อ A และ B = น้ำหนัก (g) ของสารตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา ตามลำดับ

แทนค่า
$$\text{Ash (\%)} = \frac{0.0695}{1.1169} \times 100 = 6.22$$

จากสมการ
$$\text{Fixed carbon (\%)} = 100 - \text{Moisture (\%)} - \text{Ash (\%)} - \text{Volatile matter (\%)}$$

แทนค่า
$$\text{Fixed carbon (\%)} = 100 - 7.62 - 9.99 - 6.22 = 76.17$$

ภาคผนวก ก

การหาความหนาแน่นรวมและอัตราการลามไฟ

การหาความหนาแน่นรวม

ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ) ตามมาตรฐาน ASTM

D2974-14 ดังสมการ $\rho = \frac{m}{V}$

เมื่อ คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (g/cm^3) m คือ น้ำหนัก (g) และ V คือ ปริมาตร (cm^3) ของถ่านอัดแท่งตามลำดับ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกถ่าน (cm)	R_1 (cm)	ความสูง (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางช่องภายในถ่าน (cm)	R_2 (cm)	น้ำหนักถ่านอัดแท่ง (g)
4.35	2.175	8.5	1.46	0.73	60.55

จากสูตรคำนวณปริมาตร total volume (cm^3) = $\pi r^2 h$

เมื่อ r และ h = รัศมี (cm) และความสูง (cm) ตัวอย่าง ตามลำดับ

แทนค่า total volume (cm^3) = $\pi r^2 h = (3.14159) \times 2.175^2 \times 8.5 = 126.3243 \text{ cm}^3$

แทนค่า space volume (cm^3) = $\pi r^2 h = (3.14159) \times 0.73^2 \times 8.5 = 14.2303 \text{ cm}^3$

ดังนั้นปริมาตรของถ่านอัดแท่ง = total volume - space volume

= $126.3243 - 14.2303 = 112.0940 \text{ cm}^3$

จากสมการ $\rho = \frac{m}{V}$

แทนค่า $\rho = \frac{60.55 \text{ (g)}}{112.0940 \text{ (cm}^3\text{)}} = 0.5402 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

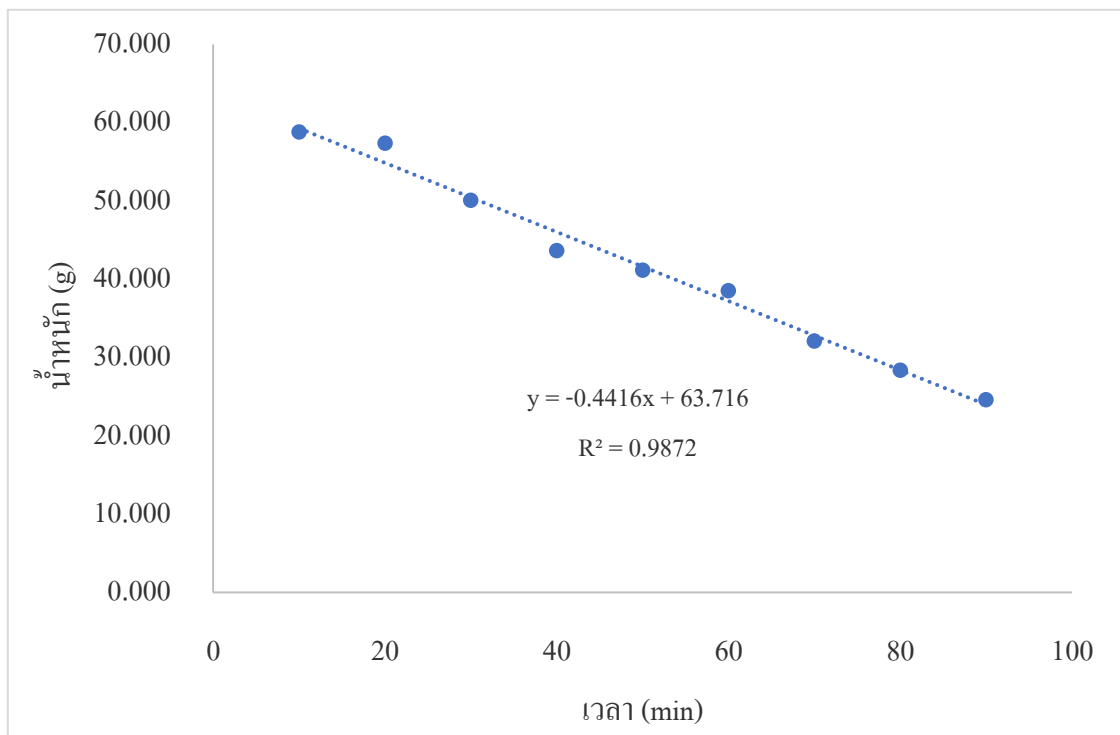
การหาอัตราการลามไฟ (หรืออัตราการเผาไหม้)

การตรวจสอบอัตราการลามไฟ (หรืออัตราการเผาไหม้) ของถ่านอัดแท่ง ทำโดยการนำถ่านอัดแท่งมาวัดขนาดและน้ำหนักเริ่มต้น นำถ่านอัดแท่งตัวอย่างใส่ในภาชนะระบบกึ่งเปิดไม่มีลม (Semi-open, no wind) ดังภาพ จากนั้นทำการจุดให้ติดไฟให้ติดโดยรอบก้อนถ่าน แล้ววัดน้ำหนักของถ่านทุก ๆ 10 นาที เป็นระยะเวลา 100 นาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างน้ำหนักและเวลา เพื่อหาอัตราการเผาไหม้ในช่วงเวลา 10 นาที ถึง 90 นาที จากค่าความชันของกราฟ



ตัวอย่างข้อมูล

น้ำหนักของถ่านอัดแท่ง (g) ที่เวลา (min) ต่าง ๆ										
เริ่มต้น t = 0	t = 10	t = 20	t = 30	t = 40	t = 50	t = 60	t = 70	t = 80	t = 90	t = 100
60.327	58.803	57.393	50.097	43.652	41.153	38.522	32.114	28.383	24.589	19.499



ดังนั้นอัตราการลามไฟ (หรืออัตราการเผาไหม้) ของถ่านอัดแท่งในภาชนะระบบกึ่งเปิดไม่มีลม (Semi-open, no wind) จึงหาได้เท่ากับ 0.4416 g/min

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาปริมาณความร้อนด้วยการคำนวณทางทฤษฎี

การวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนในทางทฤษฎีอย่างง่ายโดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของถ่านจาก การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยวิธีพร็อกซิเมต (proximate analysis) ซึ่งจะให้ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon content, FC) ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter content, VM) และปริมาณเถ้า (ash content, ASH) ถูกสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อใช้คำนวณหาความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งที่พัฒนาขึ้นโดย Nhuchhen และคณะ (2012) ซึ่งได้ใช้ค่าปริมาณร้อยละของ FC, VM และ ASH (% by wt. dry basis of biomass) ในการ คำนวณหา โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการแบบ linear correlation และแบบ non-linear correlation ดังนี้

The linear correlation

$$HHV = 19.2880 - 0.2135x \frac{VM}{FC} + 0.0234x \frac{FC}{ASH} - 1.9584x \frac{ASH}{VM} \quad (1)$$

The non-linear correlation

$$HHV = 20.7999 - 0.3214x \frac{VM}{FC} + 0.0051x \left(\frac{VM}{FC} \right)^2 - 11.2277x \frac{ASH}{VM} + 4.4953x \left(\frac{ASH}{VM} \right)^2 - 0.7223x \left(\frac{ASH}{VM} \right)^3 + 0.0383x \left(\frac{ASH}{VM} \right)^4 + 0.0076x \left(\frac{FC}{ASH} \right) \quad (2)$$

ตาราง แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของถ่านอัดแท่งตัวอย่าง

ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบของถ่านอัดแท่งที่ได้						
ค่าเฉลี่ย % by wt. wet basis				ค่าเฉลี่ย % by wt. dry basis		
Moisture	VM	ASH	FC	VM	ASH	FC
7.52	10.40	6.44	75.64	9.61	5.95	84.43

ตัวอย่างการคำนวณ

- ร้อยละของ VM (% by wt. dry basis)

เมื่อ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักถ่านอัดแท่งตัวอย่างที่ใช้ 1.0710 g มี % Moisture = 7.52

ดังนั้น น้ำหนักถ่านตัวอย่าง (dry basis) = $1.0710 - (1.0710 \times 7.52/100)$

$$= 0.9904 \text{ g}$$

$$VM (\% \text{ by wt. dry basis}) = (10.40/1.0710) \times 0.9904$$

$$VM (\% \text{ by wt. dry basis}) = 9.61 \%$$

- สำหรับการคำนวณหาร้อยละของ ASH (% by wt. dry basis) ก็ทำการคำนวณได้เช่นเดียวกันกับ VM โดยใช้น้ำหนักของถ่านอัดแท่งตัวอย่าง (dry basis) ซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ยที่ใช้เท่ากับ 1.1225 g

- สำหรับการคำนวณหาร้อยละของ FC (% by wt. dry basis) = $100 - \%VM - \%ASH$

ดังนั้นถ่านอัดแท่ง มีค่า VM = 9.61% ASH = 5.95% และ FC = 84.43%

เมื่อแทนค่าในสมการ linear correlation จะได้ว่า

$$\text{HHV} = 19.2880 - 0.2135(9.61/84.43) + 0.0234(84.43/5.95) - 1.9584(5.95/9.61)$$

$$\text{HHV} = 18.3834 \text{ MJ/kg} = 4.4120 \text{ kcal/g}$$

เมื่อแทนค่าในสมการ non-linear correlation จะได้ว่า

$$\text{HHV} = 20.7999 - 0.3214(9.61/84.43) + 0.0051(9.61/84.43)^2 - 11.2277(5.95/9.61)$$

$$+ 4.4953(5.95/9.61)^2 - 0.7223(5.95/9.61)^3 + 0.0383(5.95/9.61)^4$$

$$+ 0.0076(84.43/5.95)$$

$$\text{HHV} = 15.4780 \text{ MJ/kg} = 3.7147 \text{ kcal/g}$$

ภาคผนวก จ

ภาพตัวอย่างการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนและผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควัน



การอบรมให้ความรู้การผลิตถ่านอัดแท่งไร้ควัน



การอบรมการเตรียมถ่านจากเศษกะลาแมคคาเดเมีย



การสาธิตการเผาถ่านด้วยเตาเผาถ่านน้อย



การบดถ่านเพื่อลดขนาดสำหรับการทำถ่านอัดแท่ง



การผสมสูตรผลิตถ่านอัดแท่ง



การสาธิตการขึ้นรูปถ่านอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งถ่าน



การตากถ่านอัดแท่งให้แห้ง



ผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งไร้ควัน

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ: รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยรัตน์ มุลศรี
คุณวุฒิ: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตร์ดุษฎีบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่ง: อาจารย์
สถานที่ติดต่อ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ หุ้เต็ม
คุณวุฒิ: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยนเรศวร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่ง: อาจารย์
สถานที่ติดต่อ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎิญา มุลศรี
คุณวุฒิ: ศศ.บ. (บริหารธุรกิจ) สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์
บธ.ม. (บริหารธุรกิจ) มหาวิทยาลัยนเรศวร
บธ.ค. (บริหารธุรกิจ) มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ตำแหน่ง: อาจารย์
สถานที่ติดต่อ: คณะคณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์